

QUESTの長時間運転における計測と制御

長谷川, 真
九州大学応用力学研究所

QUESTグループ
九州大学応用力学研究所

<https://hdl.handle.net/2324/7183079>

出版情報 : pp. 1-32, 2023-03-02. 量子科学技術研究開発機構
バージョン :
権利関係 :



QUESTの長時間運転における 計測と制御

長谷川真, and QUESTグループ
九州大学 応用力学研究所

於 第25回若手科学者によるプラズマ研究会
「若手研究者による核融合研究の進展 -小型から大型
装置までの計測・制御技術の共有-」

日時: 2023年3月1日(水) - 2023年3月3日(金)

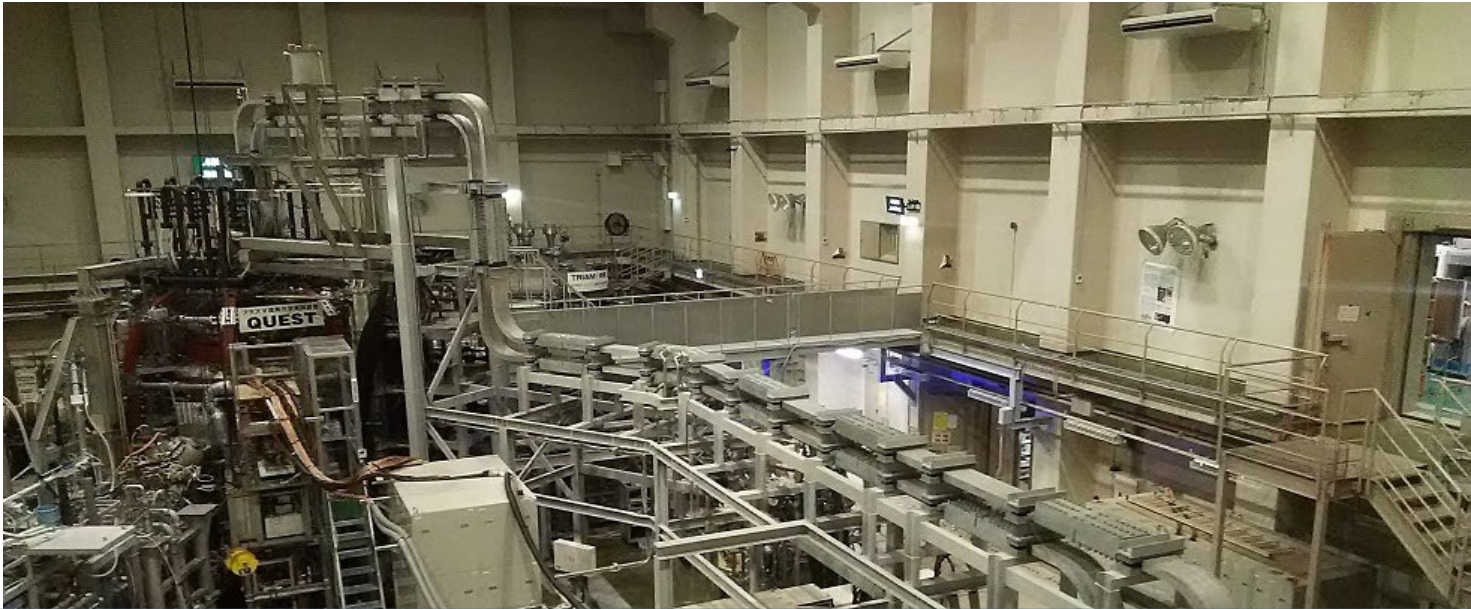
場所: □

内容：

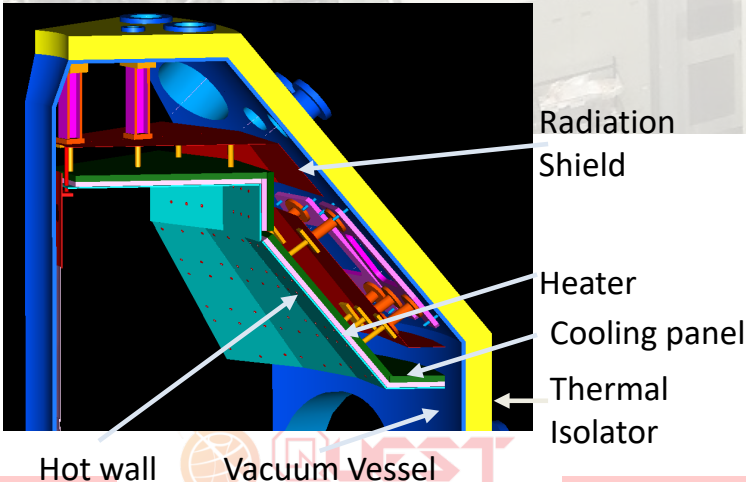
- QUESTの紹介
- 高温壁による粒子バランス制御
- 定常運転のための粒子供給制御
- プラズマ位置・形状の同定と制御
- 長時間放電
- まとめ

QUEST装置外観

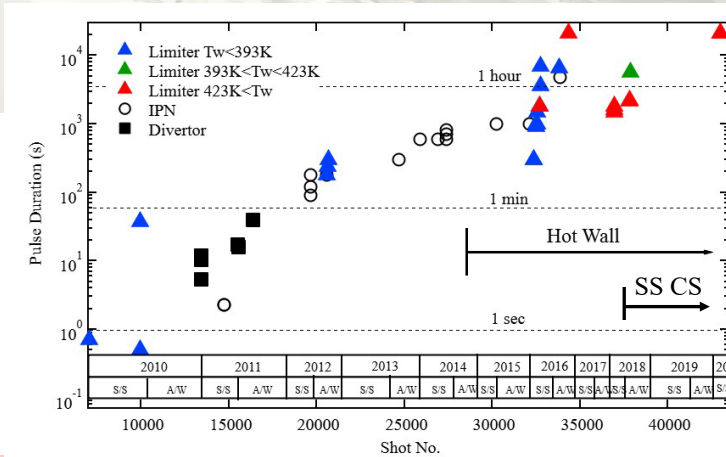
本体室撮影



高温壁の構造図

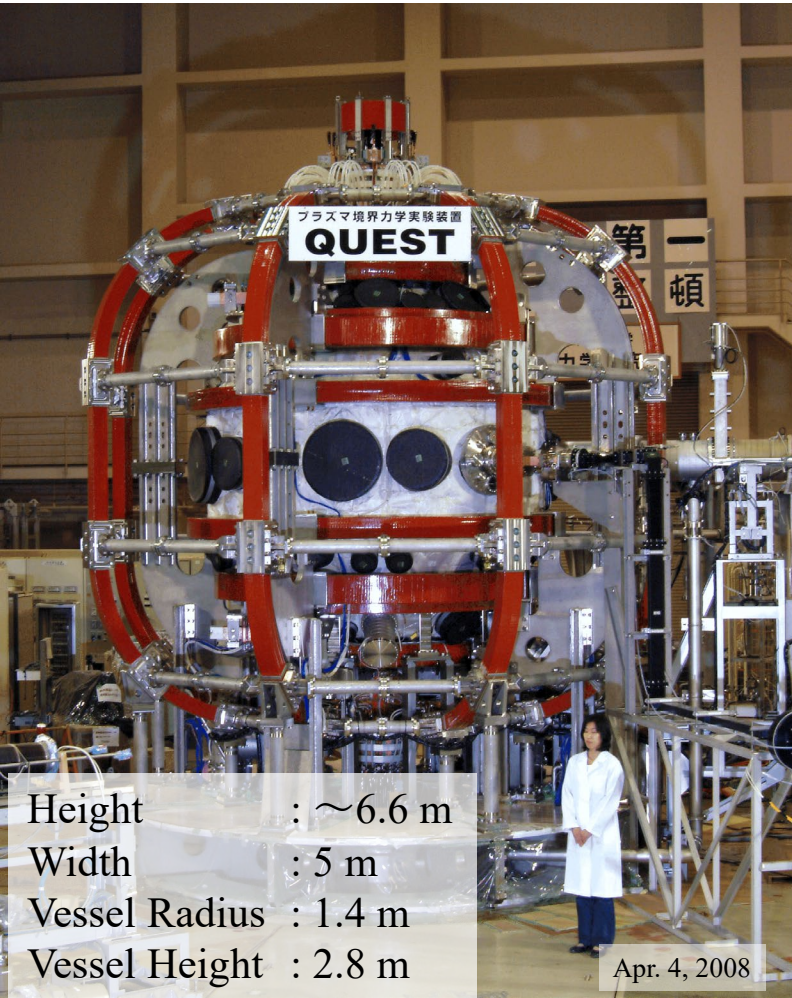


長時間放電の履歴



QUEST

(Q-shu University Experiment with Steady-State Spherical Tokamak)



Strategy of Japanese ST development

- High β and Steady State operation (SSO) is one of the most important issues for fusion power plant.
- ST has a possibility to extend the future fusion reactor design. Small and middle sized STs have been focused on their target.

Overview of coordinated ST research in Japan

2

Strategy of Japanese ST Research

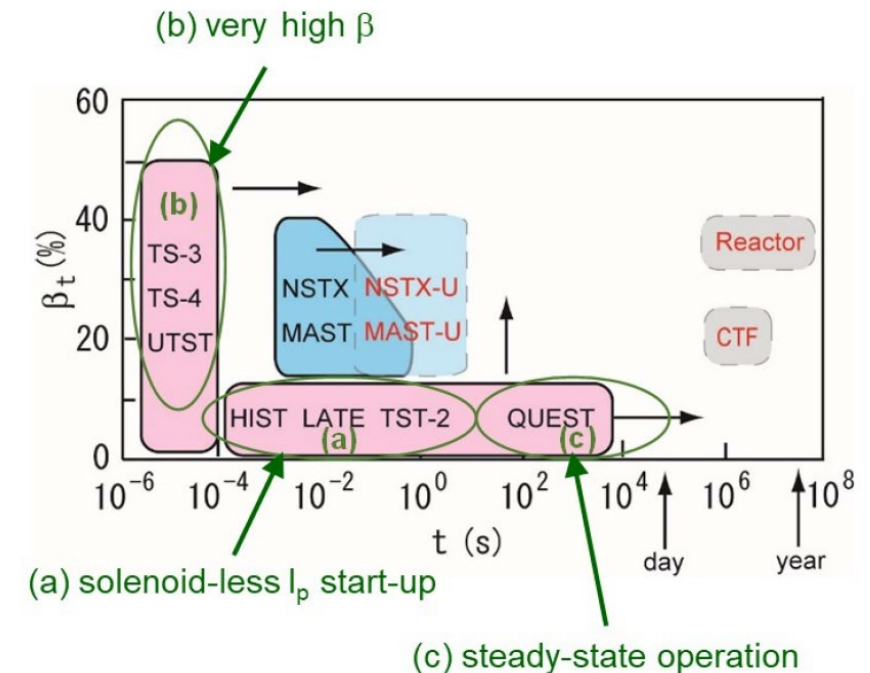
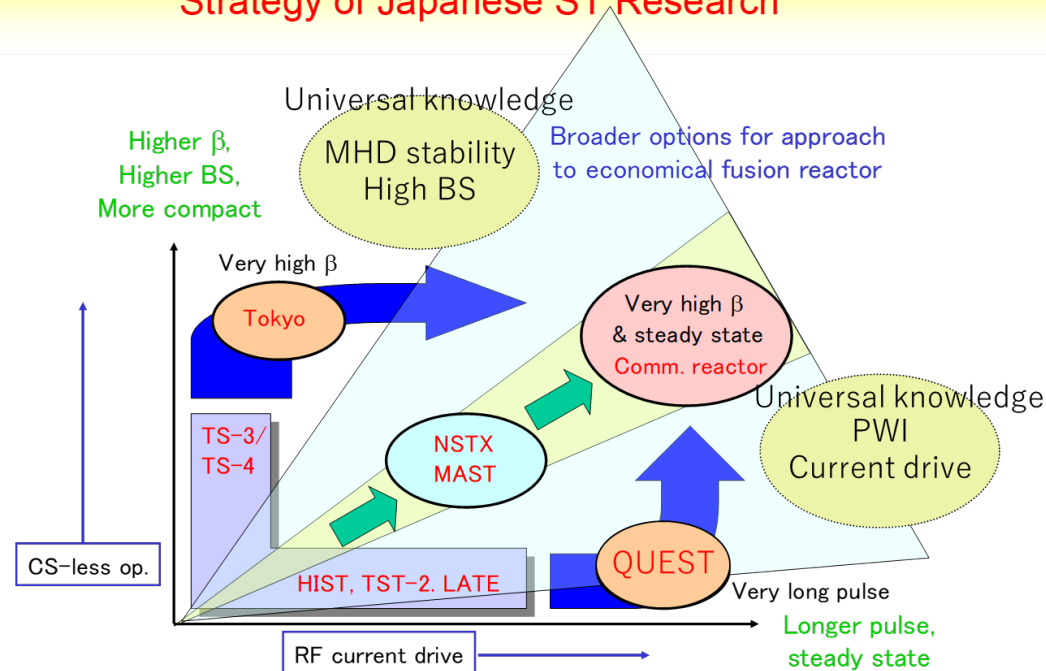


Figure 1. Japanese ST research strategy [1].

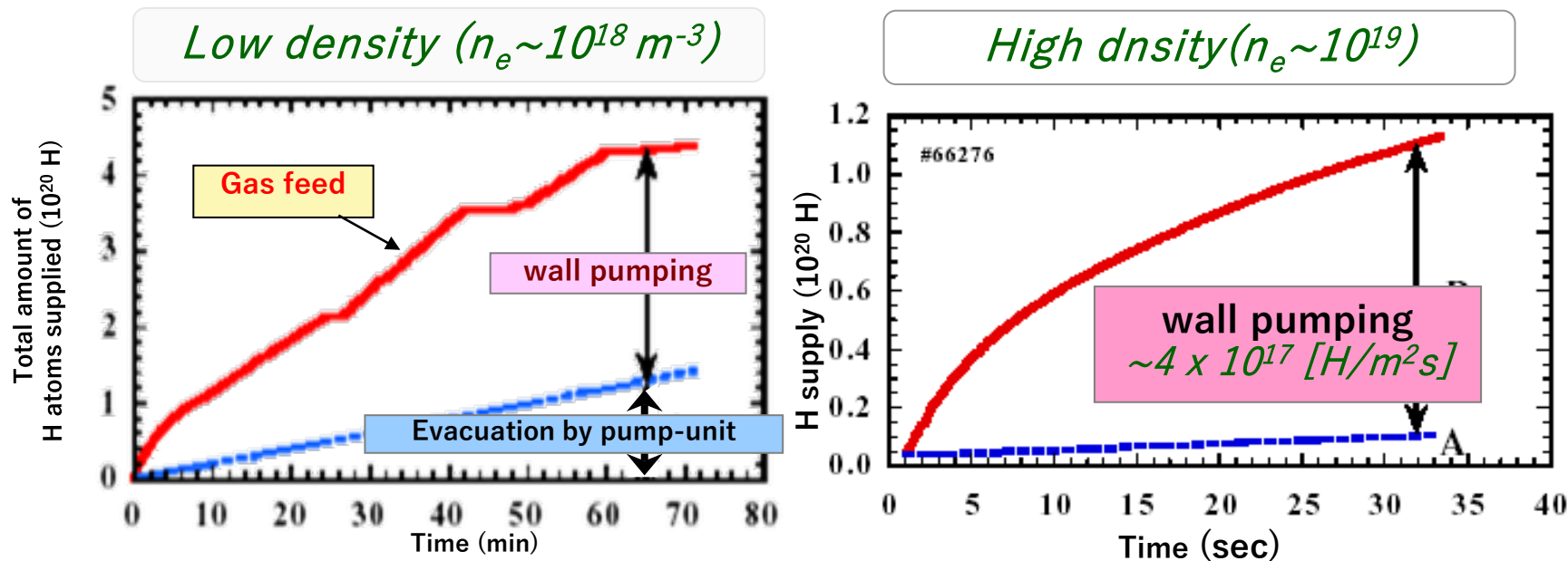
- QUEST is the main device for the research of steady state operation in this framework.

Takase, Y., et. al. (2022). Overview of coordinated spherical tokamak research in Japan. *Nuclear Fusion*, 62(4), [042011]. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac29cf>

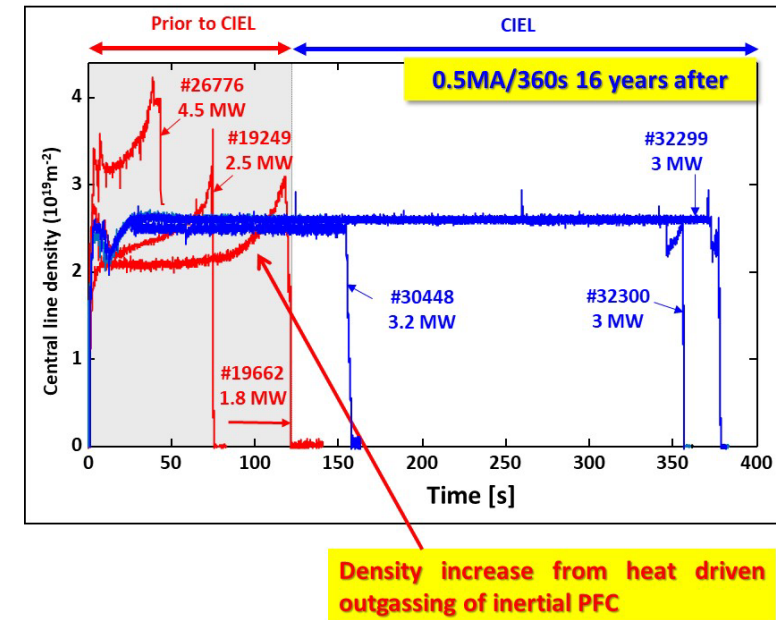
4

Control of fuel recycling is the key to SSO

- Actually, fuel particle balance is a reason why the longest discharge was terminated.
- Fuel particles could be stored in PFCs and the amount is frequently more than 100 times larger than particle inventory in the plasma -> Wall pumping is significantly higher than the capability of the vacuum pumping system.
- Control of fuel recycling is the key to SSO of high performance plasmas.

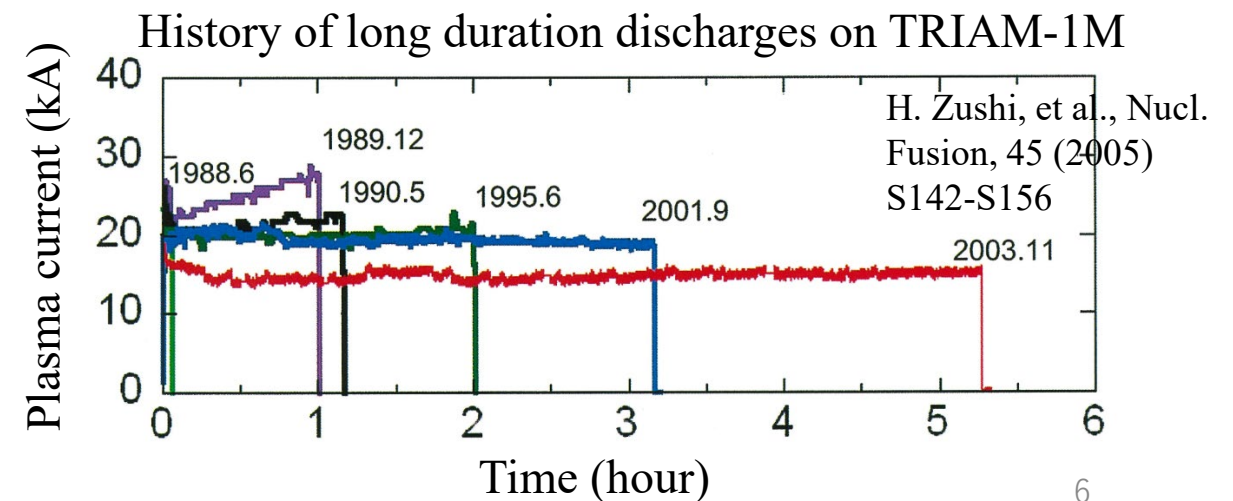
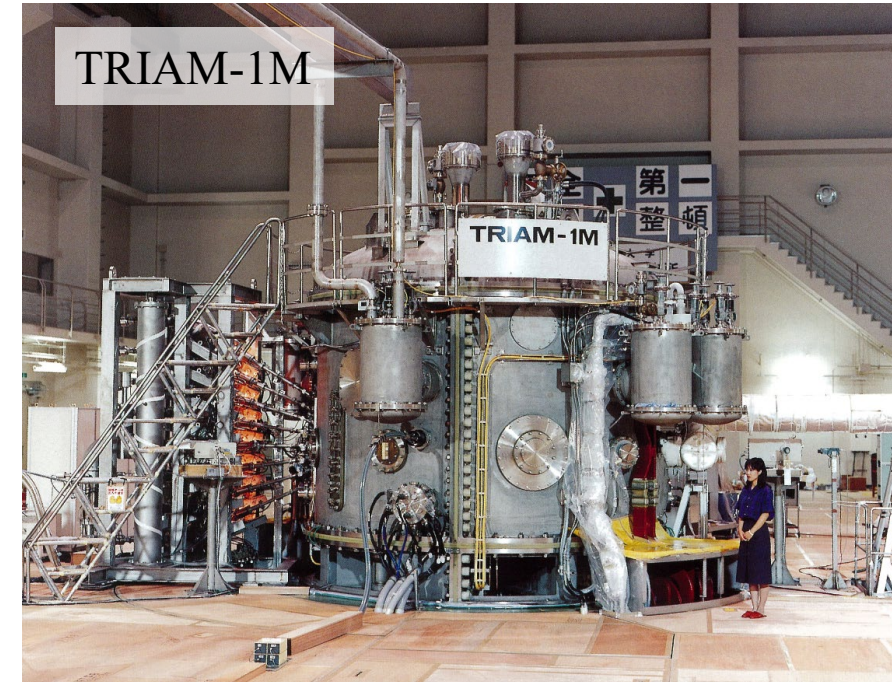
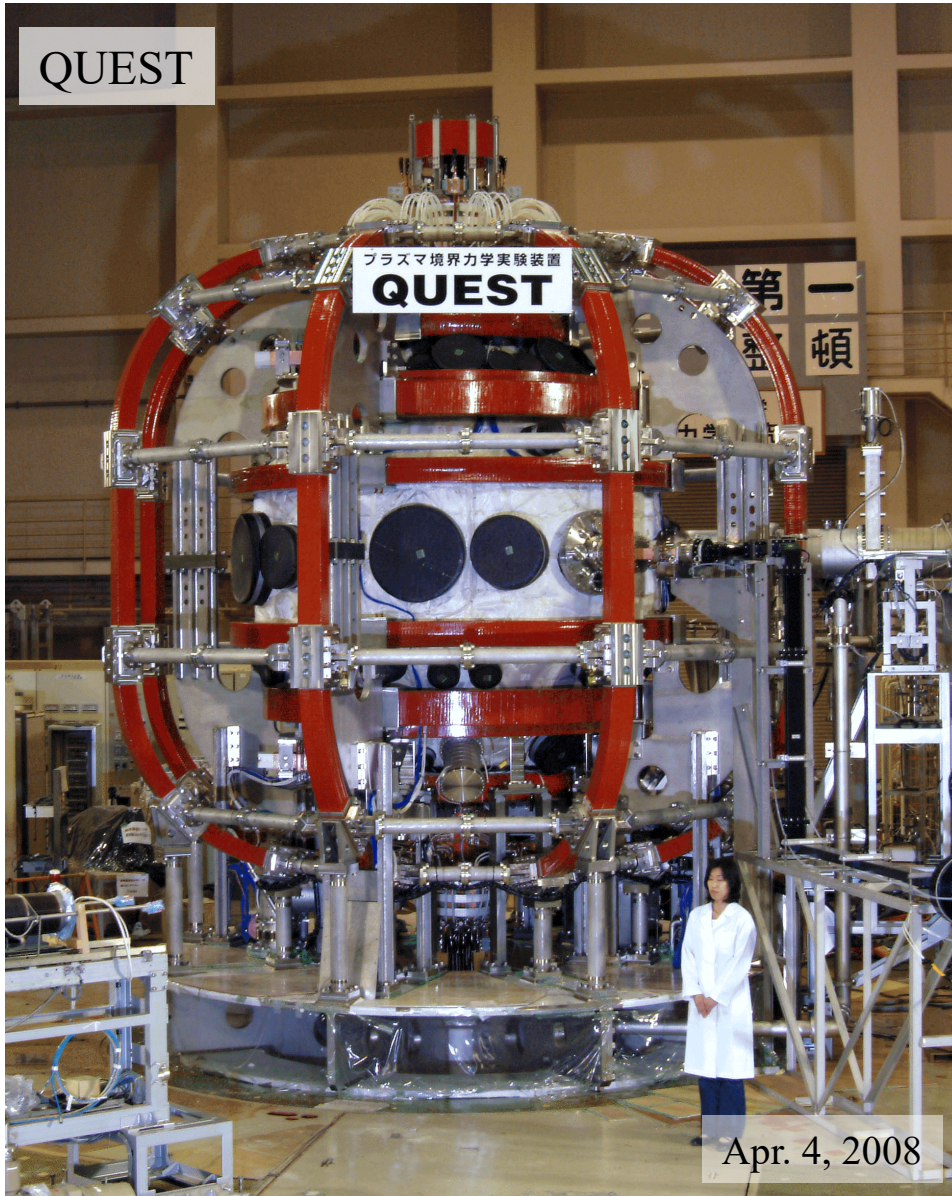


TRIAM-1M(All metal PFCs)



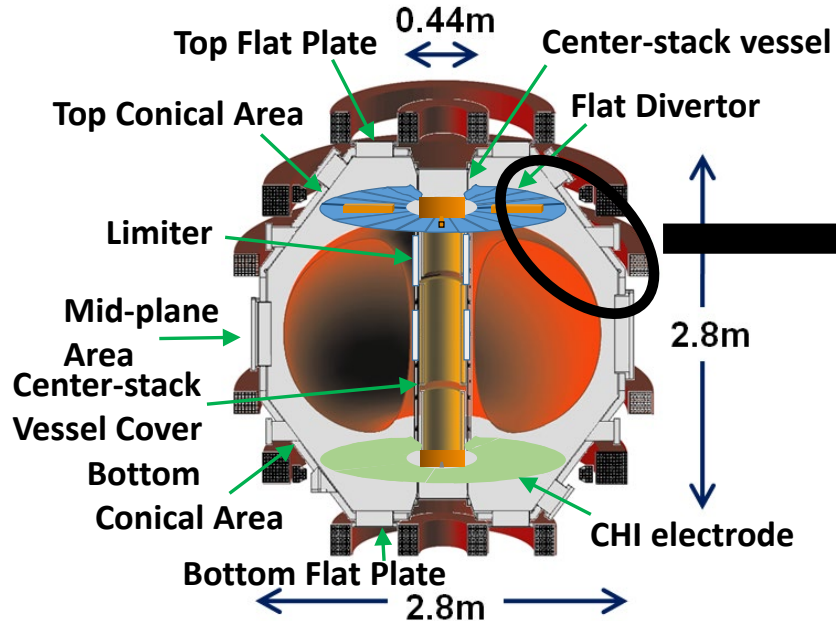
Tore Supra
(C-based PFCs)⁵

QUEST is a succession tokamak to TRIAM-1M

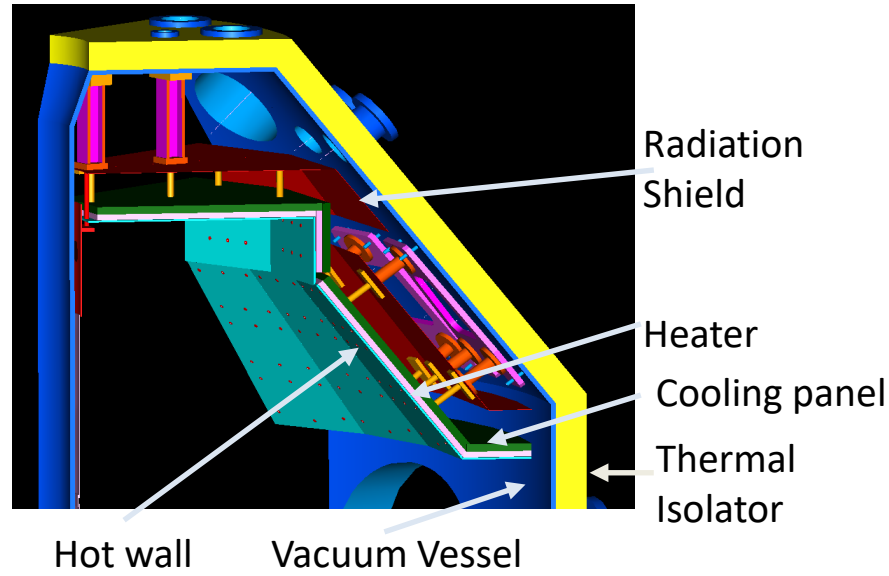


プラズマ対向壁(PFW)として温度制御可能な高温壁の設置

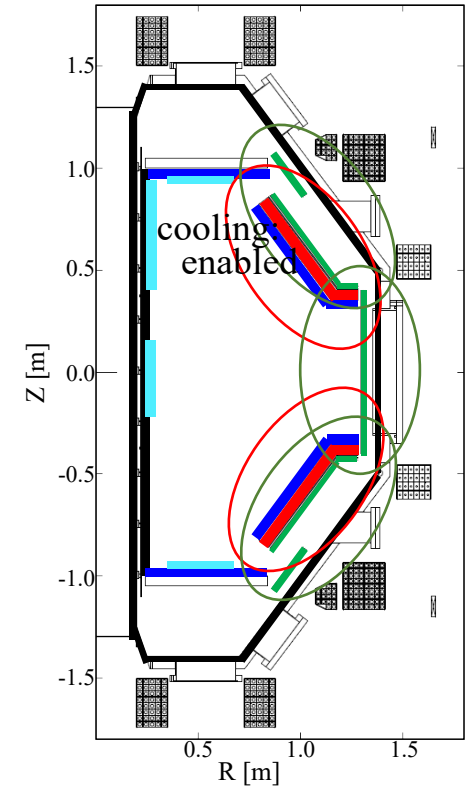
QUESTの断面図



高温壁の外観図



ポロイダル断面図



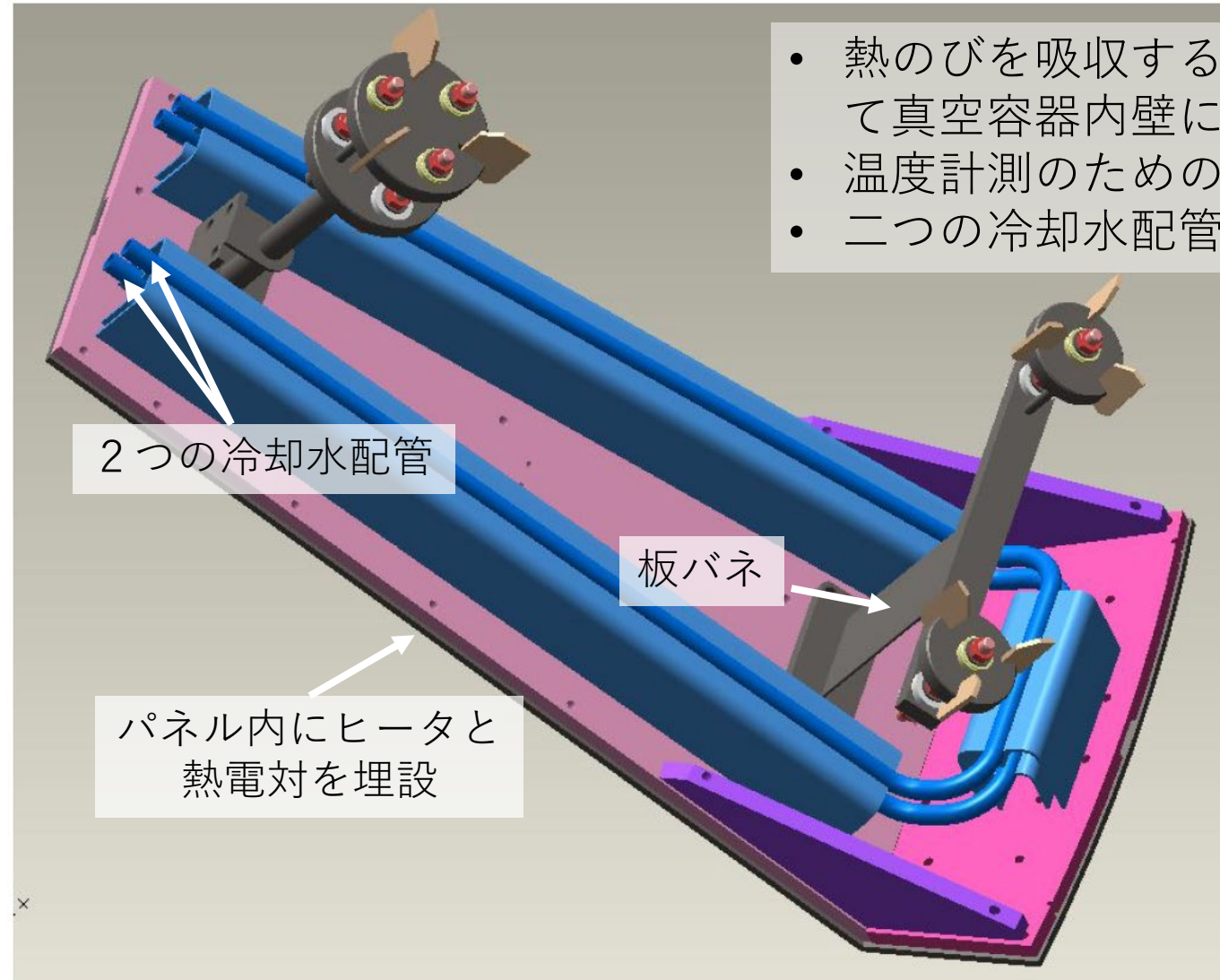
- 2014年に真空容器上下のコニカル部に高温壁を設置。
- 0.1mm厚のAPS-Wコーティングされたステンレススチールで製作
- 高温壁の熱が真空容器に逃げないように、間に輻射シールドを設置
- 2017年から高温壁の冷却水の通水が可能となり、高温壁の能動的溫度制御が可能になった。

真空容器 (SS)
輻射シールド (SS)
高温壁 (SS)
APS-W coated SS
冷却 W リミター

プラズマ対向壁 (PFW) としての高温壁

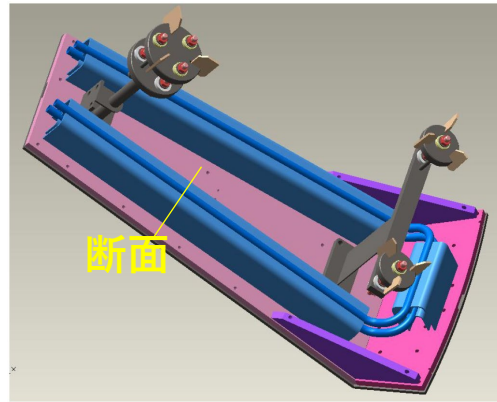
高温壁 1 セクションの3D概念図

真空容器内部

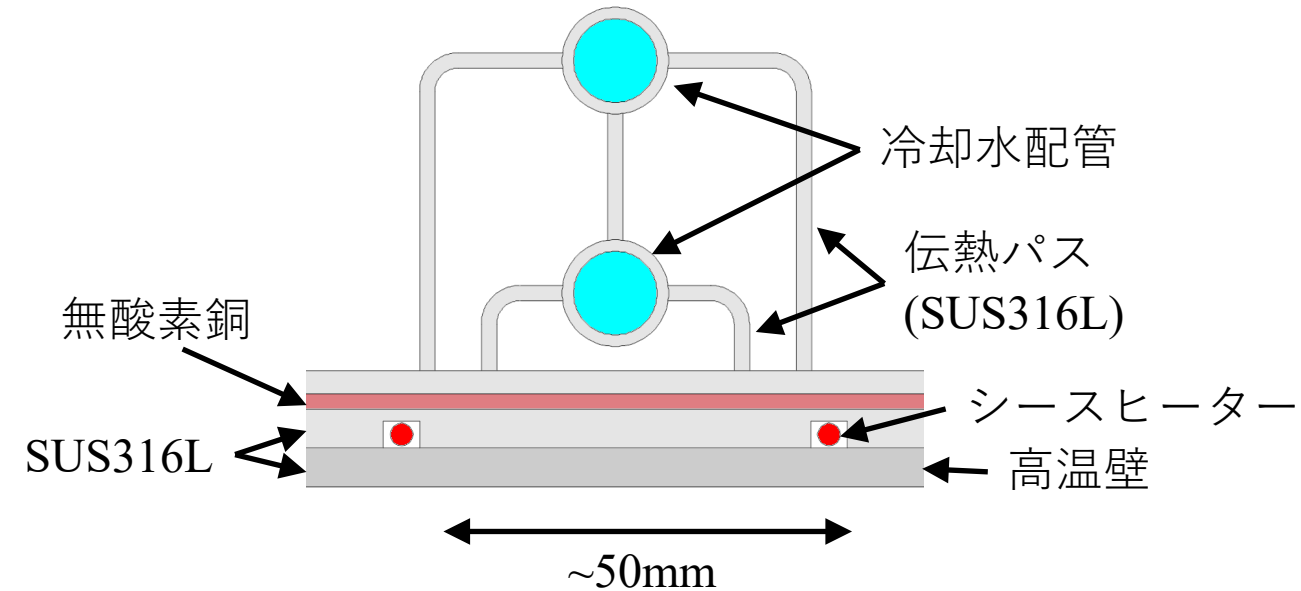


プラズマ対向壁 (PFW) としての高温壁

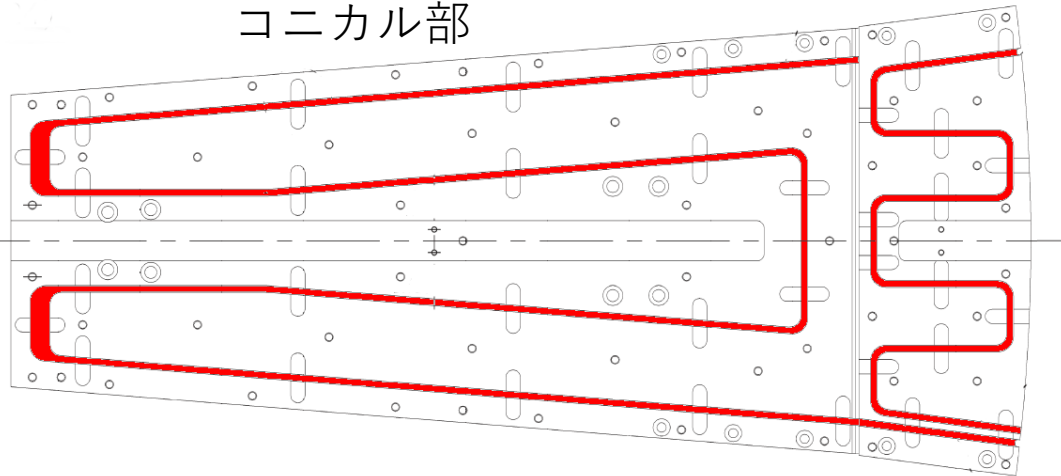
高温壁 1 セクションの3D概念図



加熱と冷却チャンネルの断面図



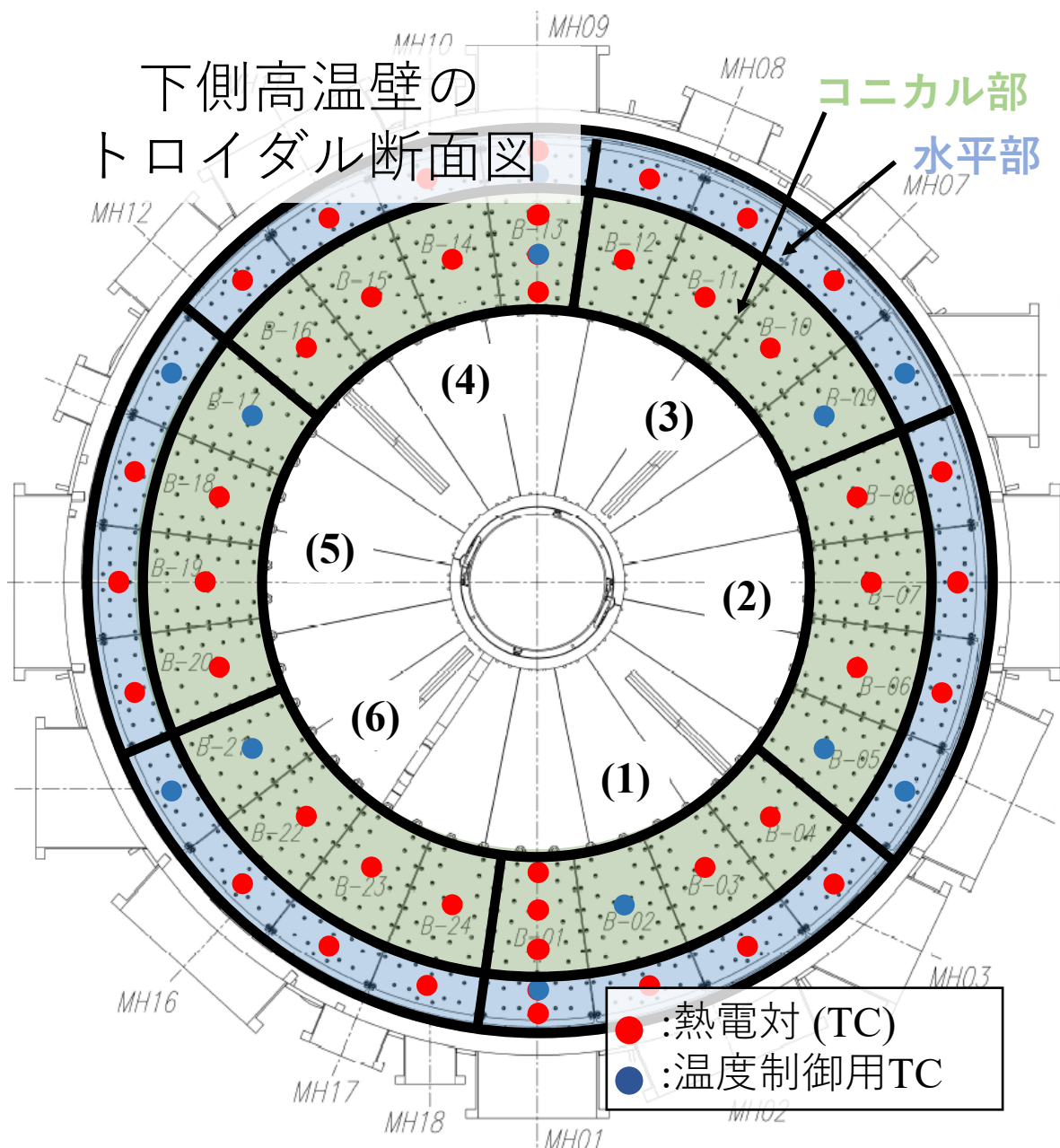
コニカル部 水平部



シースヒーターの経路 (赤色)

- コニカル部と水平部にそれぞれシースヒーター埋設
- 温度分布を一様にするための無酸素銅をパネル内に埋設
- 過冷却を避けるため冷却水配管は伝熱パスを介して高温壁に接触
- 2系統の冷却水配管をもちいて冷却能力を調整

温度フィードバック制御を行う加熱システム

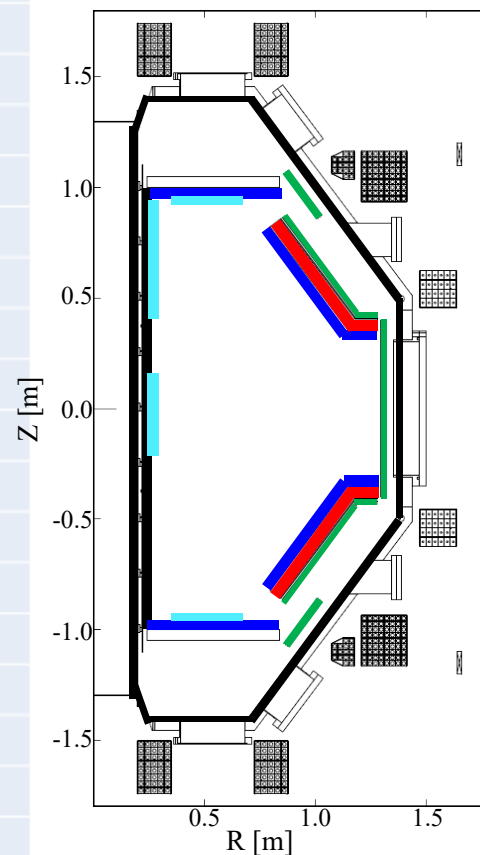
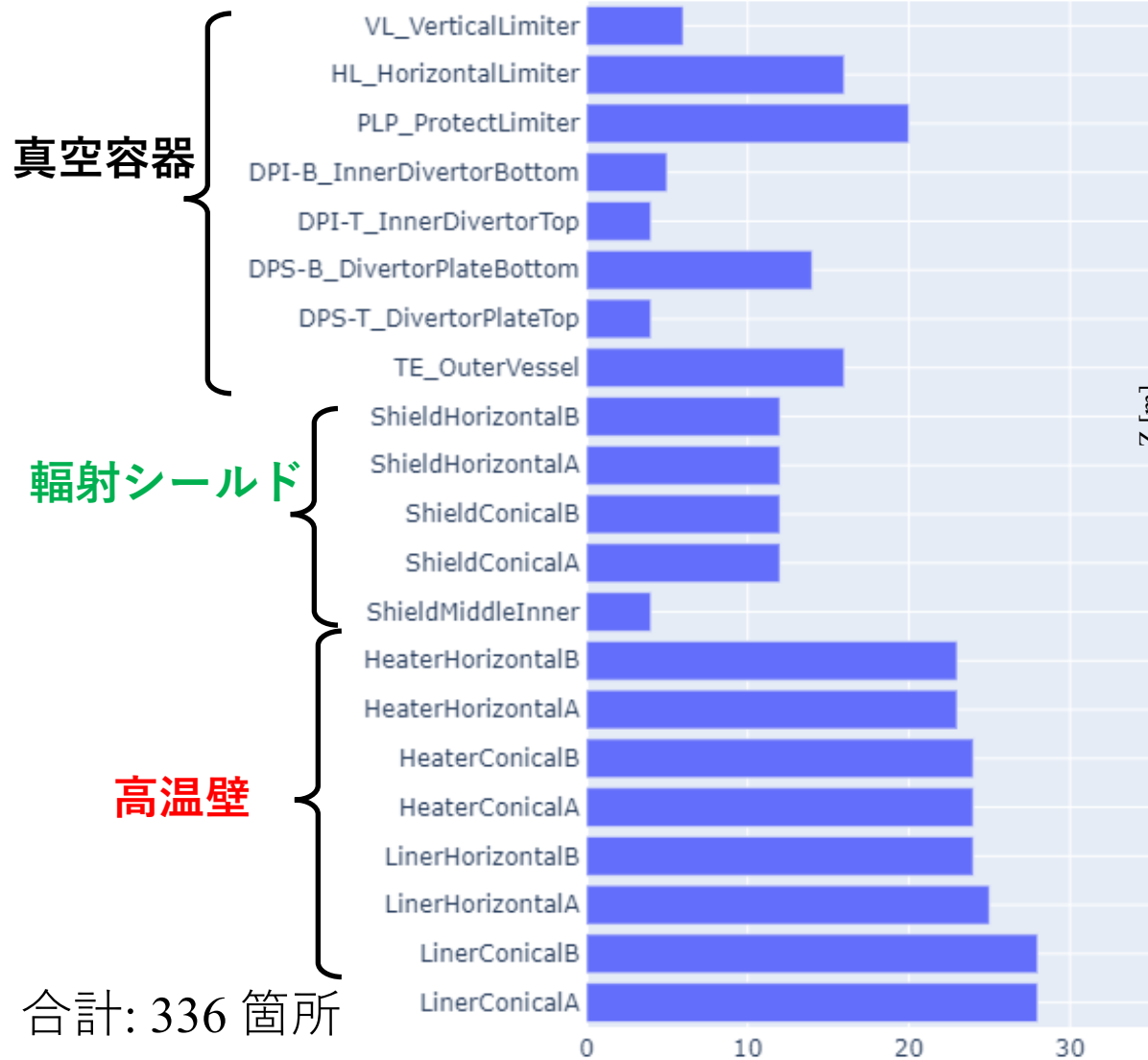


- トロイダル方向に24セクションの高温壁
- 制御範囲をグループに分割
(トロイダル方向に6グループ、コニカル部と水平部に2グループ)
- 各グループ毎に温度制御用TCの計測値をもとに、ヒーターパワーのフィードバック制御を行う。
- 全部で24個のグループに対して温度制御を行う。

$$24 \text{ グループ} = \left[\begin{array}{l} 6 \text{ グループ} \\ \text{トロイダル方向} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{l} 2 \text{ グループ} \\ \text{コニカル部 \& 水平部} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{l} 2 \text{ グループ} \\ \text{高温壁上側 \& 下側} \end{array} \right]$$

温度分布をモニターする熱電対の設置数

熱電対の設置数



高温壁

輻射シールド

高温壁

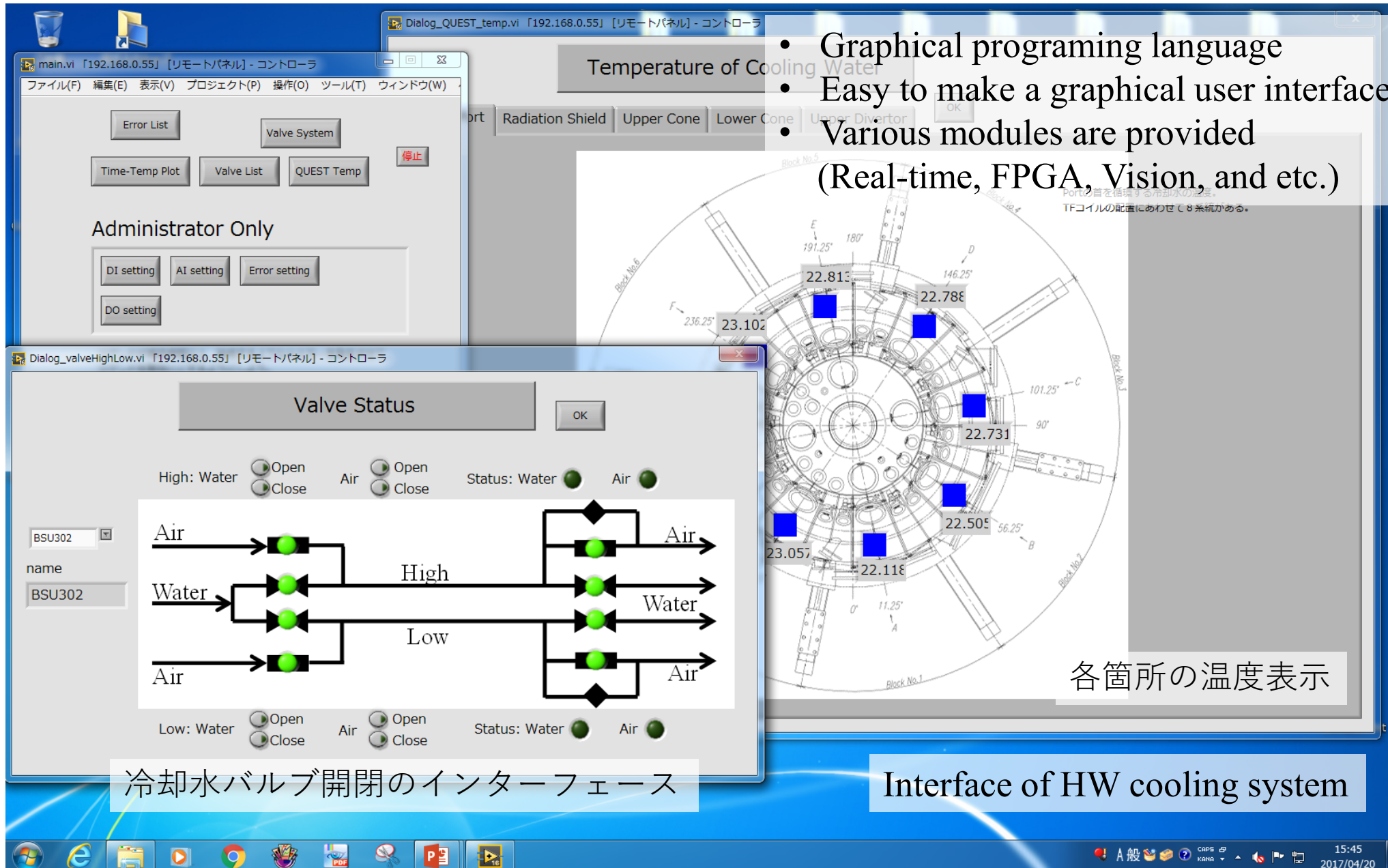
温度分布を正確に把握するために
多数の熱電対を設置

- 85: 真空容器
- 52: 輻射シールド
- 199: 高温壁

336 sensors in total

HW cooling and heating systems developed by LabVIEW

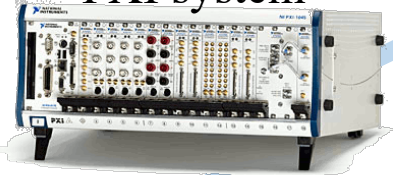
- Graphical programming language
- Easy to make a graphical user interface
- Various modules are provided (Real-time, FPGA, Vision, and etc.)



Overall system configuration for the control of hot wall

Central Control System (CCS)

PXI system



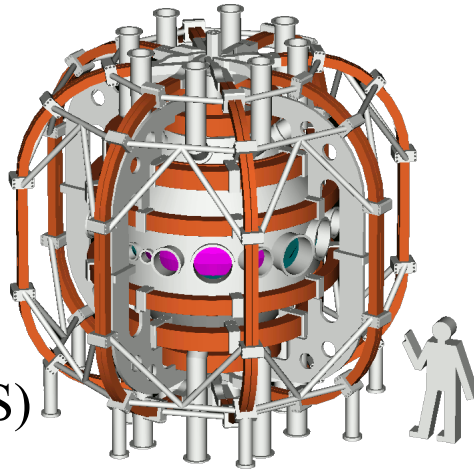
シーケンスの管理
各機器の状態監視

HW Cooling System (HWCS)

cRIO system



高温壁冷却水バルブの開閉
冷却水の温度モニター



Plasma Control System (PCS)

PXIe system



プラズマの制御

HW Heating System (HWHS)

MELSEC sequencer



高温壁の温度フィード
バック制御

- 各システムはEthernetを介して相互に接続
- シーケンス情報
 - 放電番号
 - シーケンス時刻
 - 終了予定時刻、etc.などはUDP通信を介して機器間で共有

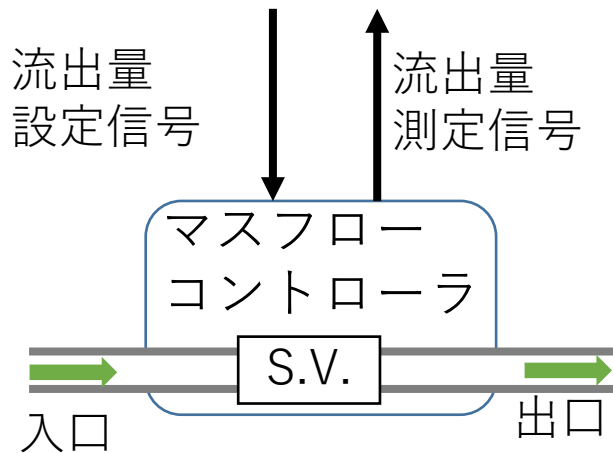


Periodical UDP packets

定常運転のための粒子供給制御

----- マスフローコントローラを用いたPIDフィードバック制御 -----

プラズマへの粒子供給にマスフローコントローラを使用。ソレノイドバルブを用いて粒子供給量を調節する。

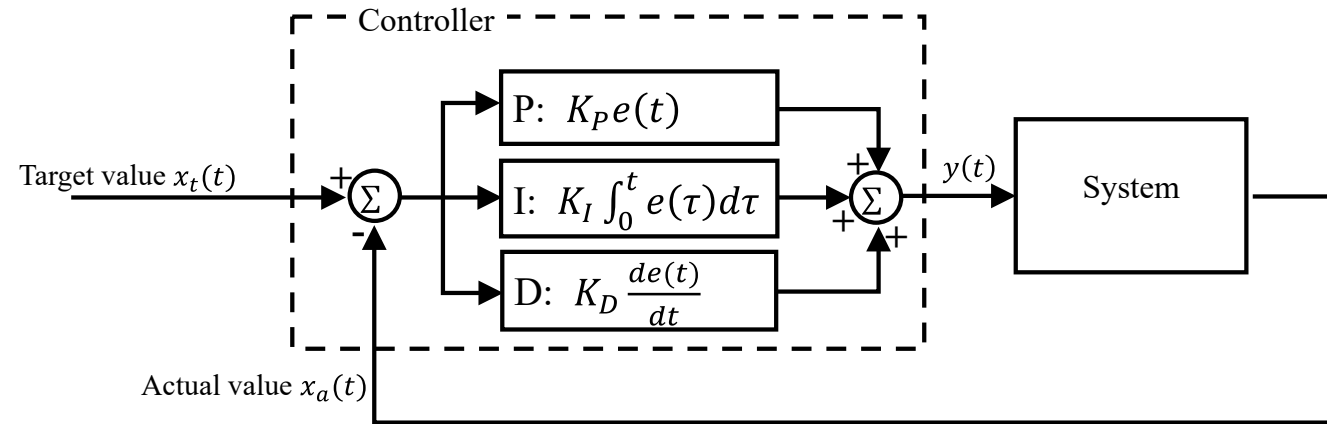


マスフローコントローラ
0.2~20.0 mL/min
(Azbil Corp. MQV9020)

プラズマの定常維持をするためには、様々なプラズマパラメータの制御が行える必要がある。プラズマ発光H α 信号を制御するために、マスフローコントローラを用いたPID制御を導入した。

基本的に、
粒子供給

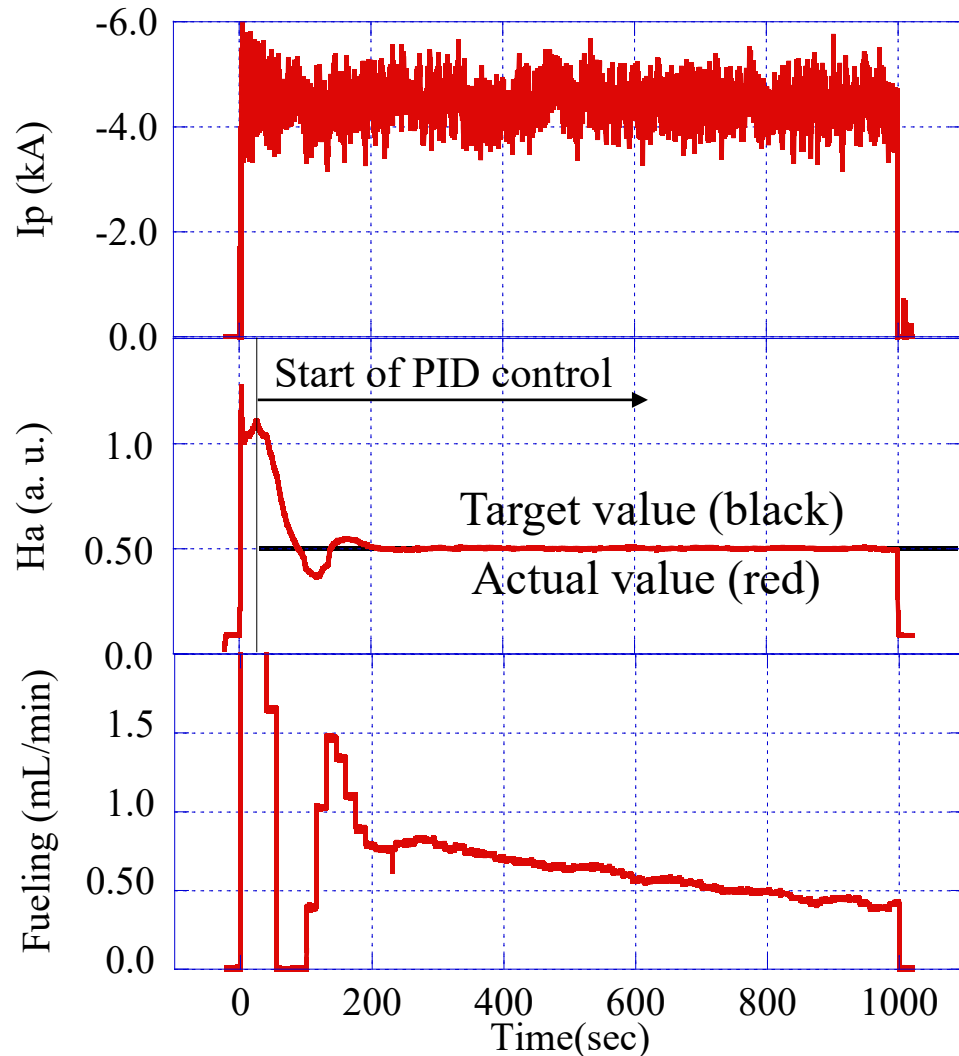
→ プラズマ発光H α 信号



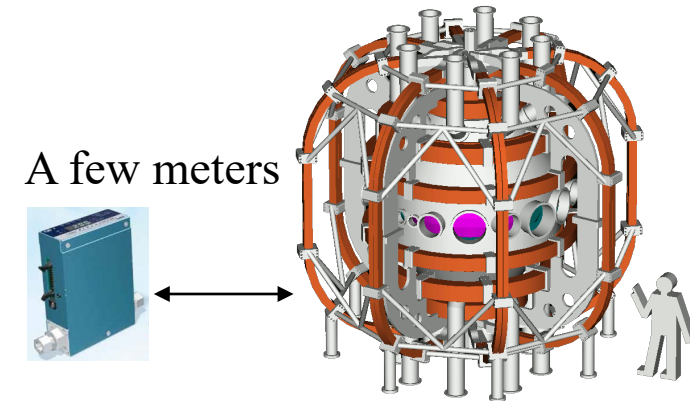
(目標値および実際値はプラズマ発光H α 信号)

定常運転のための粒子供給制御

----- マスフローコントローラを用いたPIDフィードバック制御 -----



プラズマ発光 H_α 信号が一定値を維持するようにPID制御を行ったところ、粒子供給量を減らしていくことで、 H_α 信号は一定値を保ち、よく制御されている。



ソレノイドバルブが装置の磁場に影響を受けるため、マスフローコントローラは真空容器から数メートル離れて設置されている。

➡ 時間遅れが発生するので、数秒ごとにPIDの判断を行っている。

定常運転のための粒子供給制御

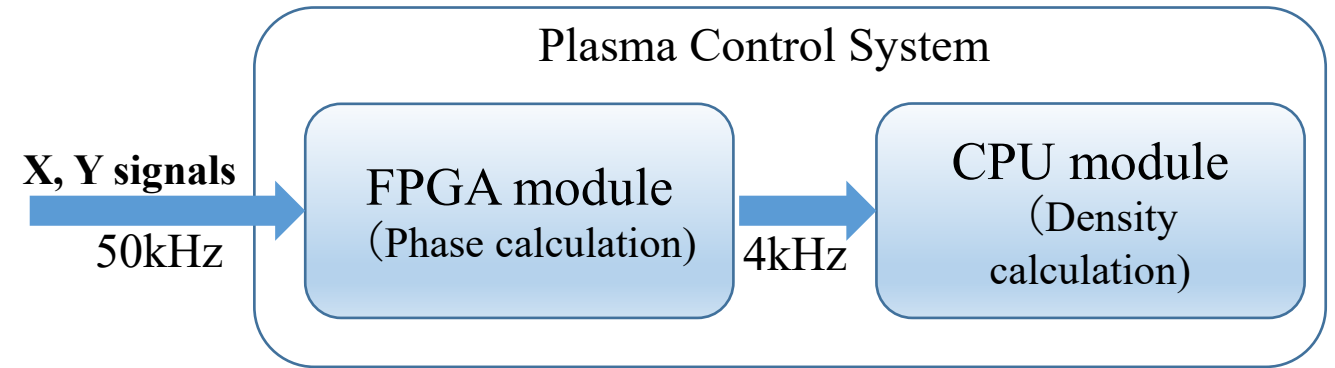
----- PCSにおけるFPGAを用いたプラズマ密度の計算 -----

粒子供給制御の参照信号として、
干渉計によるプラズマ密度のリアルタイム計算。

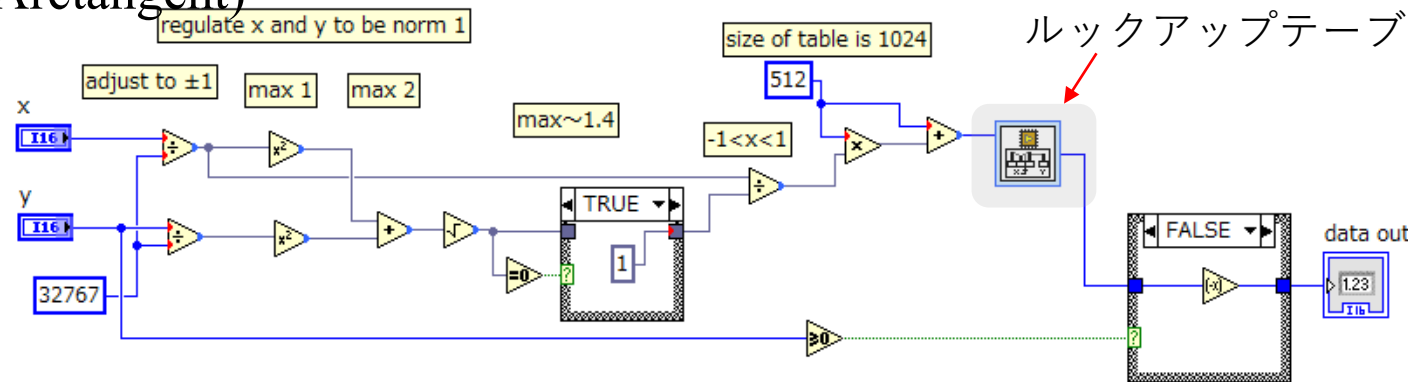
FPGA (Field-programmable gate array)は、
使用者によるカスタマイズが可能な集積回路

従来：

- CPUベースの計算
- 計算の実行速度は数kHzにとどまる。
➡ 位相の変化を見落とす恐れ



LabVIEWによるFPGAを用いた位相の計算 (Arctangent)



- ルックアップテーブル。Arctangentの計算に1025個のデータを持つルックアップテーブルを使用
- FPGAモジュールで50kHz(最高76kHz)の計算
- CPUモジュールは4kHzで計算結果を受け取り、制御等を使用

定常制御のための3軸ホール素子によるプラズマ同定

課題と対策

- ピックアップコイルなどの磁気センサーは積分操作による**ドリフトノイズ**のため長時間プラズマ制御には不向き。
- 積分操作を必要としないホール素子を使用する。

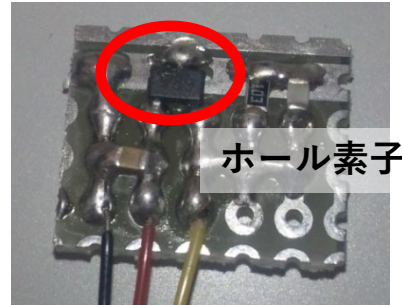
利点

- 真空容器の外側に設置**しても十分な感度を有しており、**高いメンテナンス性**を有し、かつ**低ノイズ環境**での計測が可能。
- (時間応答は低下)

現行の3軸ホール素子

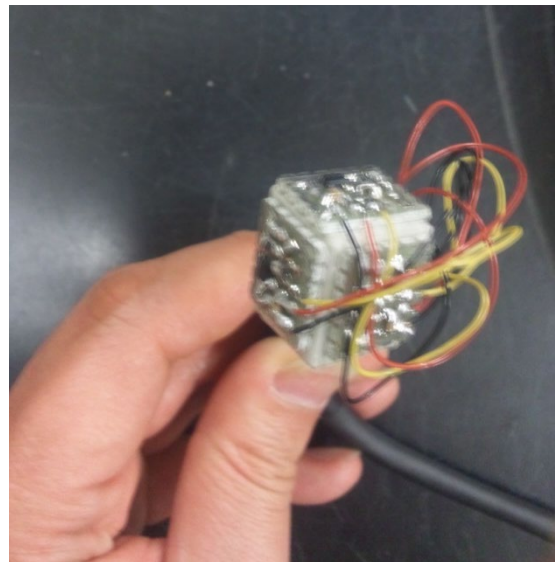


プロトタイプ



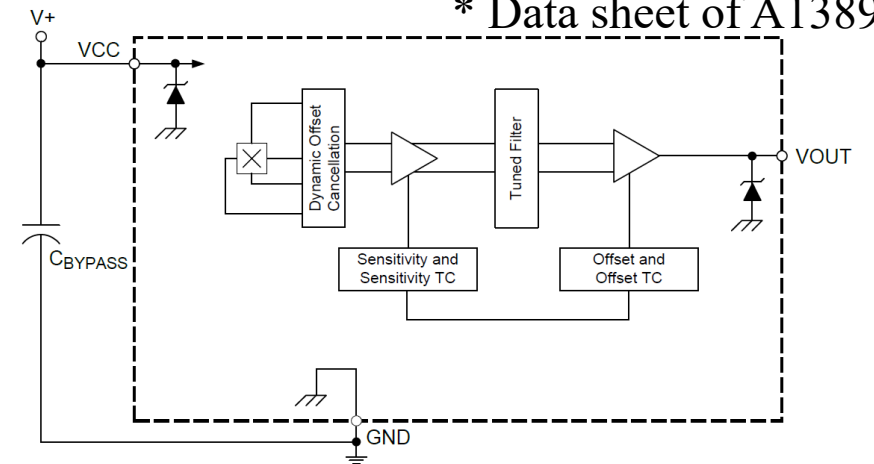
磁場検出範囲: $\pm 220\text{G}$ ($\pm 0.022\text{T}$)
(磁場感度: 9mV/Gauss)
出力電圧: $2.5 \pm 2.0\text{V}$
動作温度: $-40^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$
温度係数: $0.12\% / ^\circ\text{C}$

プラスチックの立方体の3方向に貼りつけ



Functional Block Diagram

* Data sheet of A1389



ホール素子によるプラズマ位置及び電流のリアルタイム算出

プラズマ電流を一本のフィラメント電流と仮定

- ・ 信号強度比 $\longrightarrow$ プラズマ位置
- ・ 絶対強度 $\longrightarrow$ プラズマ電流

算出フロー

各プラズマ位置（右図緑色, 50mmピッチグリッド）における、各ホール素子で計測されるべき磁場を、事前に計算

事前の計算

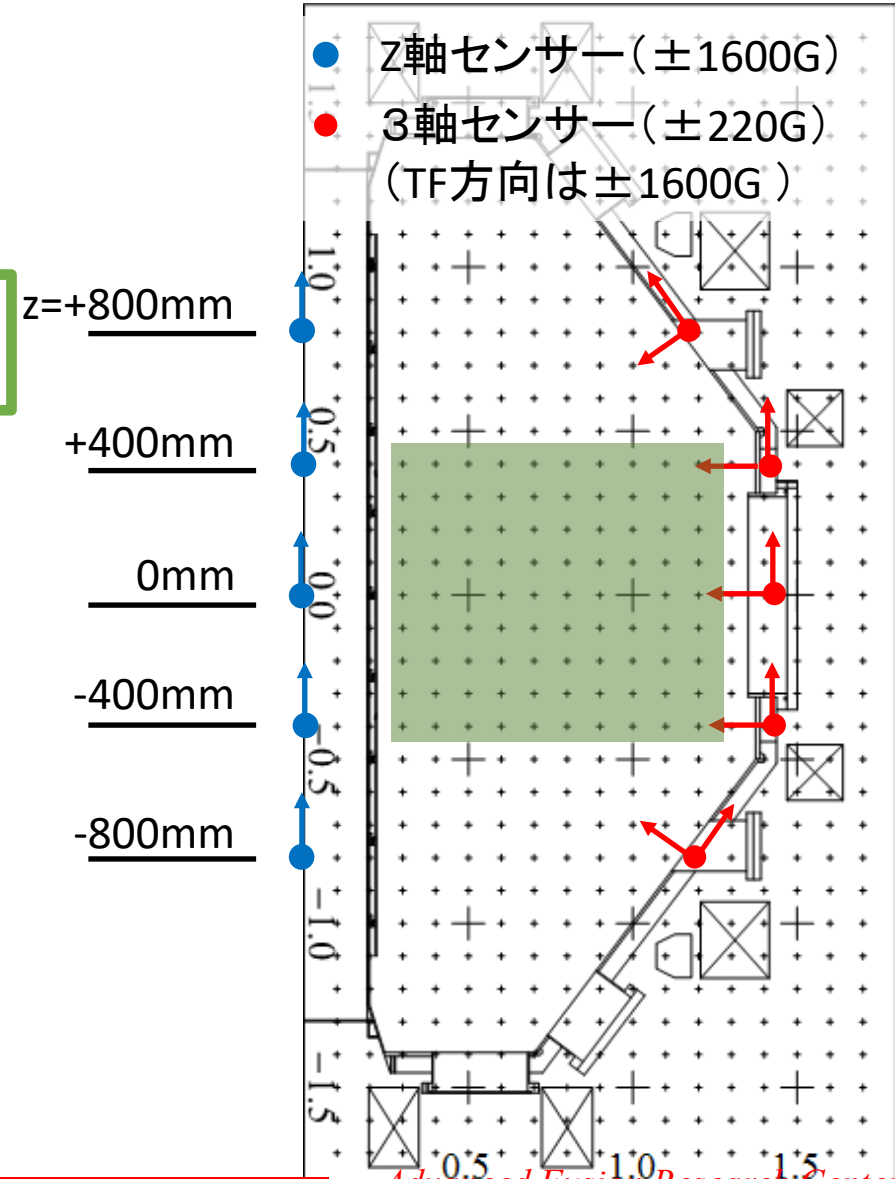
リアルタイムの計算

信号強度比を最も良く再現するグリッドポイント（**プラズマ位置**）を求める。

そのグリッドポイント近傍の線形近似関数を作成して、連続的な値を持つものとしてプラズマ位置を算出

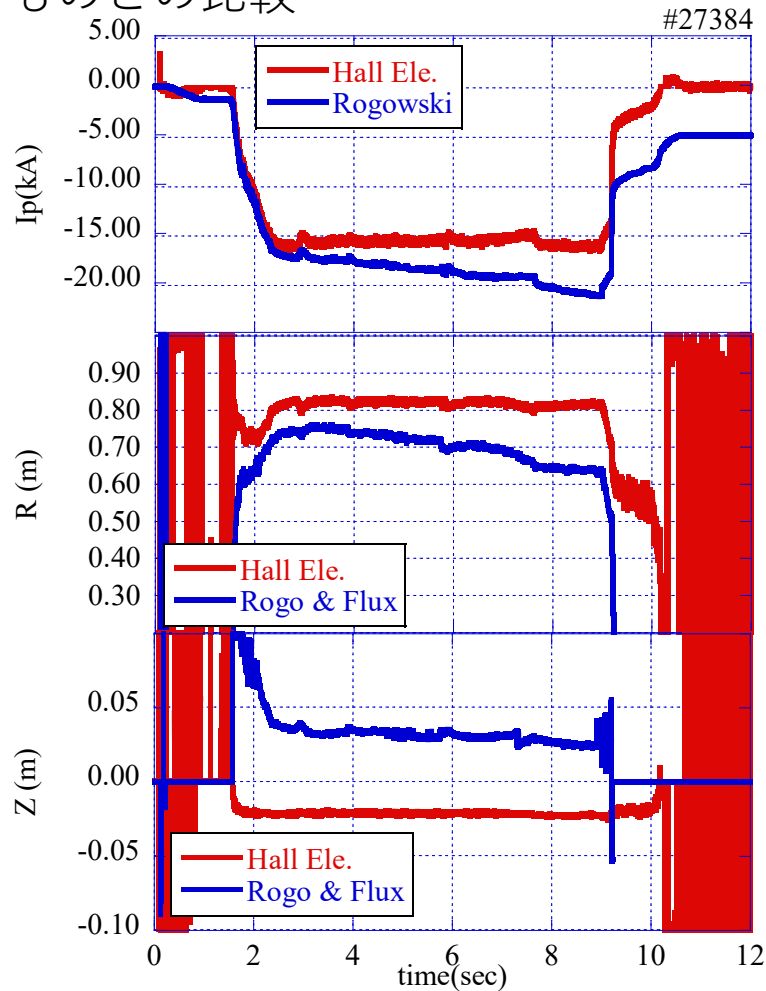
信号強度を最も良く再現する**プラズマ電流**を算出

ホール素子の設置位置

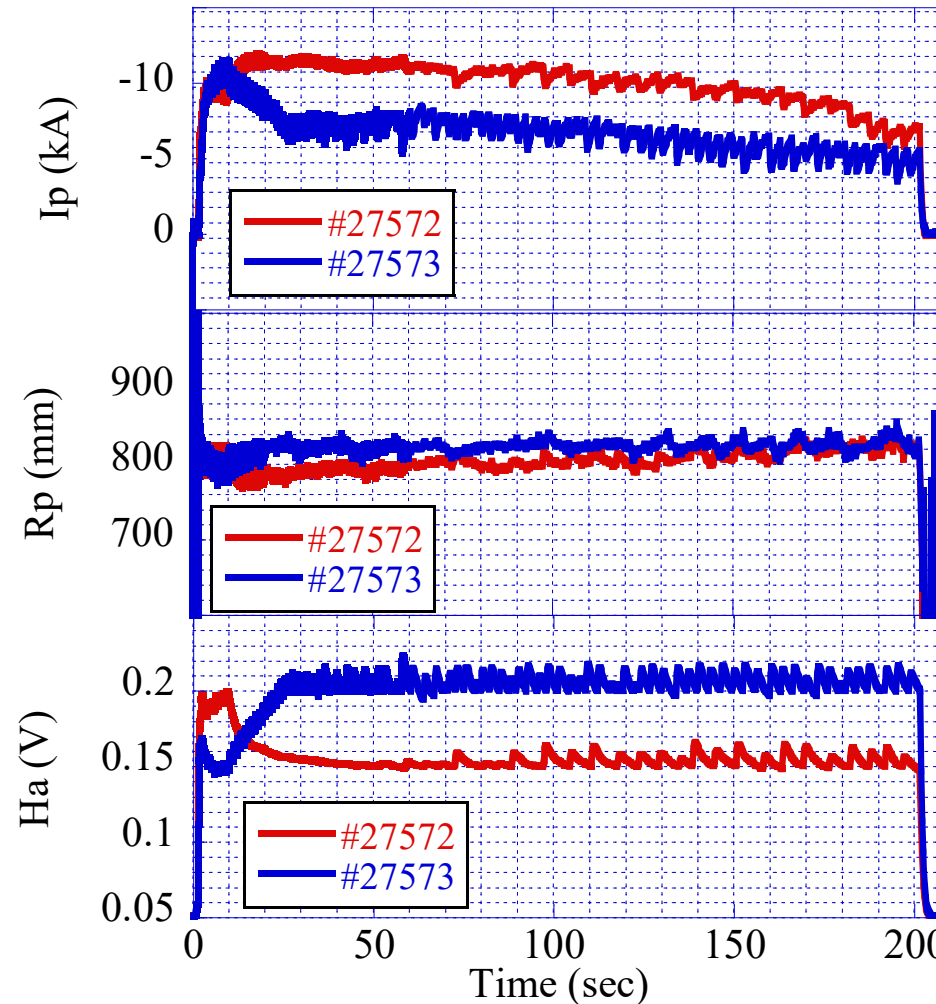


ホール素子によるプラズマ位置及び電流の算出例

ホール素子から求めた位置・電流と、Rogowski CoilとFlux Loopから求めたものの比較



ホール素子から求めた長時間放電時のプラズマ電流とその位置



- ホール素子から求めたプラズマ位置・電流は、Rogowski CoilとFlux Loopから求めたものと良く一致する。
- ホール素子から求めたものは、長時間放電においてドリフトエラーは見られない。

今後の予定と課題

- 真空容器大気側に設置している関係でプラズマの速い応答はモニターできていない。Flux Loop等と組み合わせる必要がある。
- CSの通電を伴うダイバータ配位やオーミック放電では、CS内に設置されているホール素子が使えない。

制御（プラズマ電流、位置、形状、密度など）

ープラズマ位置&形状のリアルタイム同定ー

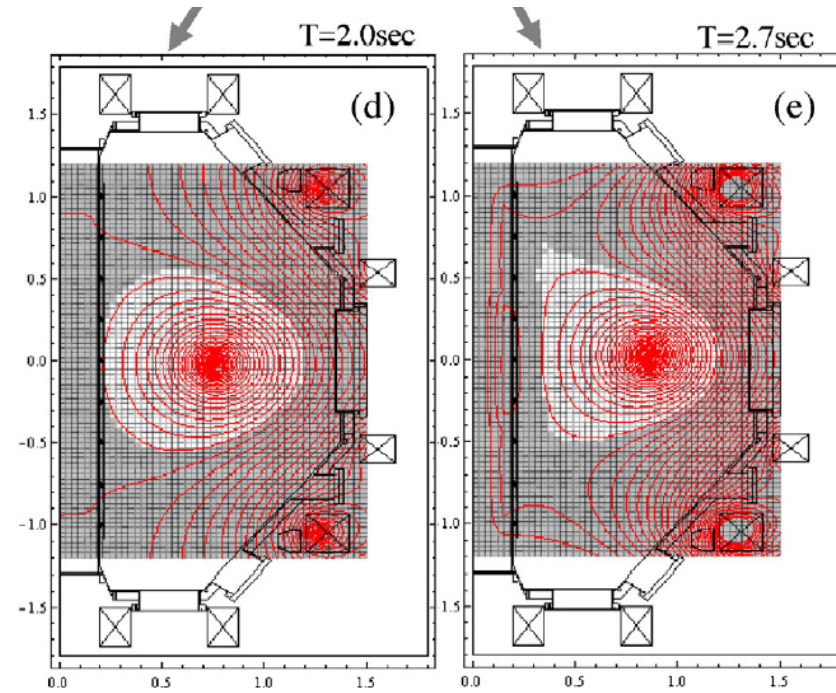
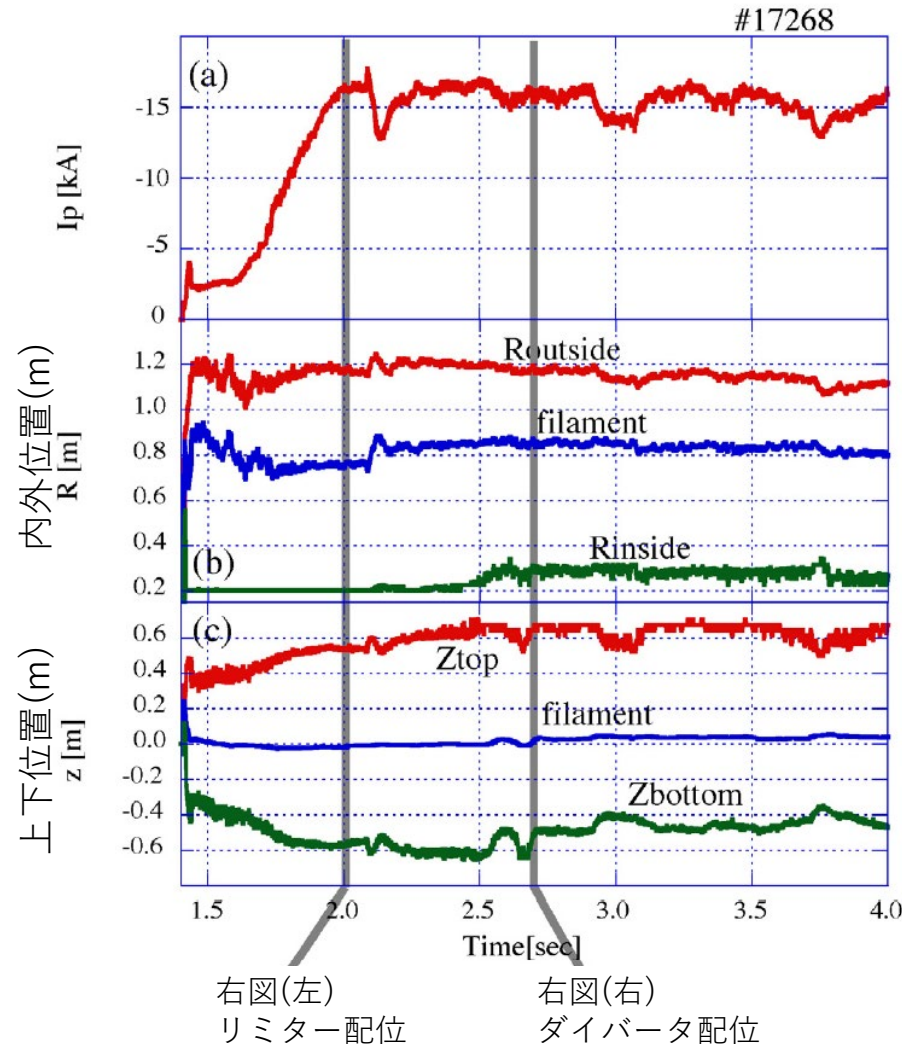


Fig. 3. Waveforms of plasma shape calculated in real time. The magnetic configuration is changed from a limiter configuration to a divertor configuration between 2.0 s and 2.6 s with pre-programmed coil currents. (a) Plasma current, (b) radii of the outside edge position, the filament position, and the inside edge position. The inside edge position increases from 0.2 m to 0.3 m according to the change of the magnetic configuration. (c) Vertical positions of the topside edge position, the filament position, and the downside edge position. Contour plots of magnetic surfaces and mesh plots of LCFS in (d) a limiter configuration of 2.0 s and (e) a divertor configuration of 2.7 s.

位置&形状の
リアルタイム同定フロー

（プラズマを一本の円環
フィラメント電流(R_0, z_0)
と仮定

計測Fluxを最も良く再
現する(R_0, z_0)を探索

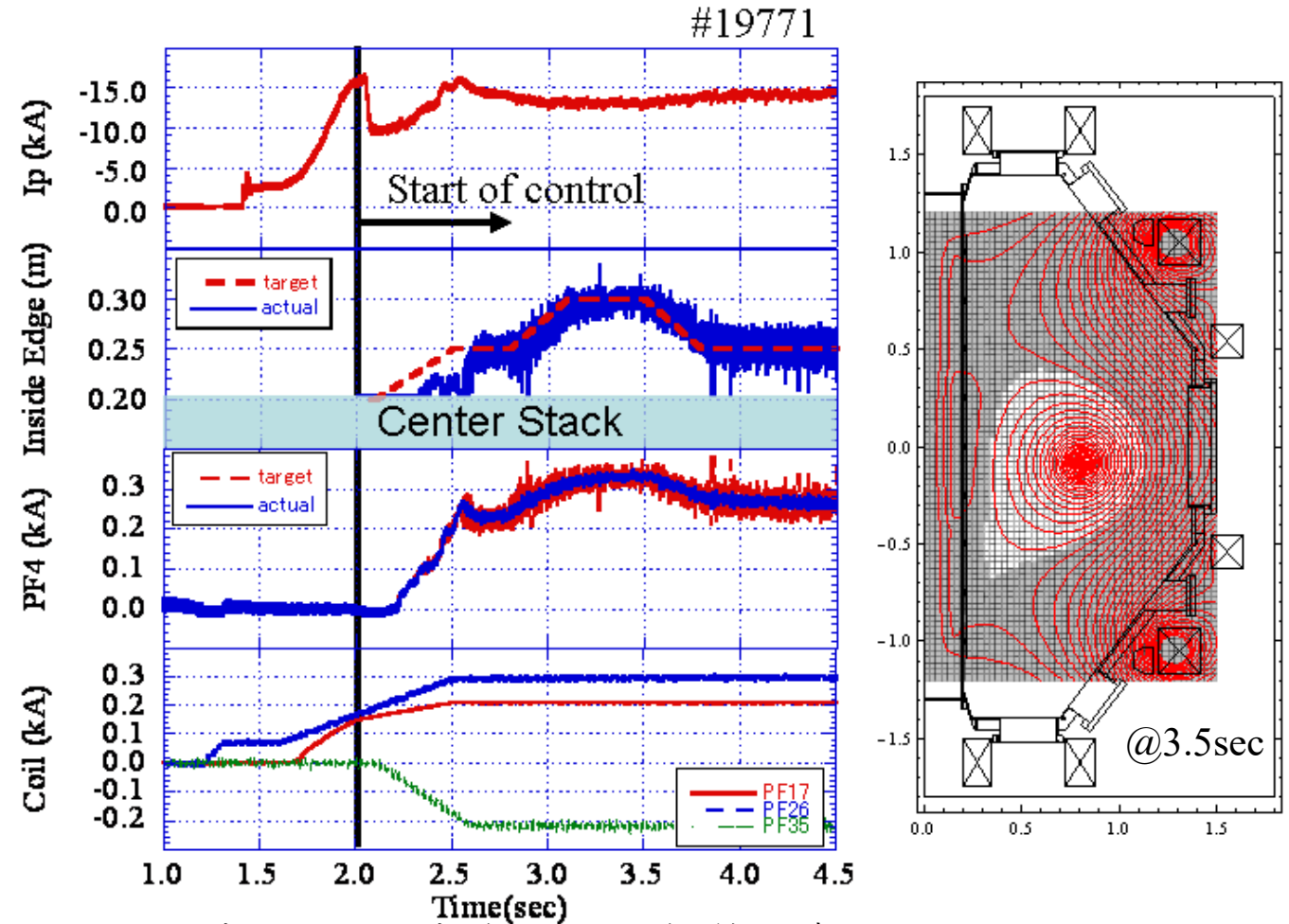
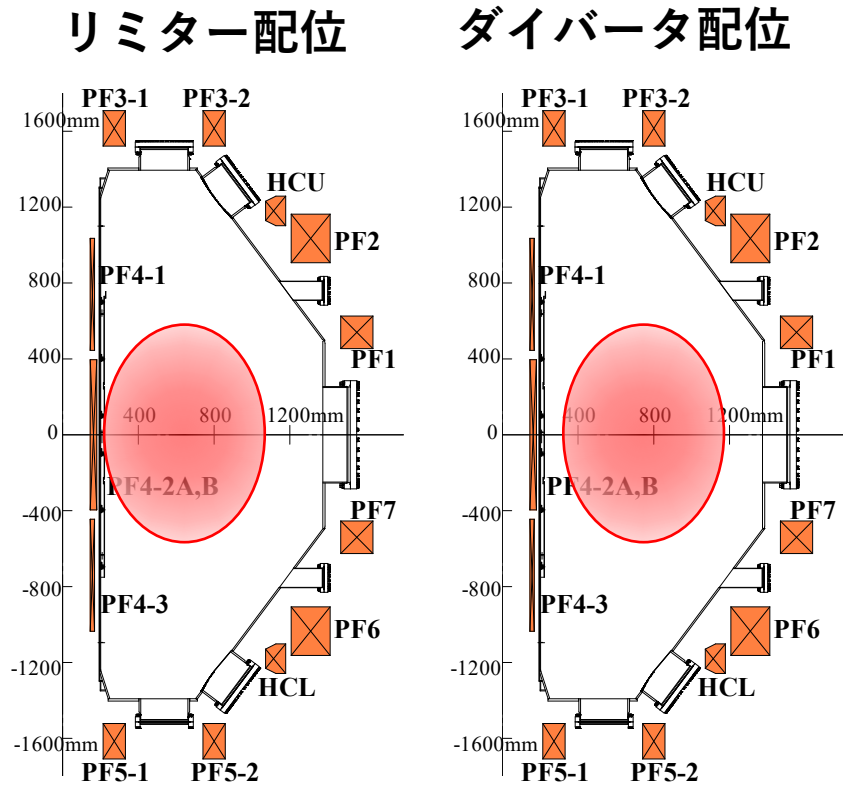
真空容器内の全Fluxを計算

最外殻磁気面を探索

位置 & 形状パラメータを算出

プラズマ形状のリアルタイム同定と、その制御の試み

プラズマの**内側エッジ**の位置を**PF4コイル**を用いて制御して、
リミター配位からダイバータ配位への移行を行い、それを維持する。



- 内側エッジ位置をリアルタイムに同定して、目標位置との偏差に応じてPF4のコイル電流値を変えるPID制御を実施。

設定温度400°Cの高温壁の昇温プロセス

- 設定温度を400°Cとした昇温は現在までに3回

1回目: Jan 21, 2020

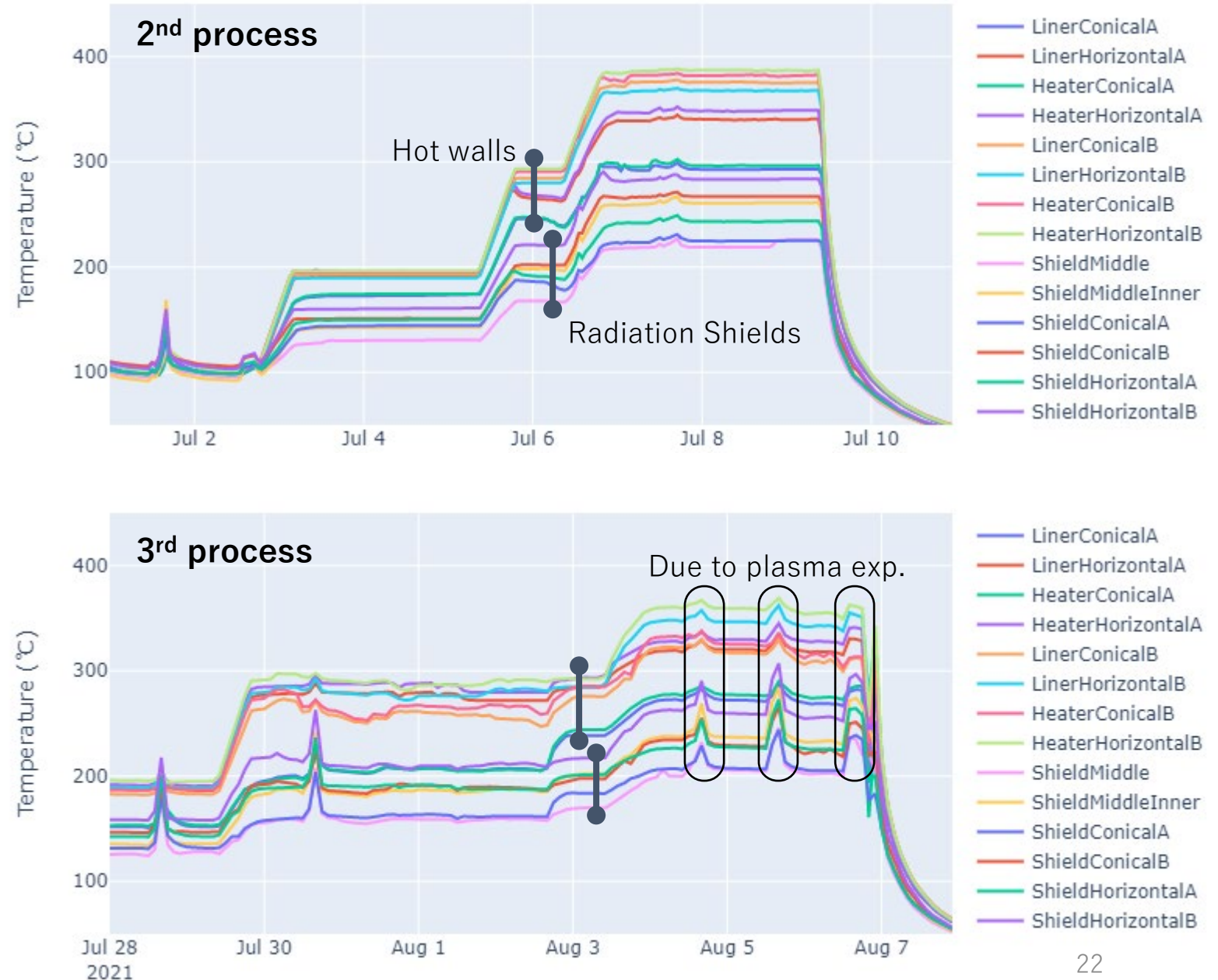
2回目: Jul 3, 2021

3回目: Jul 29, 2021

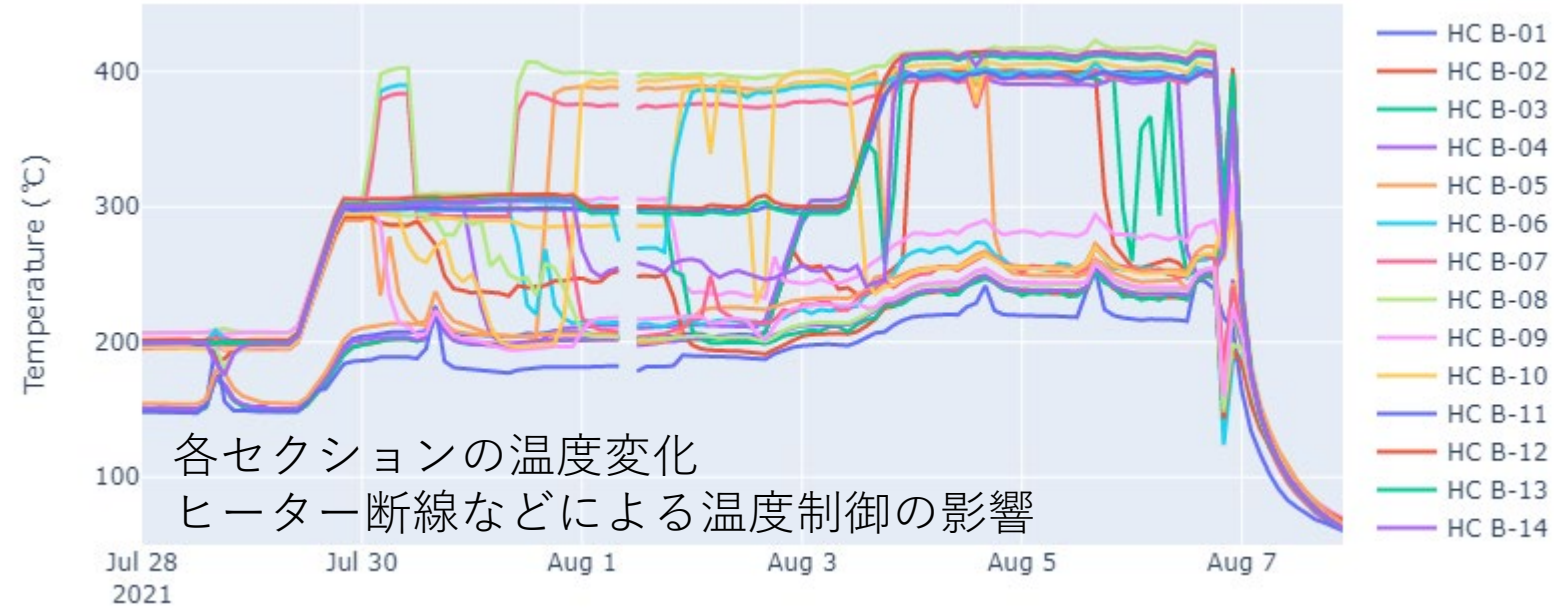
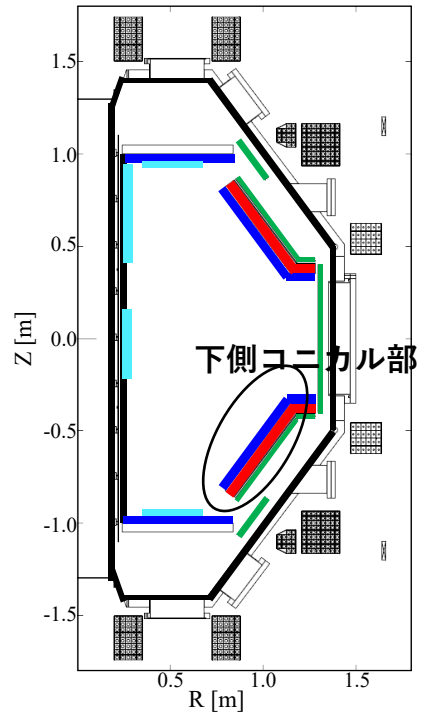
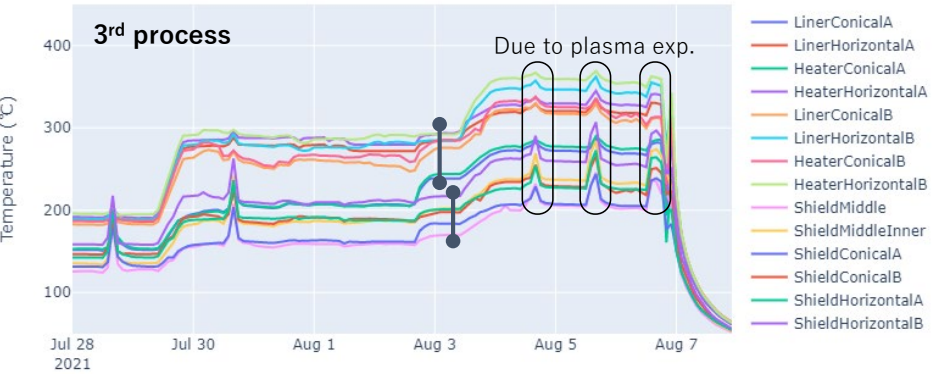
2回目: プラズマ実験なし（昇温のみ）
: ポート前面の輻射板あり

3回目: プラズマ実験あり
: ポート前面の輻射板なし

- 安全のため設定温度は朝に変更して、夕方までに昇温をするようにした。
- 一週間程度かけて400 °Cまで昇温



設定温度400℃の高温壁の昇温プロセス

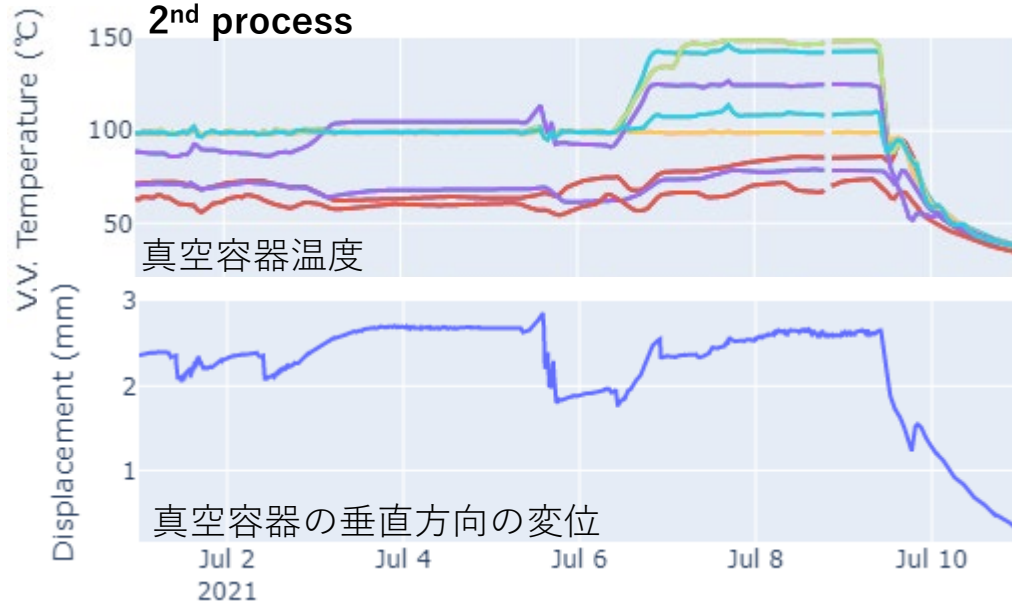


温度分布に大きなばらつき → 温度分布を一定にした状況で実験を行う必要。

設定温度400 °C としたときの安全上の確認事項

真空容器の熱膨張による歪み

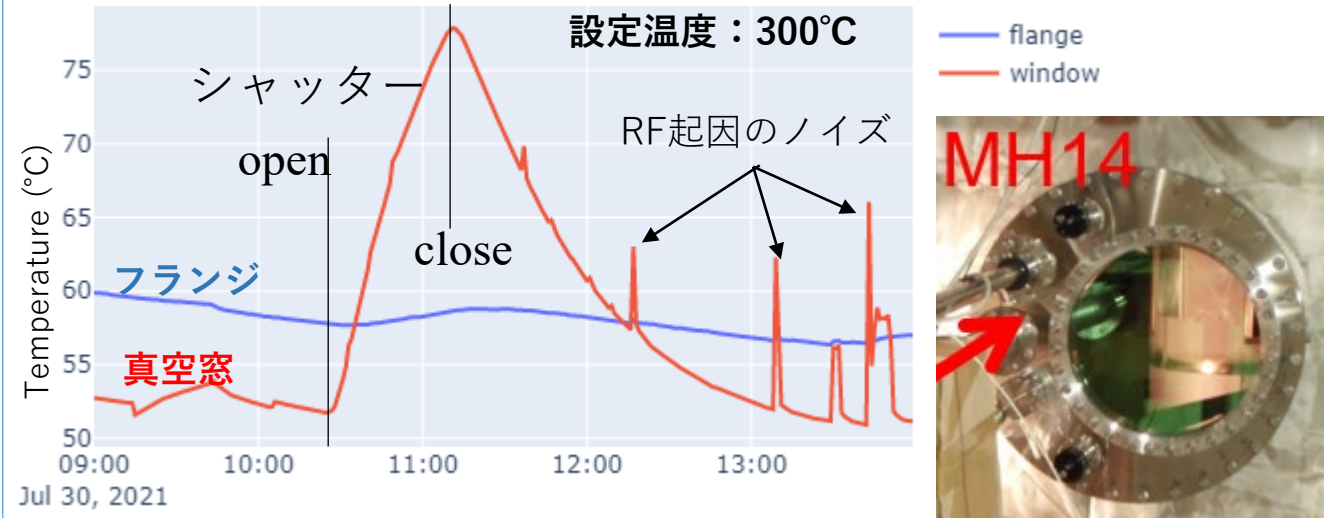
- 容器の高さ方向の伸びをレーザー変位計で測定
- 高温壁が400°Cの設定であっても、真空容器の温度は100°Cになるように制御されている。



真空容器温度は凡そ100°Cに維持され、縦伸びの変位は2mm程度に抑えられており、これは、おおむね予想に一致。

真空窓とフランジ間の温度勾配によるひずみ

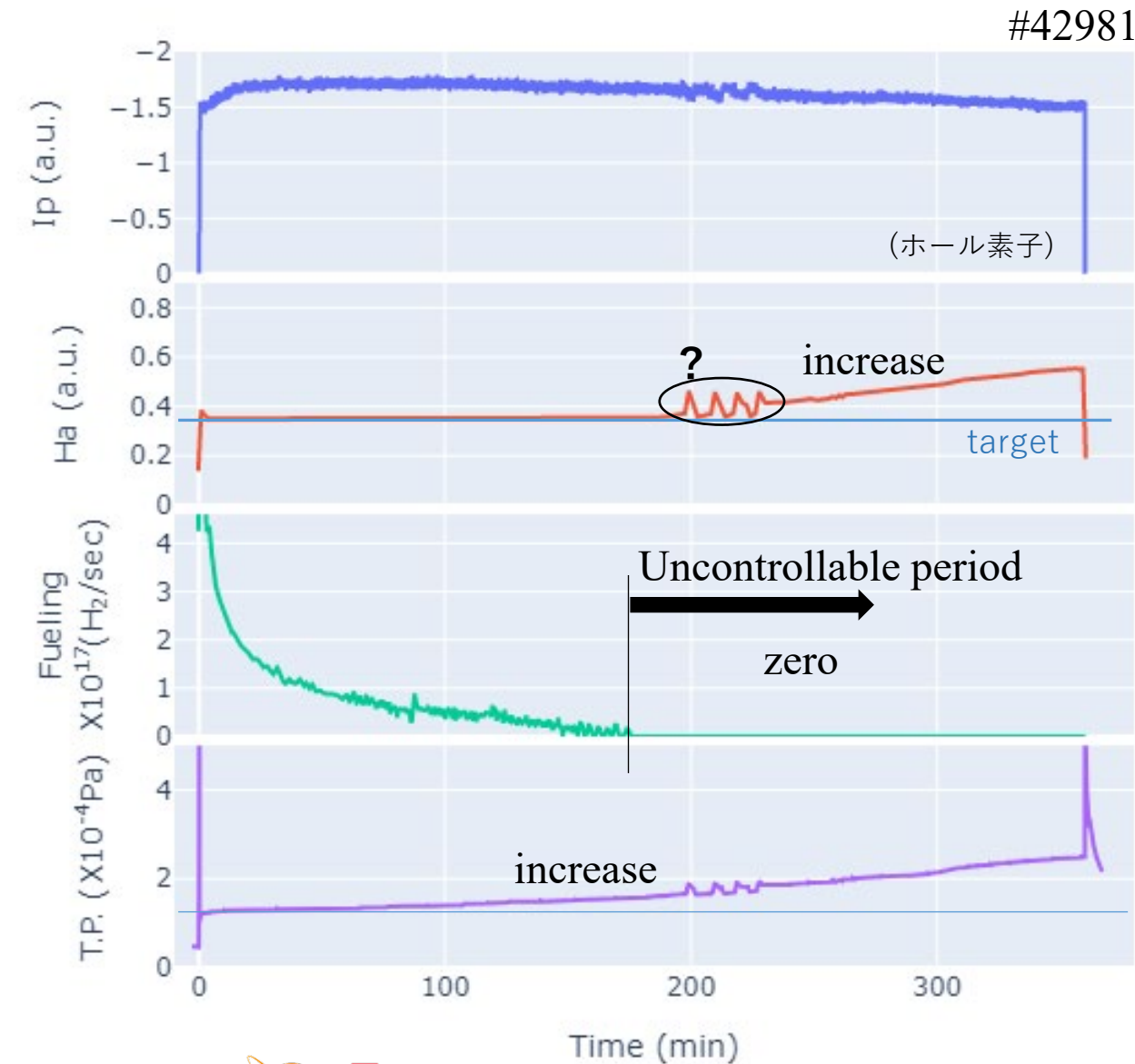
- 真空容器内からの輻射熱が真空窓をあたため、フランジとの間で熱ひずみが生じることが予想される。
- 真空窓中央とフランジの温度を白金抵抗Pt100で計測。



真空容器内の輻射シールドのシャッターをオープンしたところ約4 5分で2 0°Cの温度差が発生。

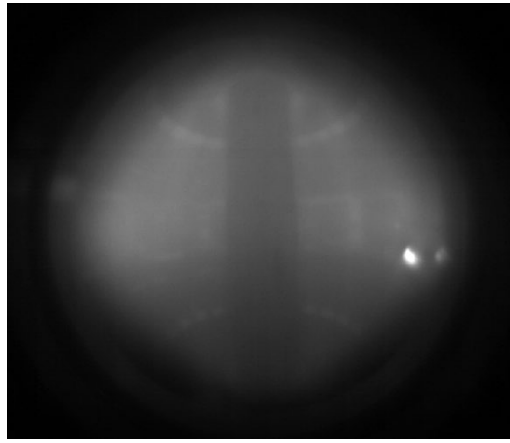
高温実験ではシャッターをリモートで開閉できるようにしたり、窓を冷却するなどの工夫が必要になる。

粒子供給feed-back制御を行った長時間放電波形 (200°C)

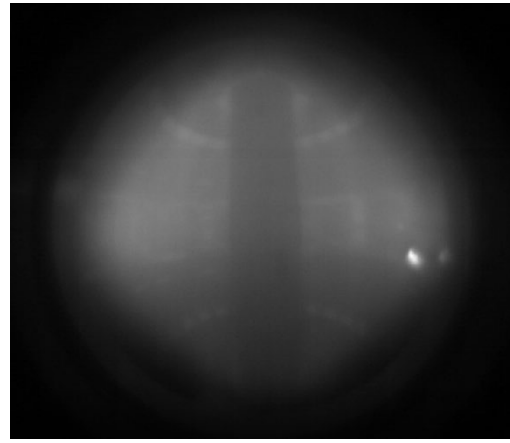


- 粒子供給のフィードバック制御により、放電初期は $H\alpha$ 光強度は一定に保たれる。
- 粒子供給がゼロになり制御できなくなると $H\alpha$ 光強度は徐々に増加する。
- 真空度は放電時間全体に渡り微増を続ける。

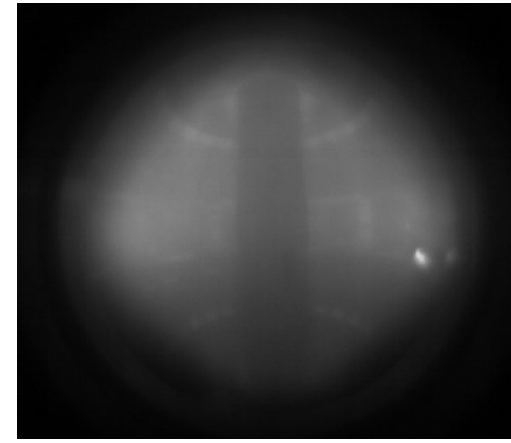
長時間放電時のプラズマカメライメージ



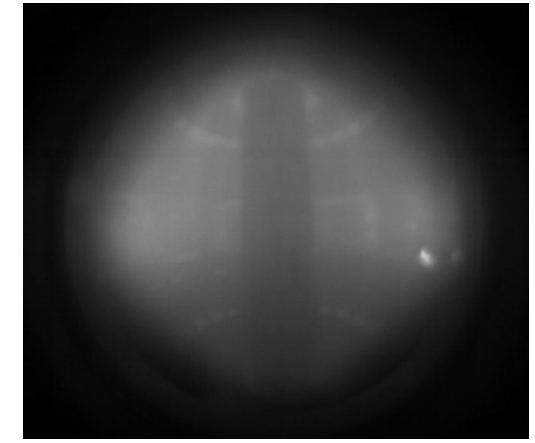
0 hour



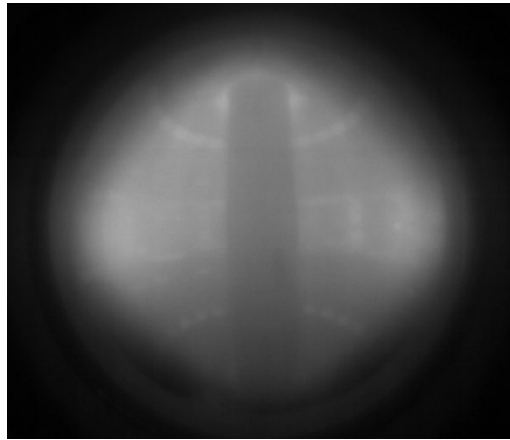
60 min



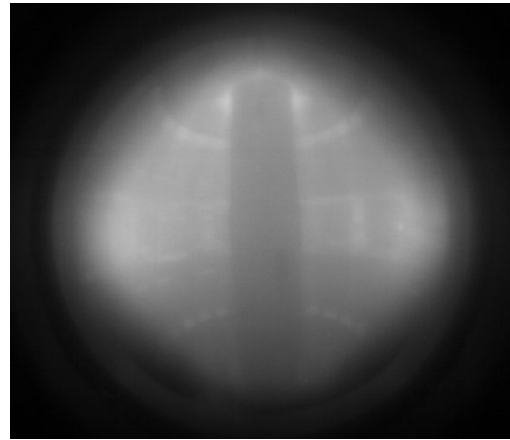
120 min



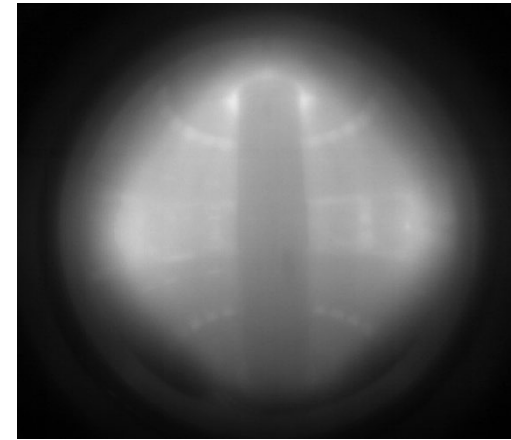
180 min



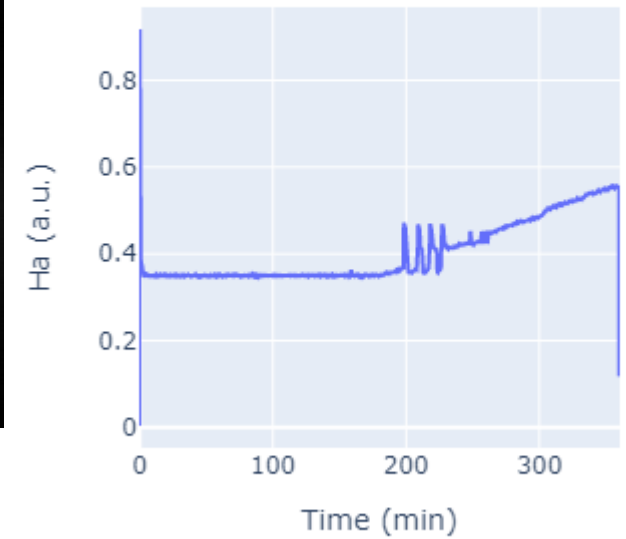
240 min



300 min



360 min

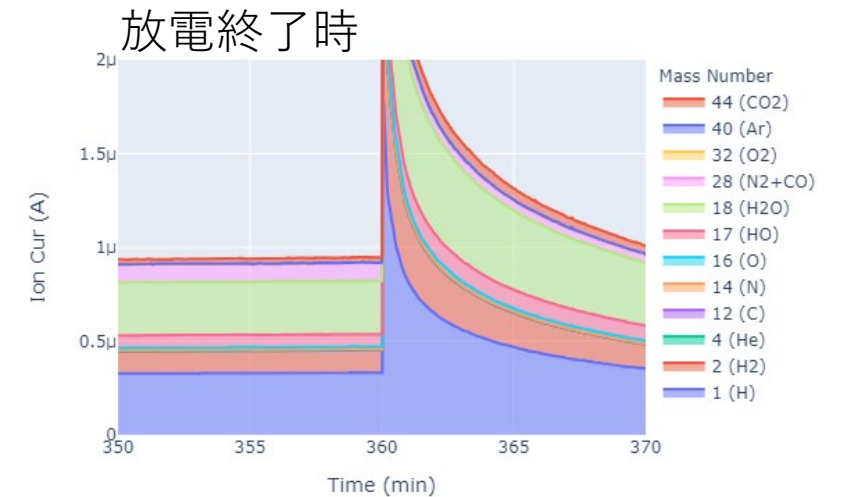
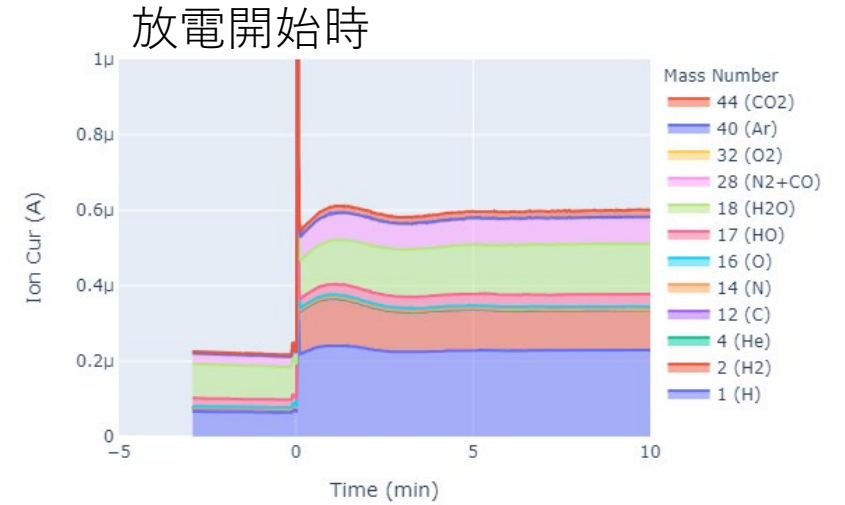
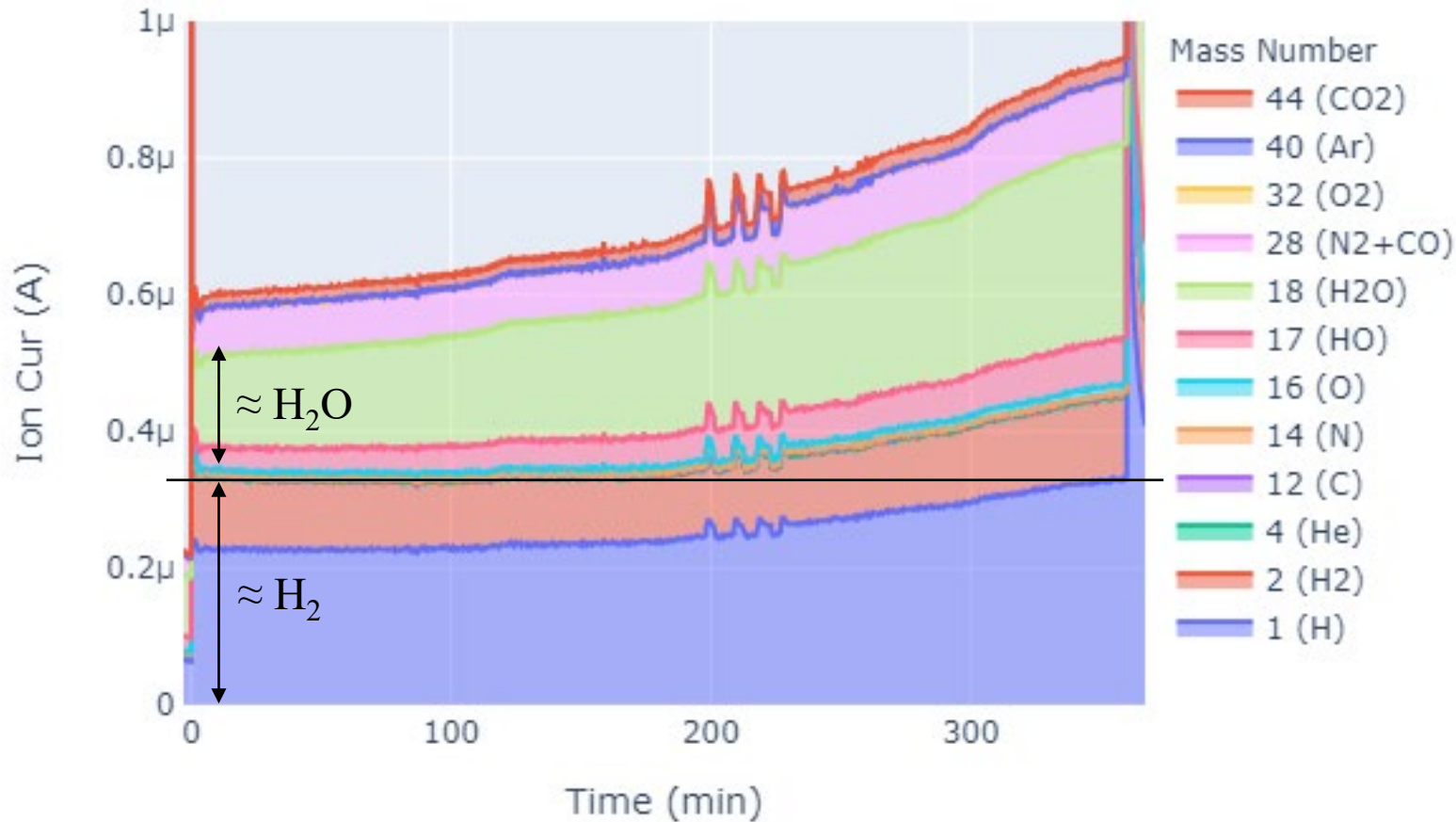


放電時間全体に渡りリミター配位を維持

Ha発光強度と同じ傾向で、放電時間後半で徐々に明るくなる。

長時間放電時のガス種の時間変化（質量分析器）

Stacked line chart of mass spectrometer

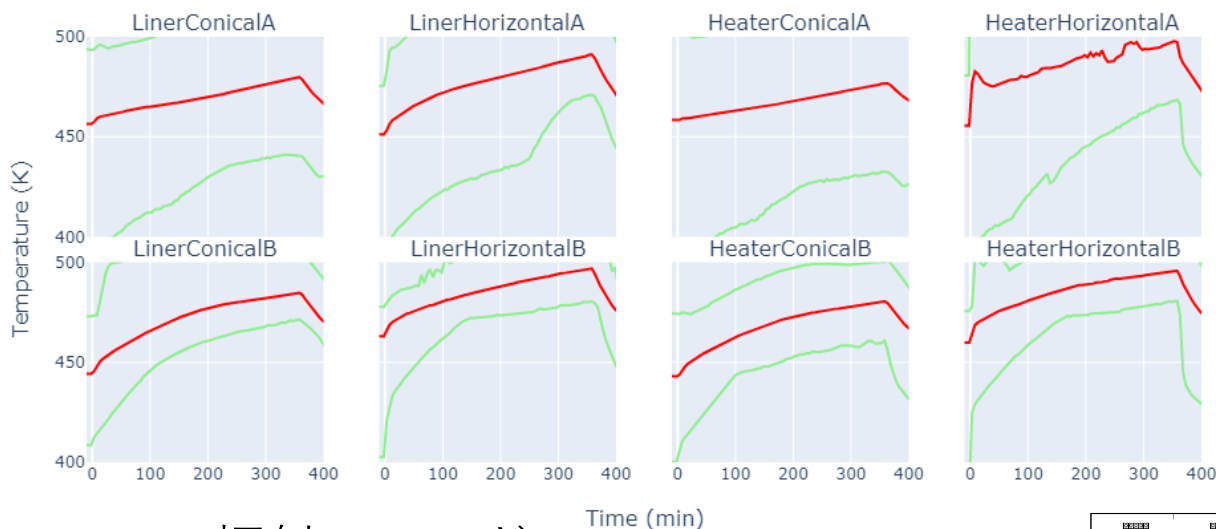


- H_2 由来の成分は $\text{H}\alpha$ 光信号と同様に、200分後から上昇。
- H_2O 由来の成分は真空度の波形と同様、放電開始から微増を続ける。

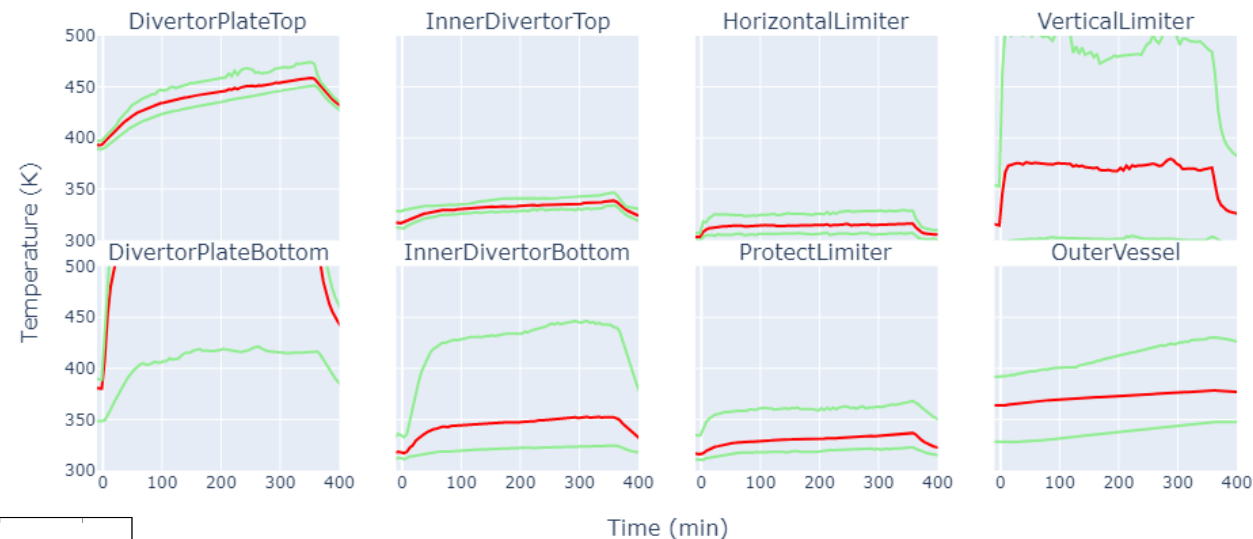
長時間放電時における各箇所の温度変化

高温壁

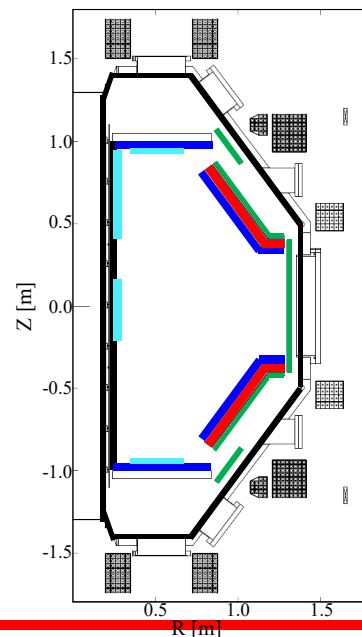
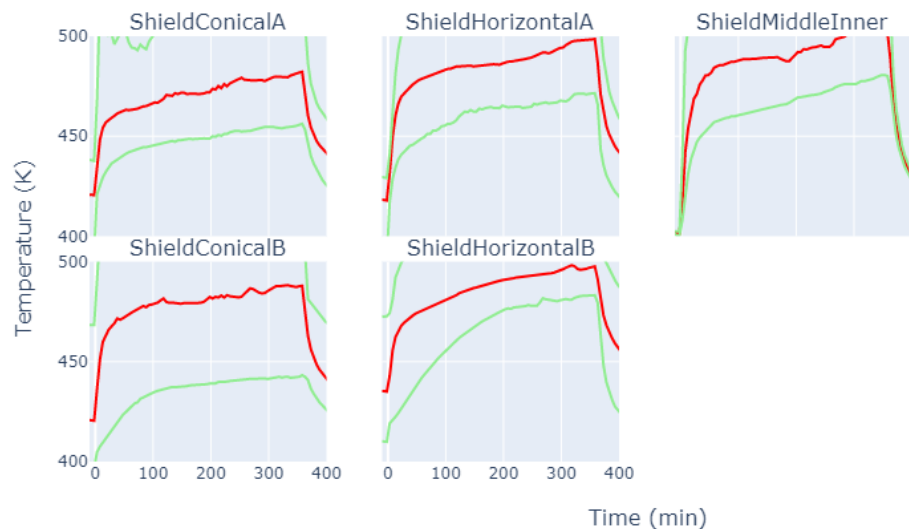
— Average
— min or max of each part



CS, 真空容器, ダイバータ板



輻射シールド



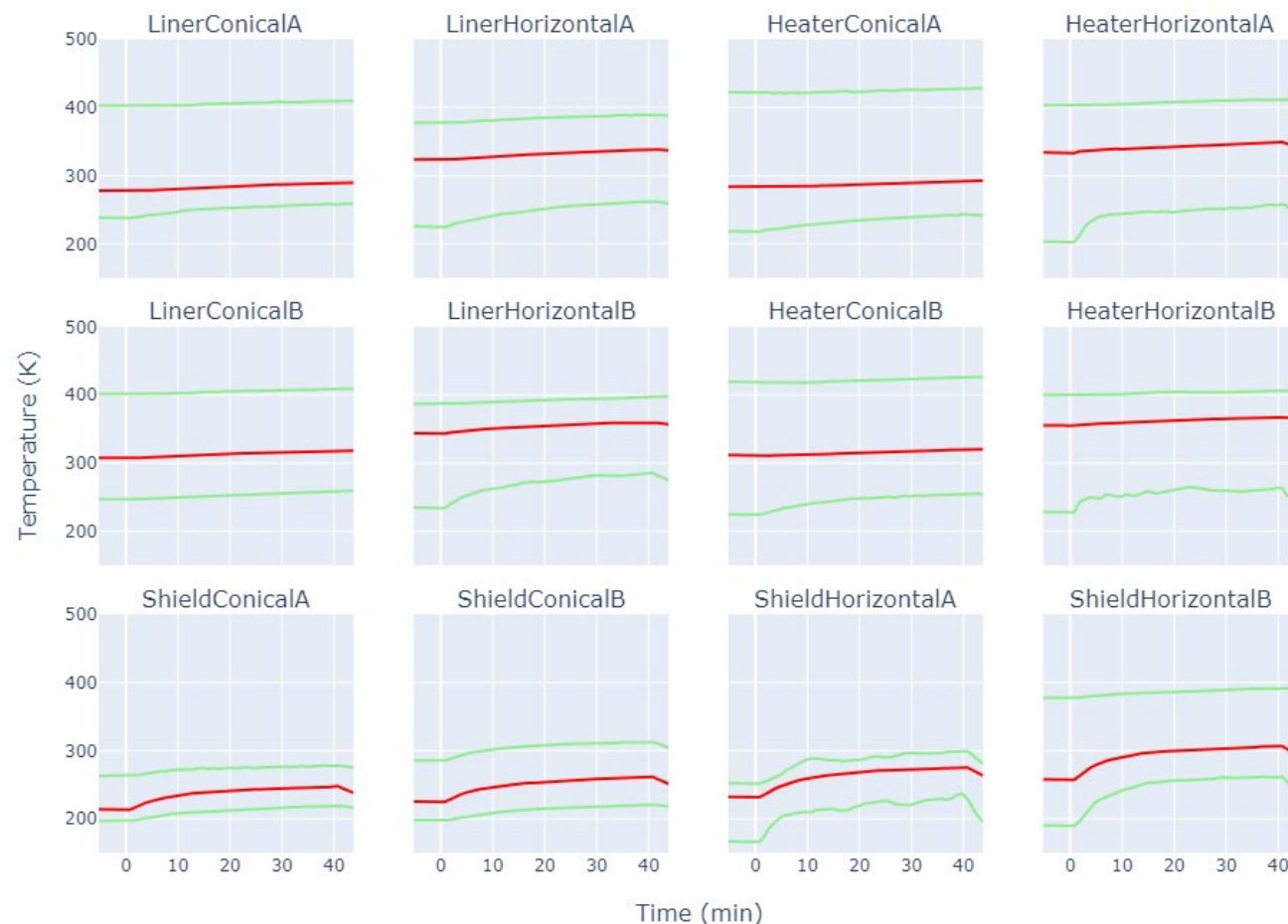
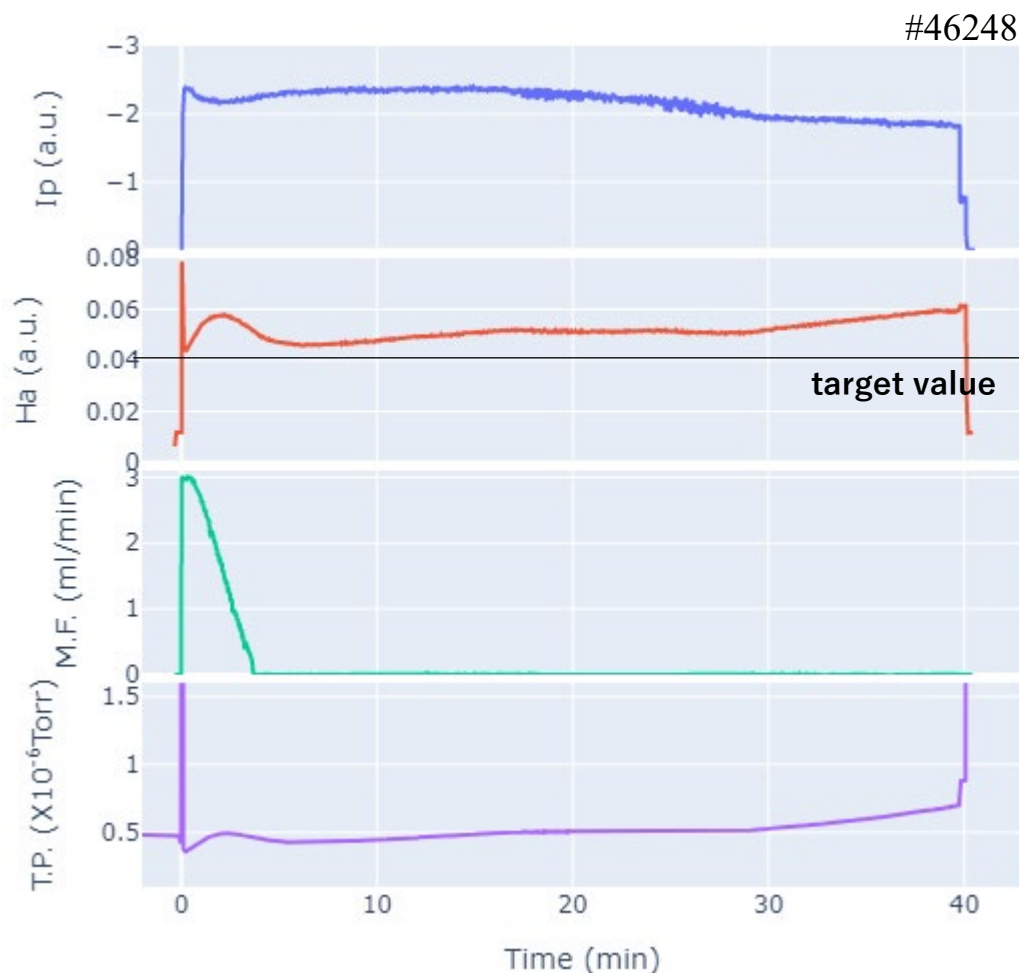
ポロイダル断面

Hot wall

CS, 真空容器,
ダイバータ板
輻射シールド

- プラズマ放電に伴い各箇所の温度が上昇
- 熱容量の小さい輻射シールドは放電初期に高く温度上昇

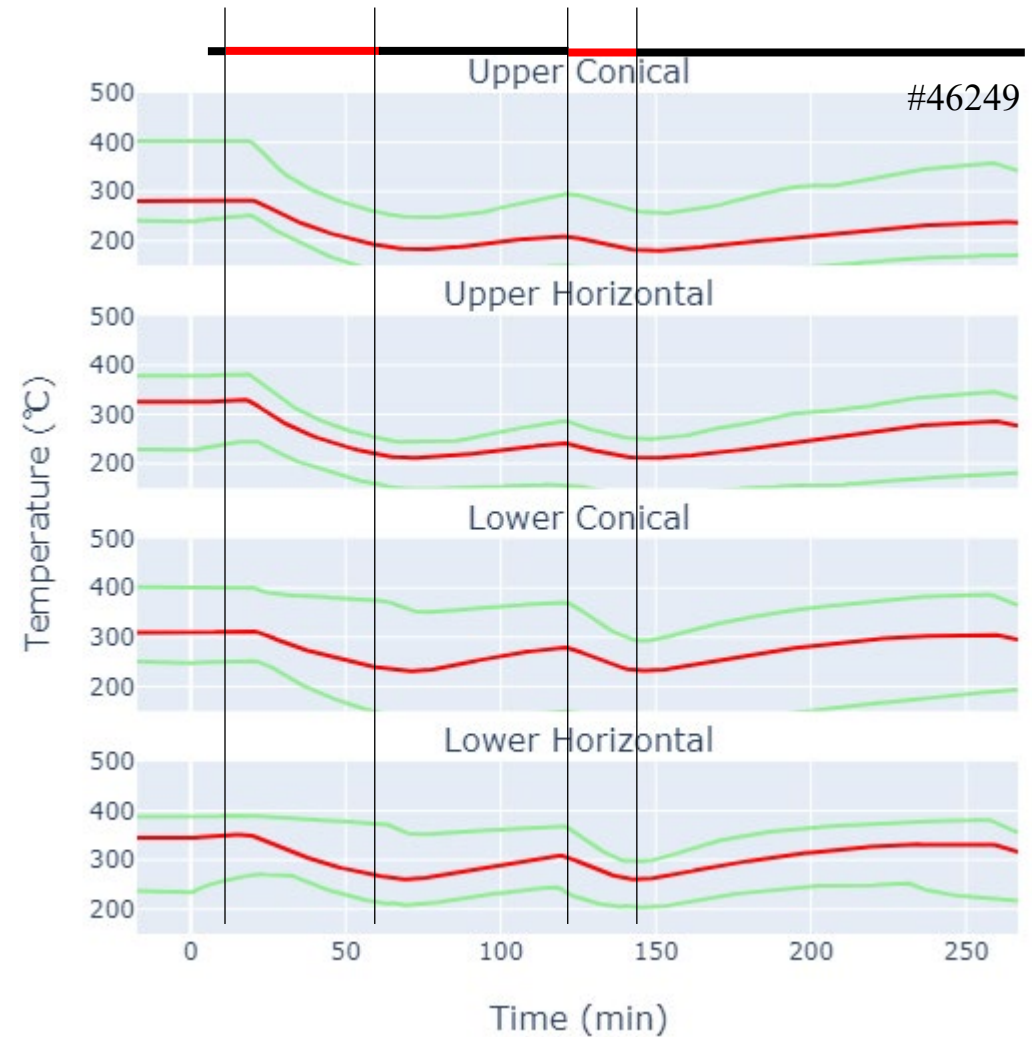
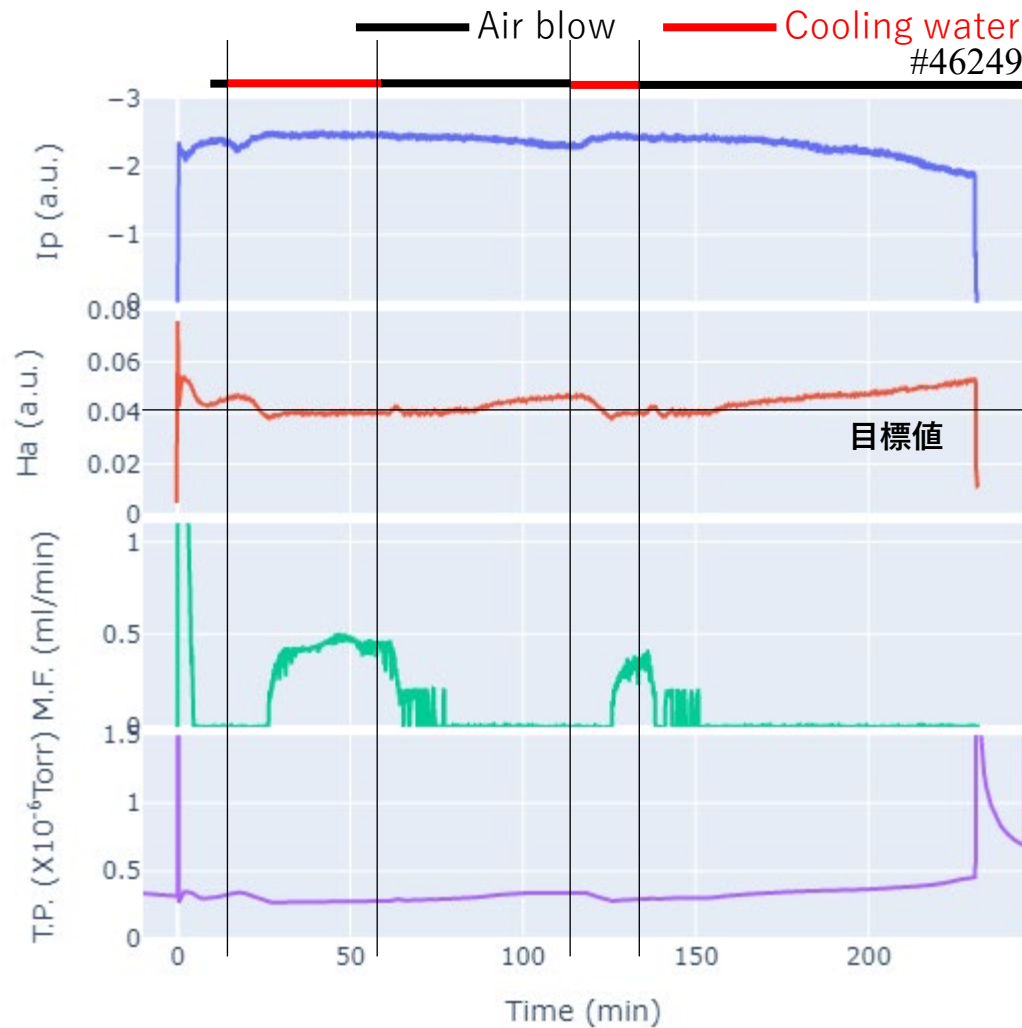
設定温度400°Cにおける長時間放電（高温壁の冷却水なし）



粒子供給がゼロになっても、 $H\alpha$ 信号が下がらず上がり始めた。

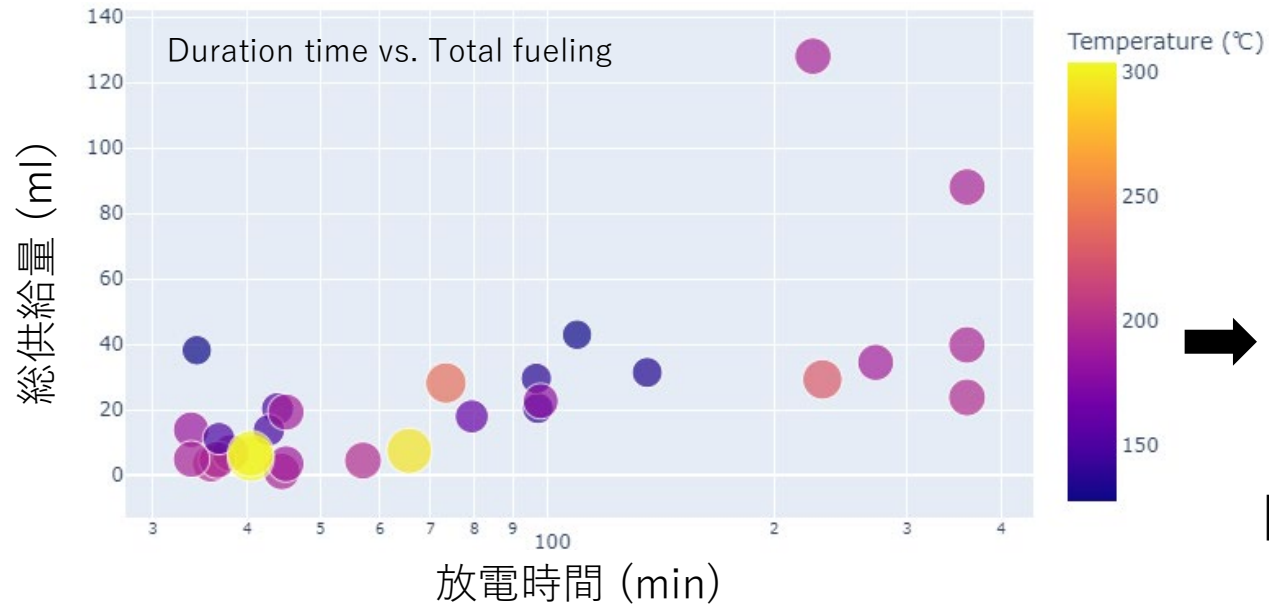
トータルの粒子供給量は200°Cの場合と比較して、かなり少ない (6.6ml @ 400 °C << 40ml @ 200 °C)

設定温度400°Cにおける長時間放電（高温壁の冷却水あり）



高温壁への冷却水通水により、 $H\alpha$ 信号強度が下がり、粒子供給が再開された。
設定温度400°Cであっても、高温壁の温度制御は粒子制御の制御ノブとして有効。

粒子供給量の温度依存性

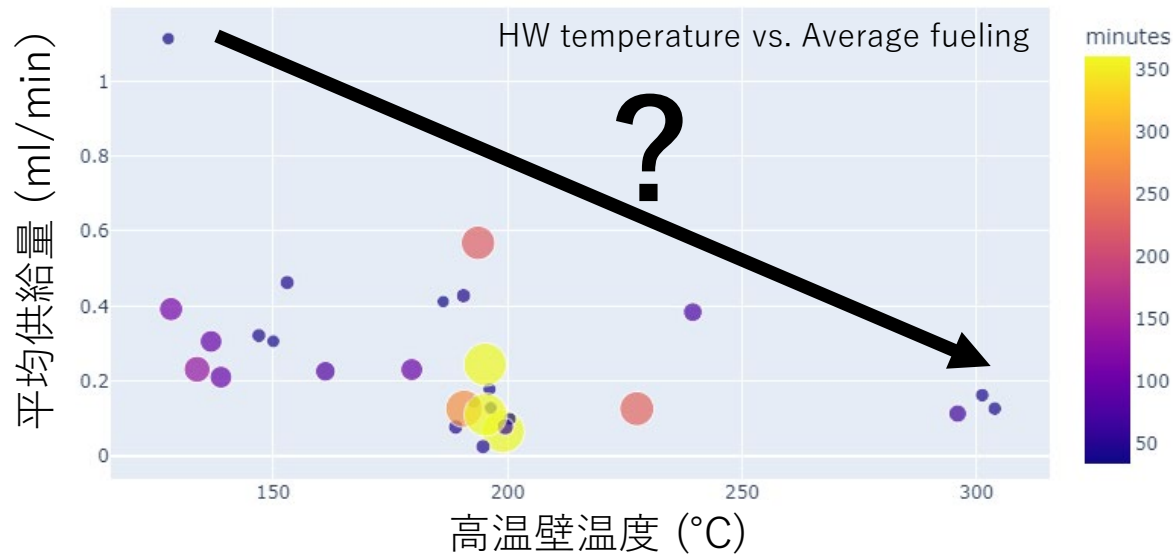


データ抽出条件

- ガスフィードバック有効
- 温度は時間と空間の平均
- 放電時間30分以上
- TFC：有、加熱パワー：有

→ 放電時間が長くなると、粒子の総供給量も増える？

$$[\text{平均供給量}] = [\text{総供給量}] / [\text{放電時間}]$$



高温壁の温度が高くなると

- 平均供給量が下がる？
- 放電ごとのバラツキが少なくなる？
(放電の再現性が上る?)

→ より多くのデータによる検証の必要性

まとめ：

- QUESTの長時間放電における計測と制御を紹介
- 200°Cの設定温度で、6時間を超える長時間放電を達成した。
- 高温壁400°Cであっても、高温壁の温度制御が粒子バランスの制御に有効だった。
- 今後より詳細な定量的評価を行う必要。