

# 高温壁を用いたQUEST定常実験の現状

## 1. 非誘導電流駆動

2.45GHz (wall conditioning)

8.2GHz(CW operation) **現在8本中1本可動(25kW)**

8.56GHz (aging)

28GHz(2s以下) 筑波大学との連携(出射氏報告)

## 2. 壁温度能動制御と粒子循環

制御: 高温壁(250度運転、常時200度)

観測: 入射束、排気束、中性粒子圧力

## 3. 共同研究

水素吸蔵特性

壁への水素束計測

水素リサイクリング計測

統合制御

# 平成28年度個別研究課題

研究課題	研究代表者	センター世話人
QUESTにおける高温壁下の粒子循環制御と高電力非誘導電流駆動	花田和明	花田和明
28GHz大電力・定常ジャイロトロンシステムを用いた電子サイクロトロン高密度プラズマ加熱連携研究	出射浩	出射浩
高速カメラを主体とした周辺乱流計測と乱流物理の解明-ST装置QUESTでの乱流計測- 先進的トムソン散乱計測システムの開発	西野信博 江尻晶	花田和明 永島芳彦
炉内材料による水素同位体の保持に対するプラズマ曝露の影響	松山政夫	花田和明
透過膜法によるQUEST第一壁への粒子束測定	廣岡慶彦	花田和明
QUESTにおけるダイバータ部中性分子圧・原子束の同時測定による中性粒子挙動の解明	小林政弘	花田和明
バルク電子の高速捕集に対するプラズマからの電子補給の時間応答に関する研究：バイアス電極開発	永島芳彦	永島芳彦
QUESTの長時間プラズマにおける磁気計測及びプラズマ制御研究	武智学	中村一男
QUESTにおけるCHIを用いたソレノイドなしのプラズマ電流立ち上げ	Roger Raman	花田和明
QUESTにおけるCHIを利用したプラズマ合体燃料供給法の制御実験	御手洗修	中村一男
照射損傷タングステンの水素吸蔵と水素リサイクリング特性に関する研究	坂本瑞樹	渡辺英雄
双方向プレゼンス投影と制御室視野を考慮した高い臨場感をもつ遠隔実験参加システムの研究	中西秀哉	長谷川真
QUESTにおけるダイバータプラズマ断面の再構成高精度化と実時間表示	中村一男	中村一男
QUESTにおけるCT入射による高密度STプラズマ生成の最適化	福本直之	花田和明
QUEST高温壁中の水素同位体リサイクリングと表面損傷・堆積挙動の相関	大矢恭久	花田和明
QUESTにおける不純物イオン動的挙動の空間分解分光診断	四竈泰一	花田和明
プラズマ制御の分散システムを高性能化する高速データ共有の開発と実装	長谷川真	長谷川真
QUESTにおける分割ダイバータ板の位相制御バイアシングによる周辺プラズマ制御法の開発	東井和夫	花田和明
QUESTの定常プラズマに曝した対向材料の表面特性変化	宮本光貴	花田和明
QUESTにおけるイオンサイクロトロン輻射の計測	稲垣滋	花田和明
QUESTプラズマに曝露されたプラズマ溶射W膜中の水素同位体挙動	波多野雄治	花田和明
分光法を用いたMach probeの流速校正と高速カメラによる2次元流速分布計測	関子秀樹	永島芳彦
Quest用NBIの開発の検討	田中政信	花田和明

# 壁温度能動制御と粒子循環 (赤字は2016年度予定課題)

## 1. 定常運転の統合制御

ホール素子によるプラズマ電流・磁場の定常計測  
統合制御に向けた制御ネットワークの構築

高温壁制御への適応確認(流量制御による1000秒放電)

壁温度制御による放電の長時間維持

## 2. 中性粒子循環のシステム応答関数の決定と制御

燃料注入、壁への粒子束、パワー変調 に対する応答関数の決定

応答関数を取り込んだ制御の実施(実施されず)

## 3. 壁モデリングによる高温壁運転予測

QUEST壁モデルの構築と壁の時定数の決定

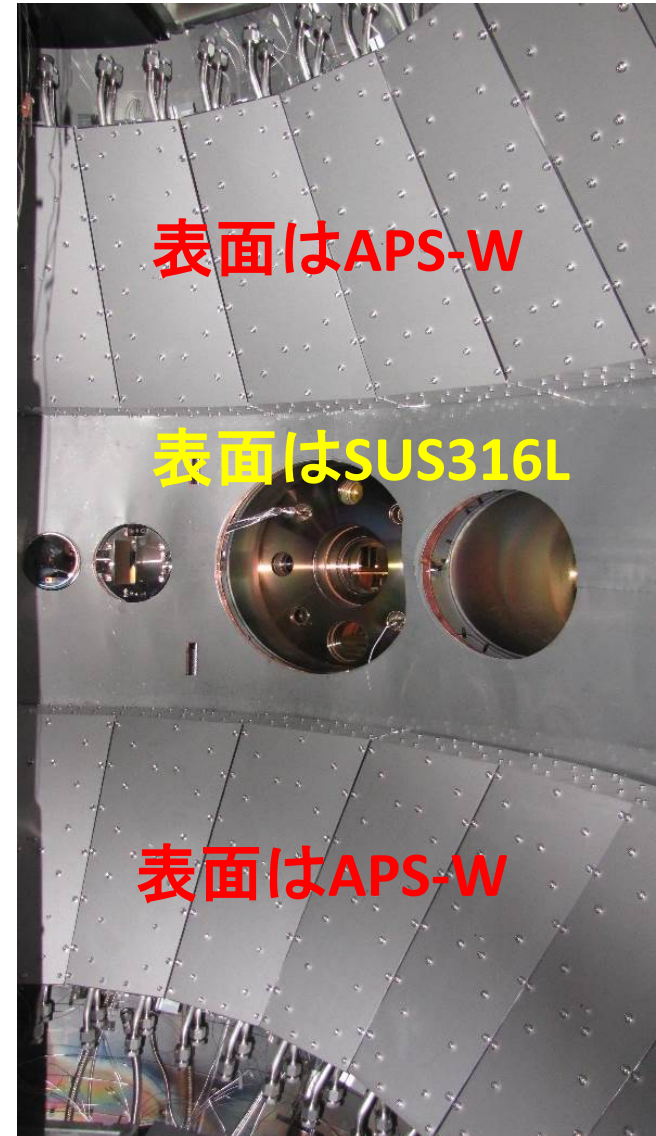
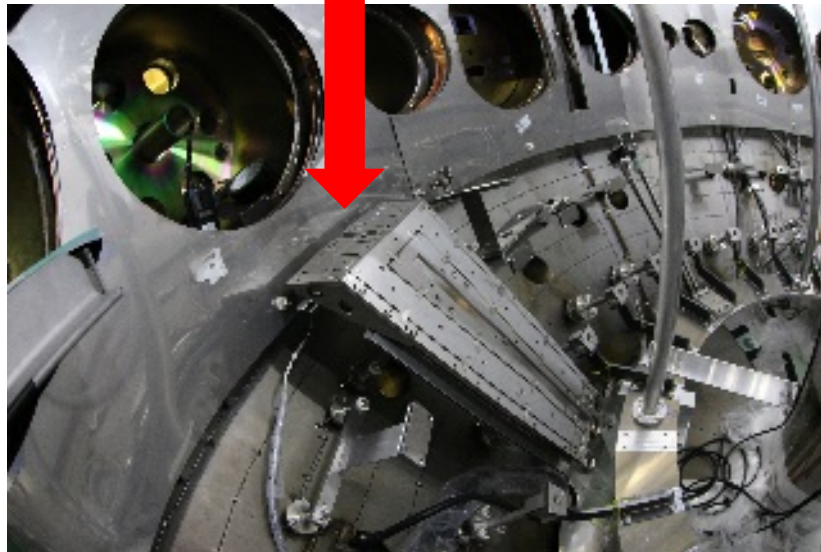
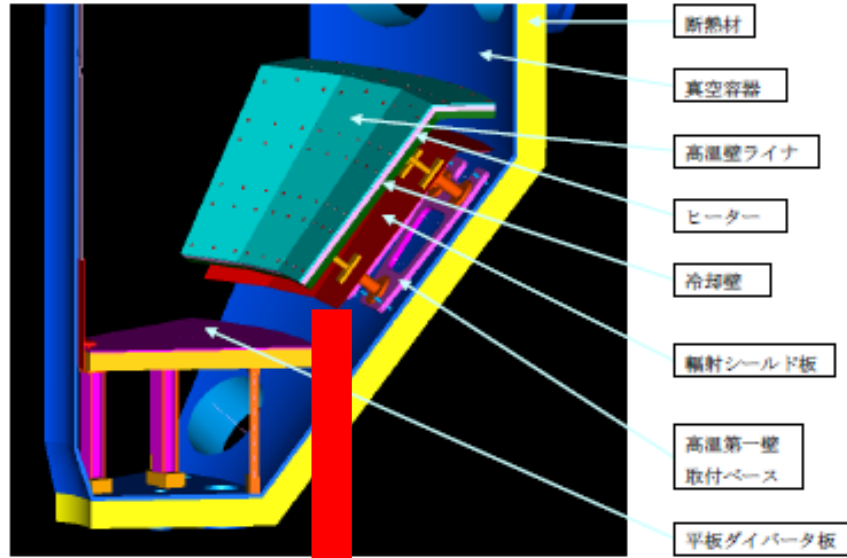
高温壁実験によるモデリングの確認

## 4. 高温壁運転によるプラズマ壁相互作用制御(次期中期計画)

冷却システムの導入と統合制御(今後実施予定)

# Present Status of the hot wall on QUEST.

## 高温壁は2014年夏にQUESTに設置



# プラズマ統合制御に向けた制御システムの開発

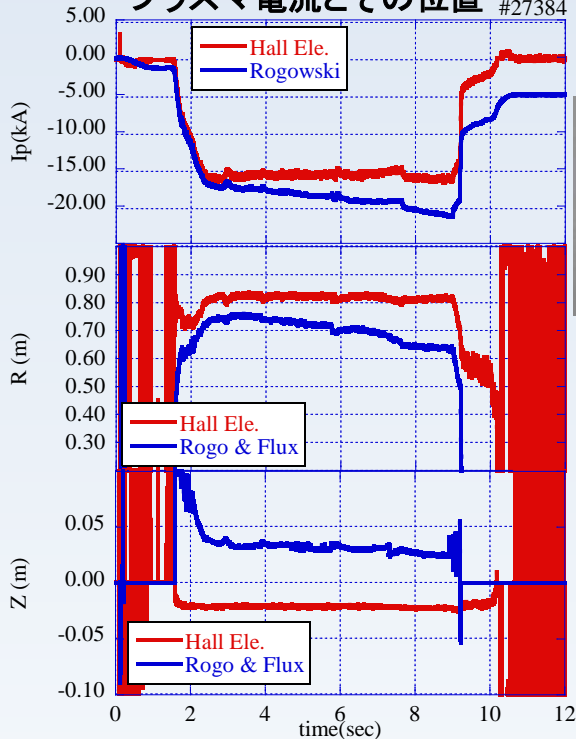
- 定常制御のための3軸ホール素子によるプラズマ同定
- Reflective Memoryを利用した分散制御システムの開発
- 定常制御のためのGigE Visionカメラを用いたプラズマ同定 など

リフレクティブメモリモジュール



データ転送: 170Mbytes/sec

## ホール素子信号から同定したプラズマ電流とその位置



ホール素子センサーのプロトタイプ



ホール素子

XYZ方向の磁場を計測

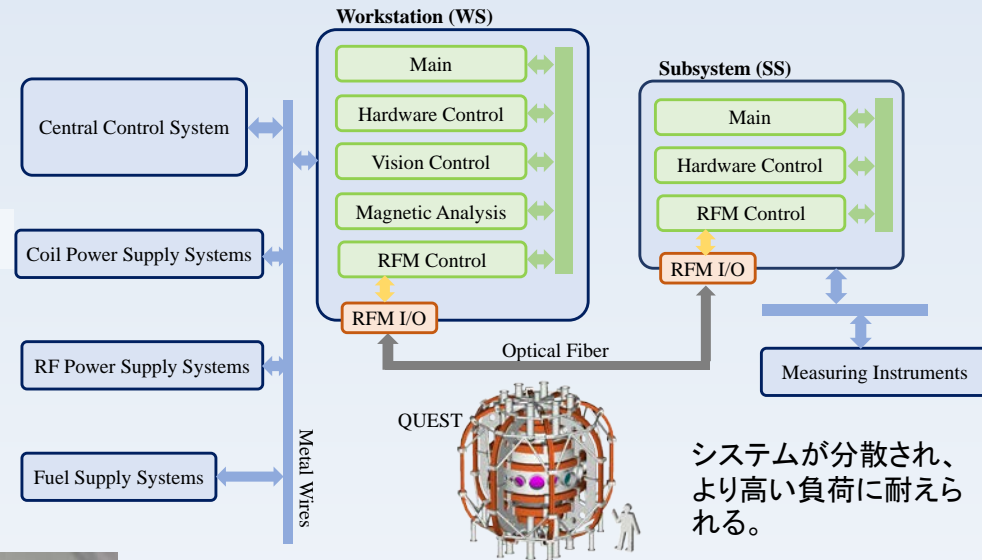
GigE Visionカメラ



赤線: ホール素子、青線: ログスキーコイルとフラックスループ。ホール素子には、ドリフトノイズが存在しない。

映像信号は通常のLANケーブルで伝送されるので、カメラと計測器を離して設置できる。

## リフレクティブメモリを用いた場合の全体構成



システムが分散され、より高い負荷に耐えられる。

## 画像からプラズマ位置・形状を同定するテスト

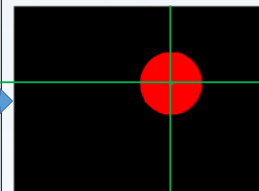
画像収集(モノクロ8bit)



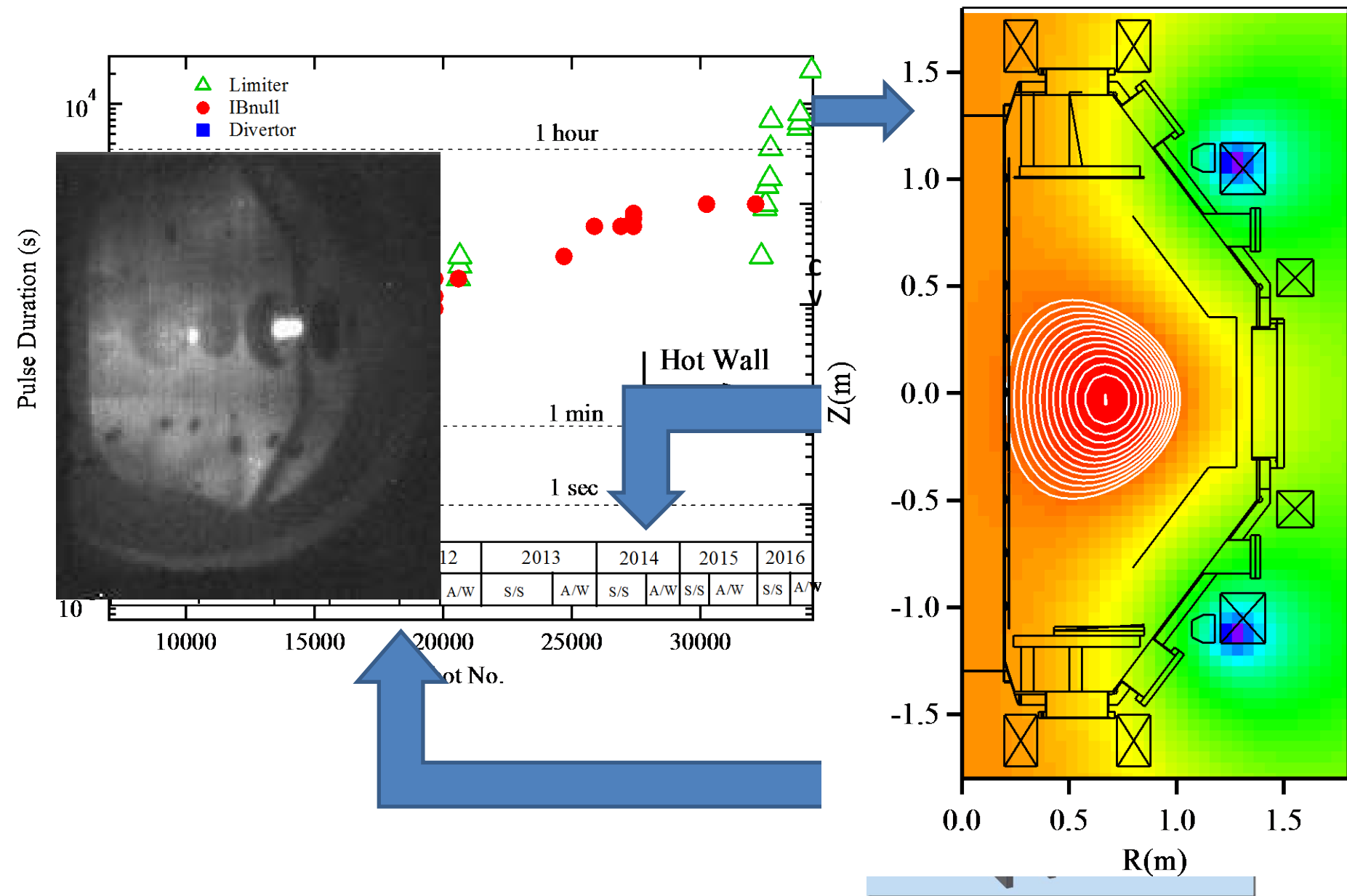
画像の2値化



明部の重心点算出



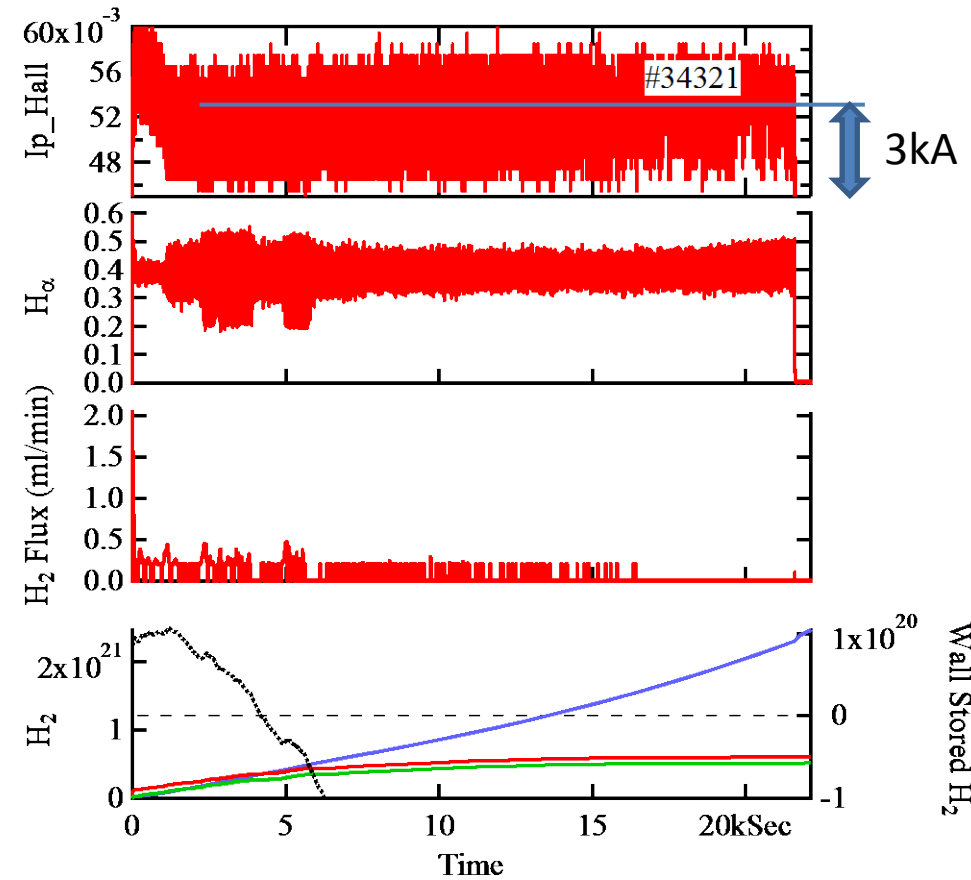
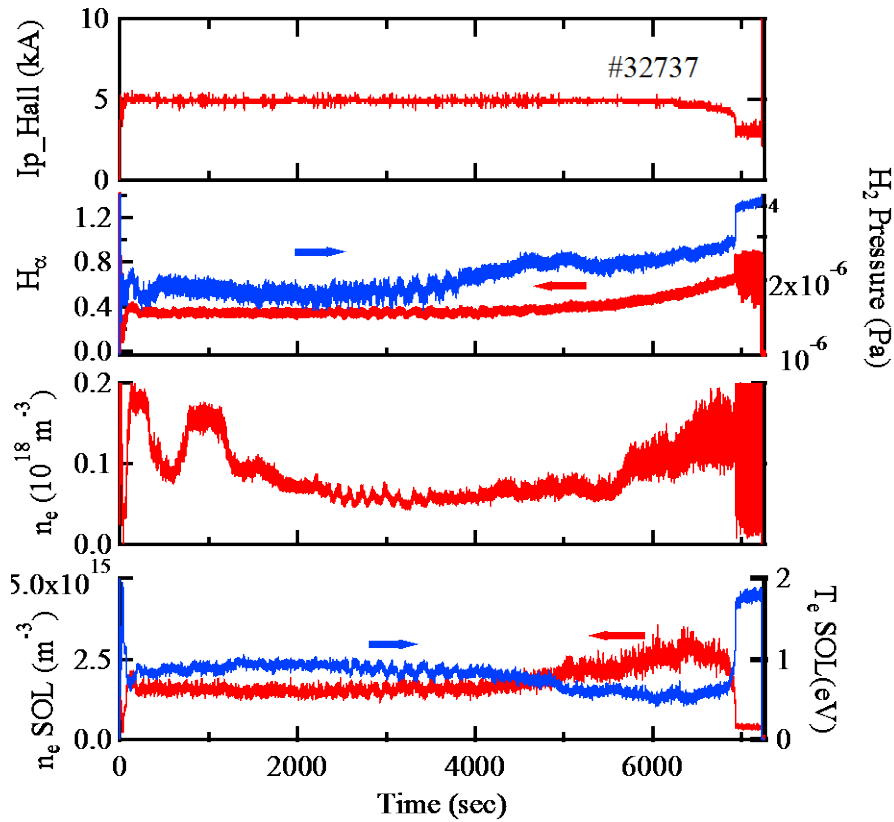
# QUESTにおける長時間プラズマ維持の進展



# QUESTの長時間運転の現状

## 1時間55分放電

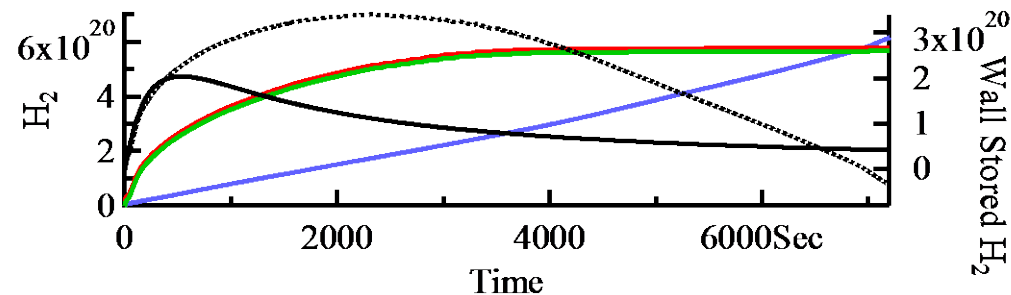
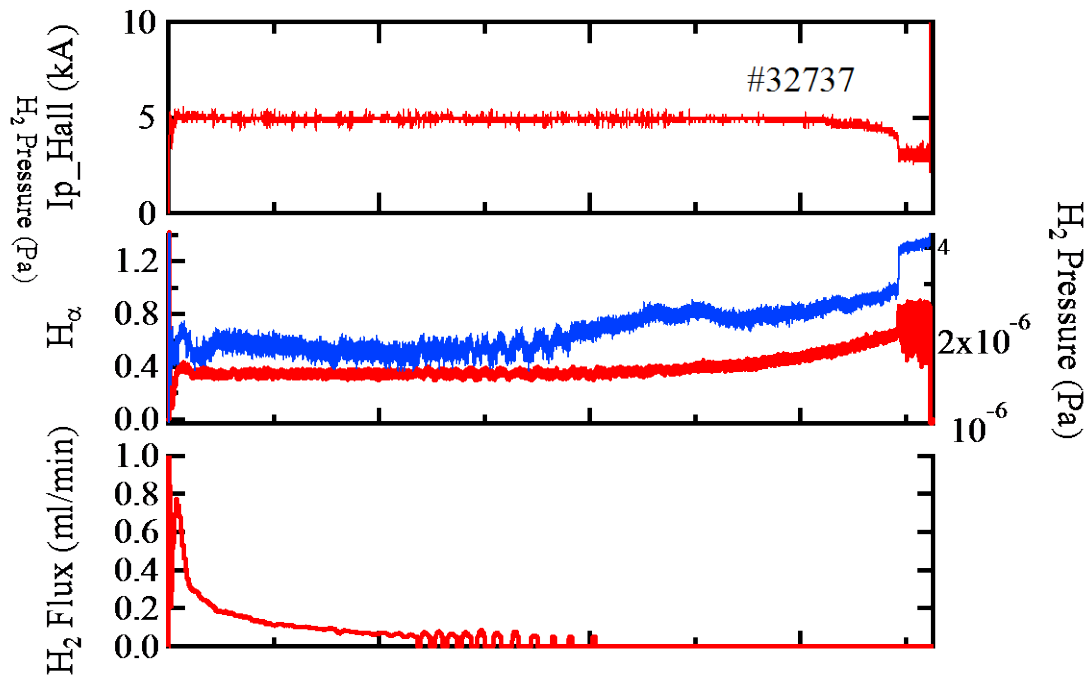
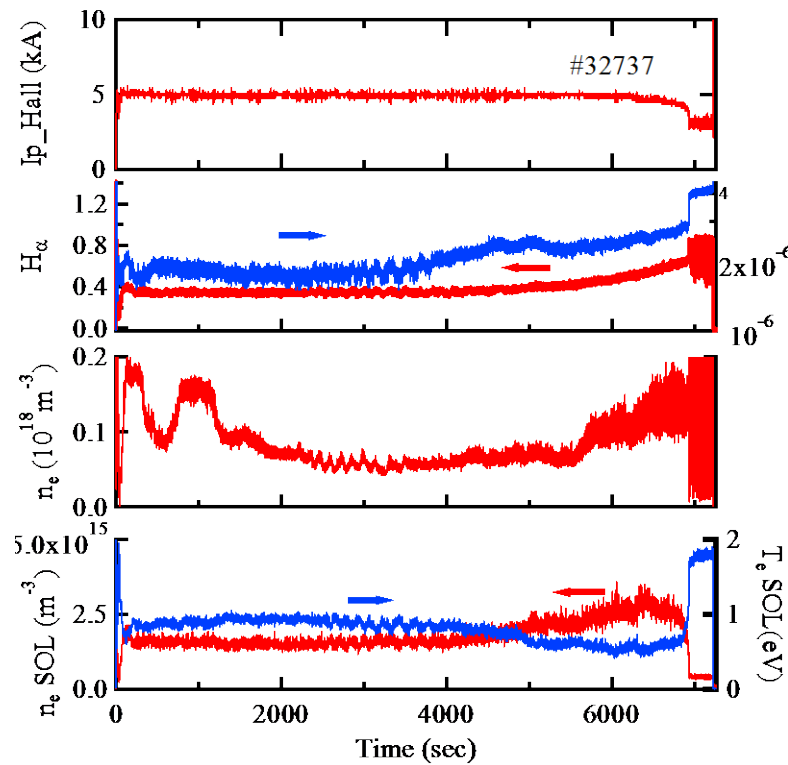
## 6時間放電



# 1時間55分放電の粒子バランスの変化

## 粒子バランスの変化は3つのPhaseに分別可能

Phase I Phase II Phase III

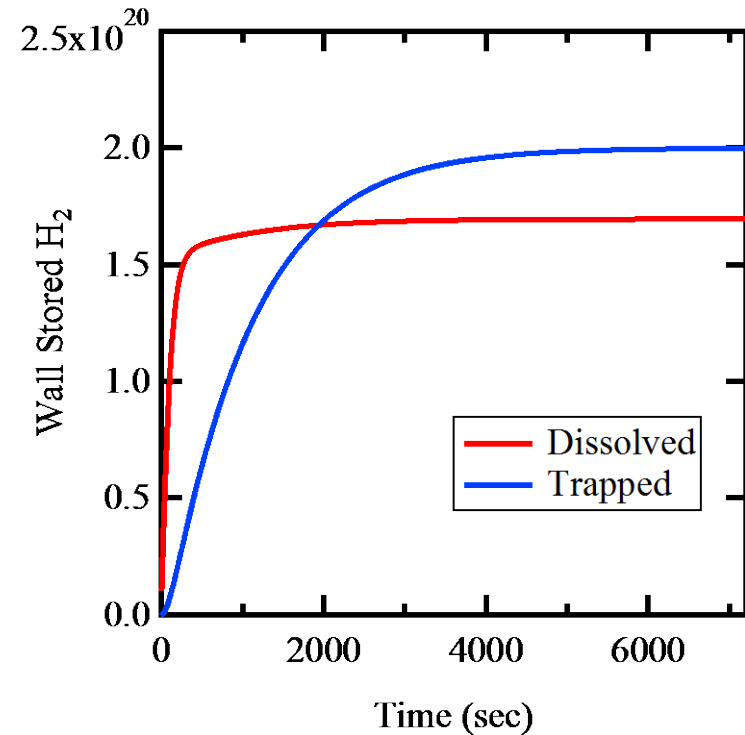
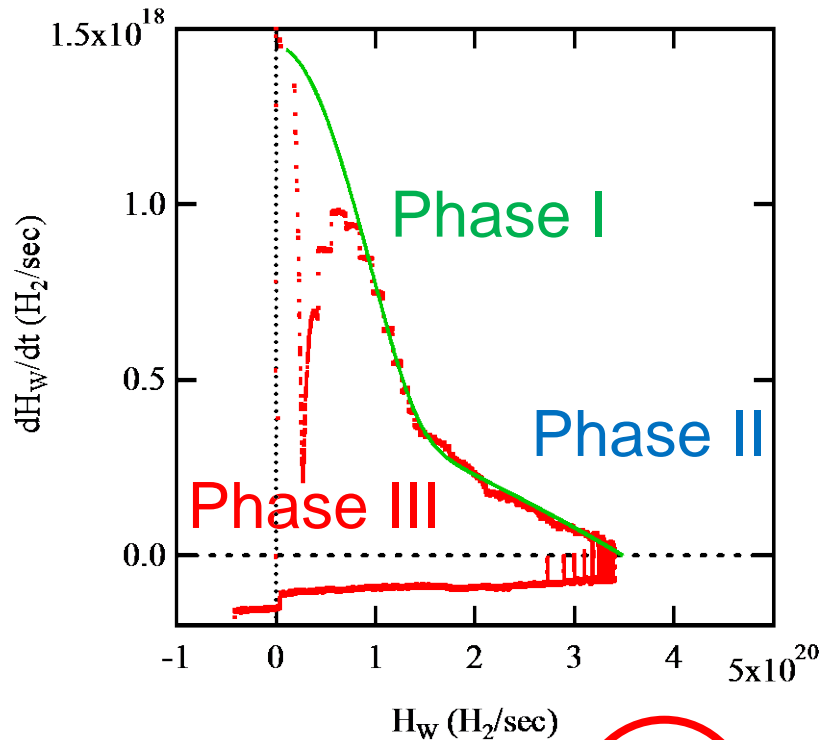


Phase I: Wall pumping dominant  
 Phase II: Wall pumping and release  
 Phase III: Wall release



# 水素バリアを仮定したモデルとトラップサイトでの捕捉を考慮したモデルでPhase I, IIはほぼ再現可能

## 欠陥による捕捉効果



$$\frac{dH_W}{dt} = \Gamma_{in} - kH_W^2 - \frac{dH_T}{dt}$$

$$\frac{dH_T}{dt} = k_T H_W \left( 1 - \frac{H_T}{H_T^0} \right) - \alpha H_T$$

欠陥に捕捉される水素は比較的長い時間をかけて一定になる。

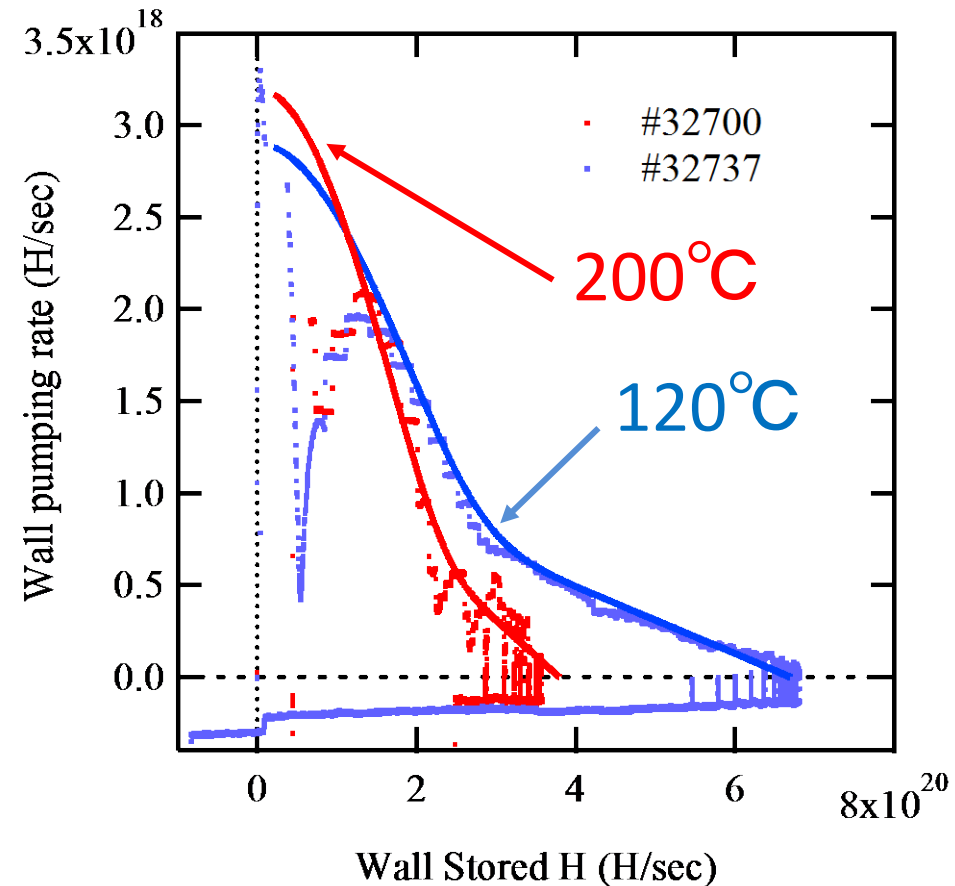
# 粒子バランスの解析

## 水素バリア+トラップの効果を導入

$$\frac{dH_W}{dt} = \Gamma_{in} - kH_W^2 - \frac{dH_T}{dt}$$

$$\frac{dH_T}{dt} = k_T H_W \left( 1 - \frac{H_T}{H_T^0} \right) - \alpha H_T$$

HW:溶解している水素原子数  
HT:捕原子数捉されている水素  
 $\Gamma_{in}$ :壁に入射する水素イオン・原子束  
K,  $k_T$ ,  $\alpha$ : 比例定数



# Phase IIIの原因を考察

- 現在、高温壁は冷却ができない。
  - 壁温上昇によるアウトガスの増加
  - 壁温上昇による再結合係数の変化
- H $\alpha$ 線強度の上下非対称性
  - 上側弱磁場側のスパッタリングの変化
- 突発的なプラズマの状態変化
  - 高リサイクリング状態への変化

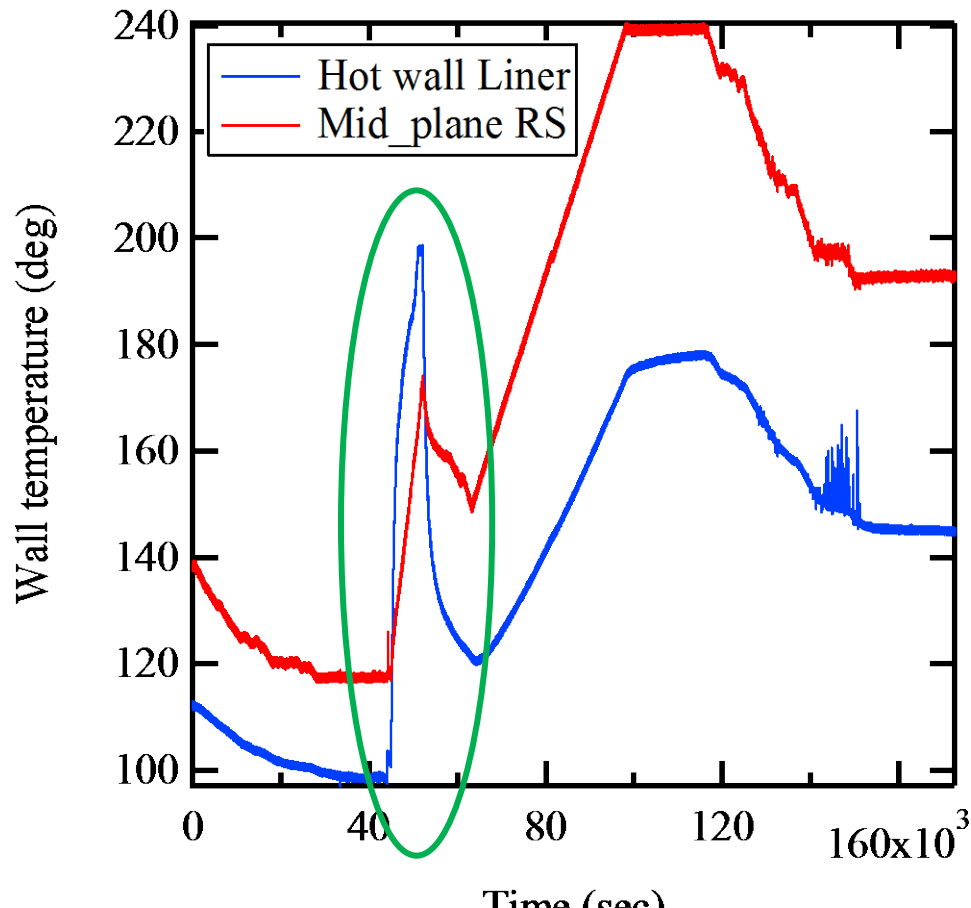


上下の非対称性の考察のためにトロイダル磁場を反転

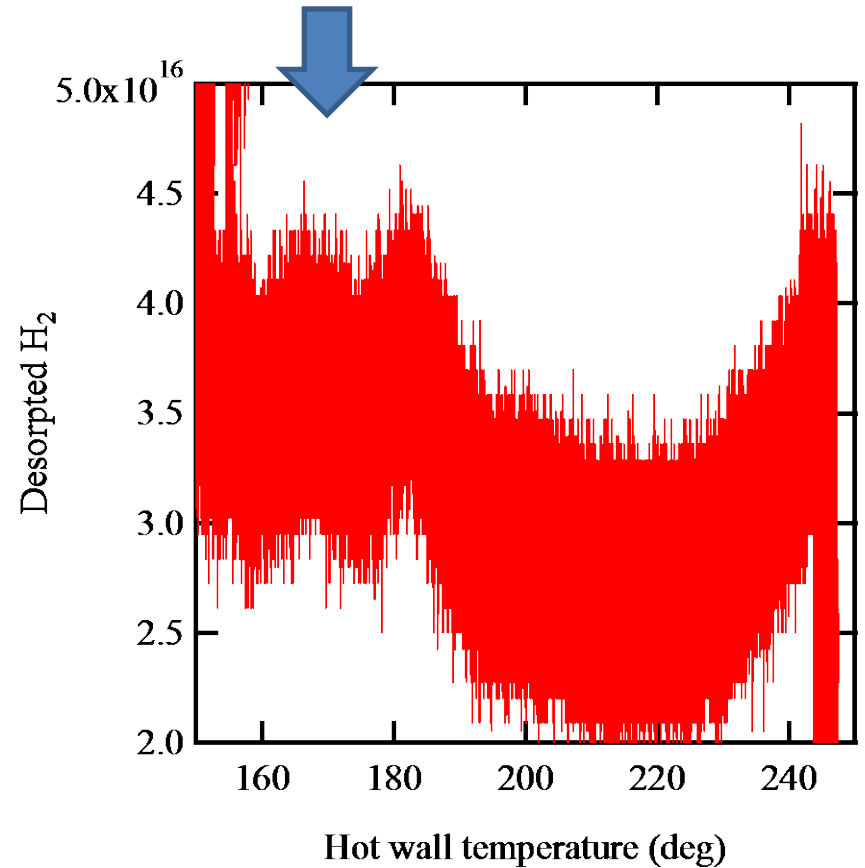
# 高温壁部と胴部の温度変化(1時間55分放電)

長時間放電で壁温は変化するが実機のTDSの結果ではその温度でのアウトガスの変化は大きい

ベーキング  
←→



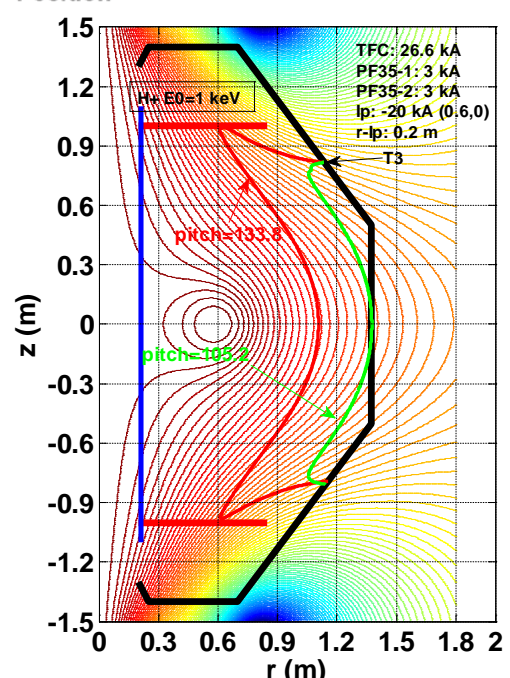
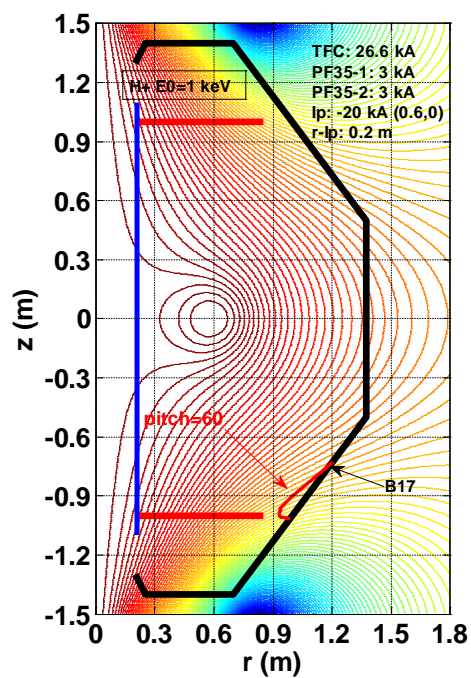
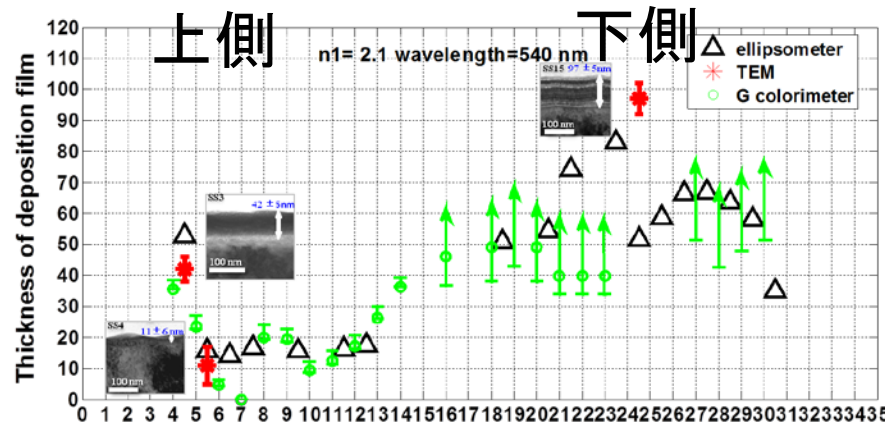
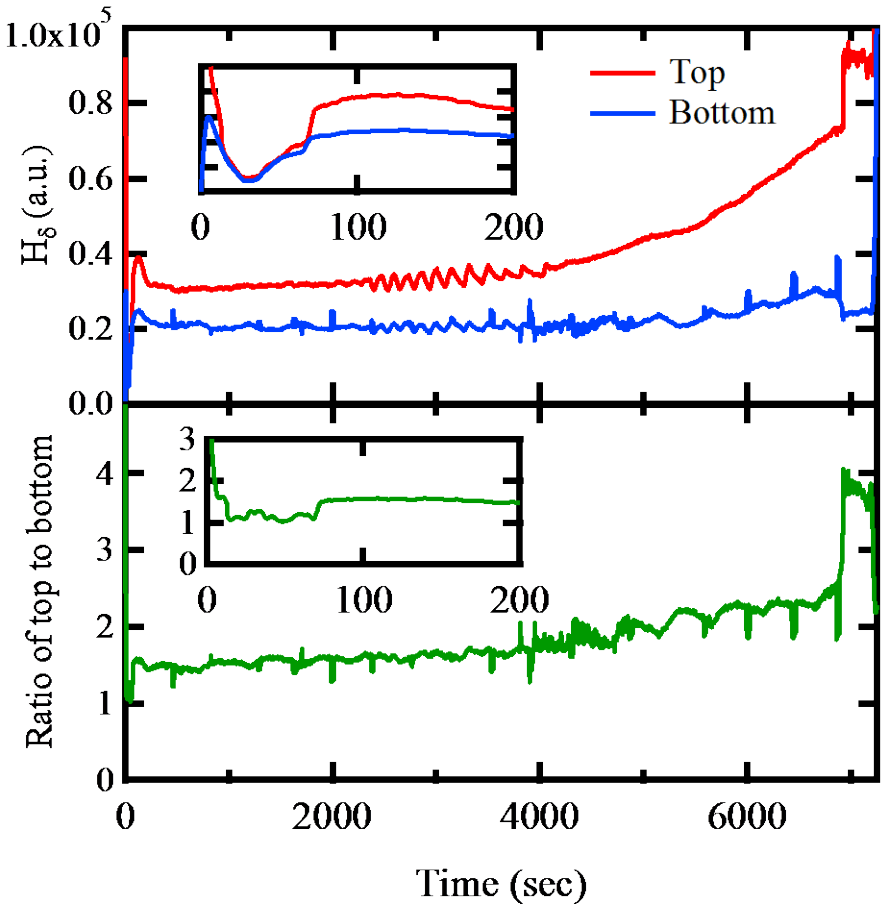
長時間放電終了時の壁温



# H $\alpha$ 線強度の上下非対称性の変化(1時間55分放電)

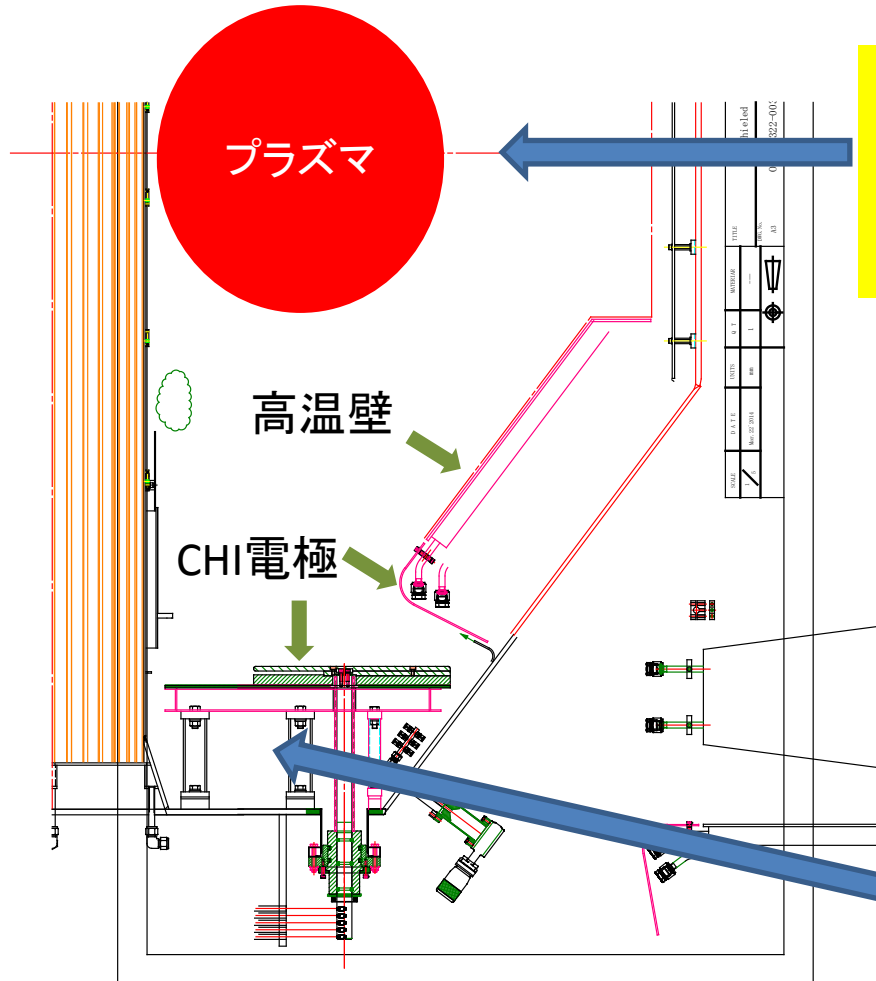
上側の壁への水素束が時間と共に増大→  
スパッタリングによる捕捉水素のはじき出し増大

## 上側で水素原子増大



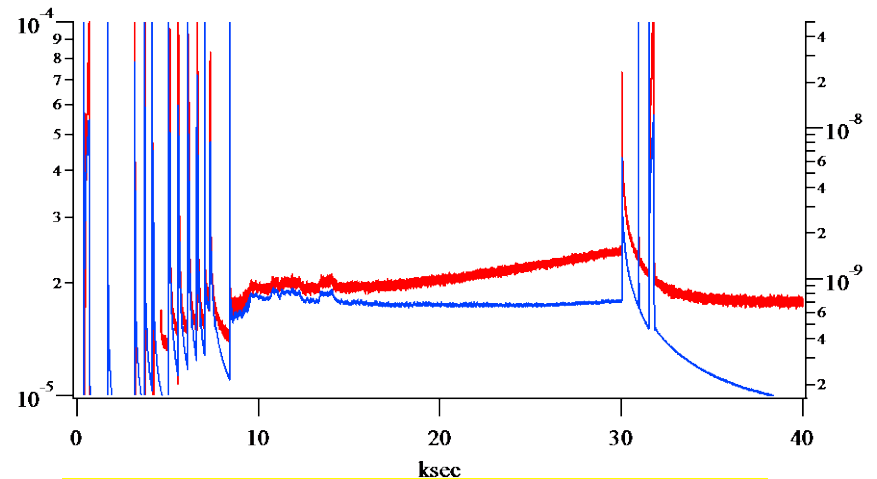
# トロイダル磁場反転による粒子圧縮効果？→

下側ダイバータ板プラズマ対向面反対側の中性  
粒子圧力が上昇→有効な能動排気→**6時間放電**



プラズマ容器  
の $H_2$ 分圧は  
放電中変化  
なし(青線)

- 上側ダイバータ板裏側にはクライオポンプ1台
- 下側ダイバータ板裏側にはクライオポンプ3台
- 上側にはダイバータ板のみで下側にはCHI電極



ダイバータ板裏側の  
水素分圧が放電中に上昇(赤線)

# まとめ

1. 多くの共同研究者との共同研究により2016年度も多くの成果を得ることができた。
2. 水素リサイクリングの物理機構解明のために、種々の試料試験から見出した水素バリアの形成を確認し、水素バリアに基づいたモデルでQUESTの長時間運転の粒子吸蔵特性を表すことができることを示した。粒子吸蔵は3つのPhaseに分けることができ、Phase Iは水素バリアに基づく壁吸蔵、Phase IIは捕獲サイトによる粒子捕捉が主な素過程であることが確認された。
3. 高温壁の運転により、水素リサイクリング特性を壁温で制御できることを確認した。QUESTのプラズマ対向壁に形成された再堆積層の上下非対称性から、真空容器上下での水素リサイクリング特性が異なっていることが明らかとなった。Phase IIIでは特に顕著であった。
4. トロイダル磁場を反転させることで上下のプラズマと壁の相互作用を交換し、結果的に粒子の能動的排気を向上させた結果、**6時間**の放電維持が可能となった。