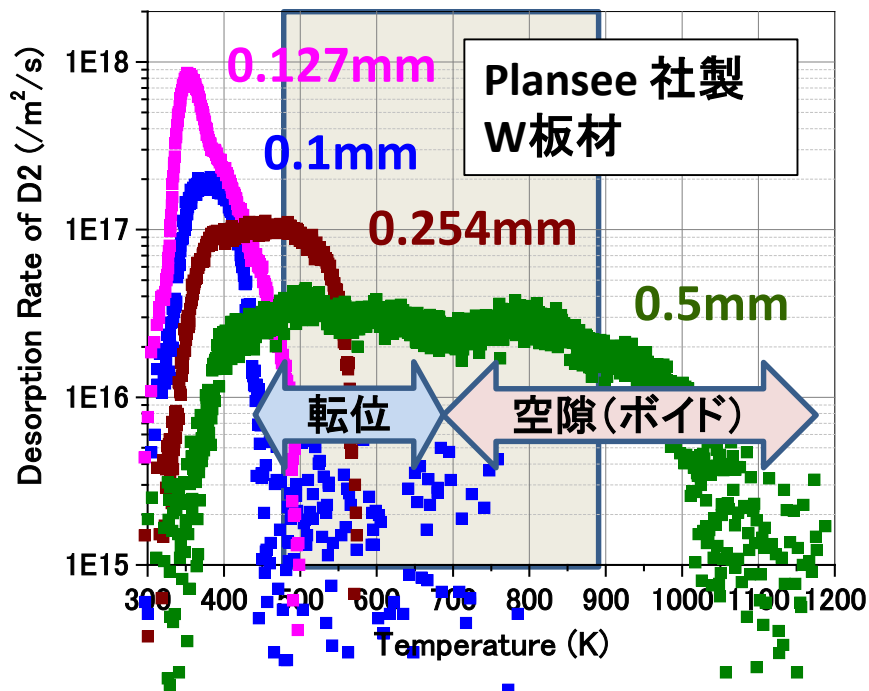


# 高温での水素吸蔵量の少ないW板材を探そう

## 製造法によって異なるD<sub>2</sub>の吸蔵・放出特性



- 試料が薄いほど吸蔵したD<sub>2</sub>すべてを放出する温度は低い。
- 高温壁温度773Kを考慮すると、**冷間圧延法**で作製した厚さ0.254mm以下のWであれば、問題ないと考えられる。

### ◆試料サイズ

各厚さ×5×10mm

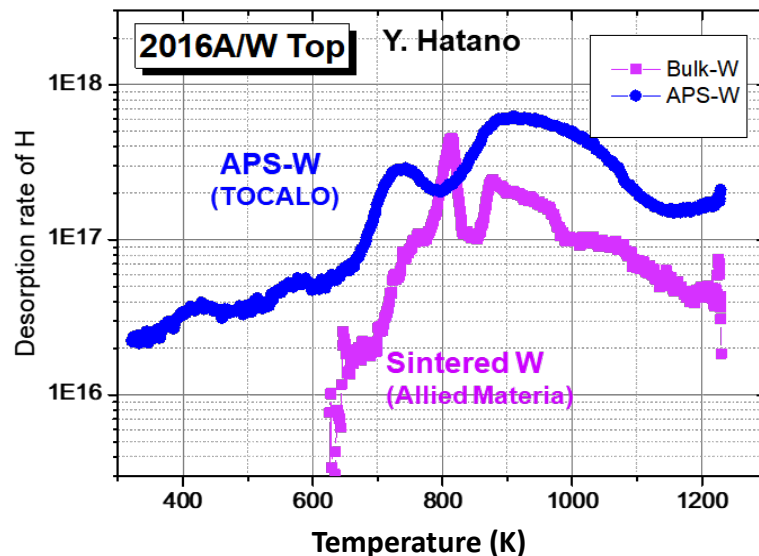
### ◆TDS昇温速度

1K/s (~1273K)

### ◆照射条件

イオン種: D<sub>2</sub><sup>+</sup> 加速エネルギー: 3keV  
照射フルエンス: 1 × 10<sup>21</sup> D<sup>+</sup>/m<sup>2</sup>  
試料温度: 300K

圧延方法	厚さ (mm)	フラックス (ions/m <sup>2</sup> · s)	D <sub>2</sub> 放出量 (ions/m <sup>2</sup> )	D <sub>2</sub> 放出の温度域(K)
冷間圧延	0.1	8.0 × 10 <sup>16</sup>	1.8 × 10 <sup>19</sup>	320-450
	0.127	1.4 × 10 <sup>17</sup>	5.3 × 10 <sup>19</sup>	320-500
	0.254	1.8 × 10 <sup>17</sup>	2.2 × 10 <sup>19</sup>	330-570
熱間圧延	0.5	1.1 × 10 <sup>17</sup>	2.3 × 10 <sup>19</sup>	330-1050



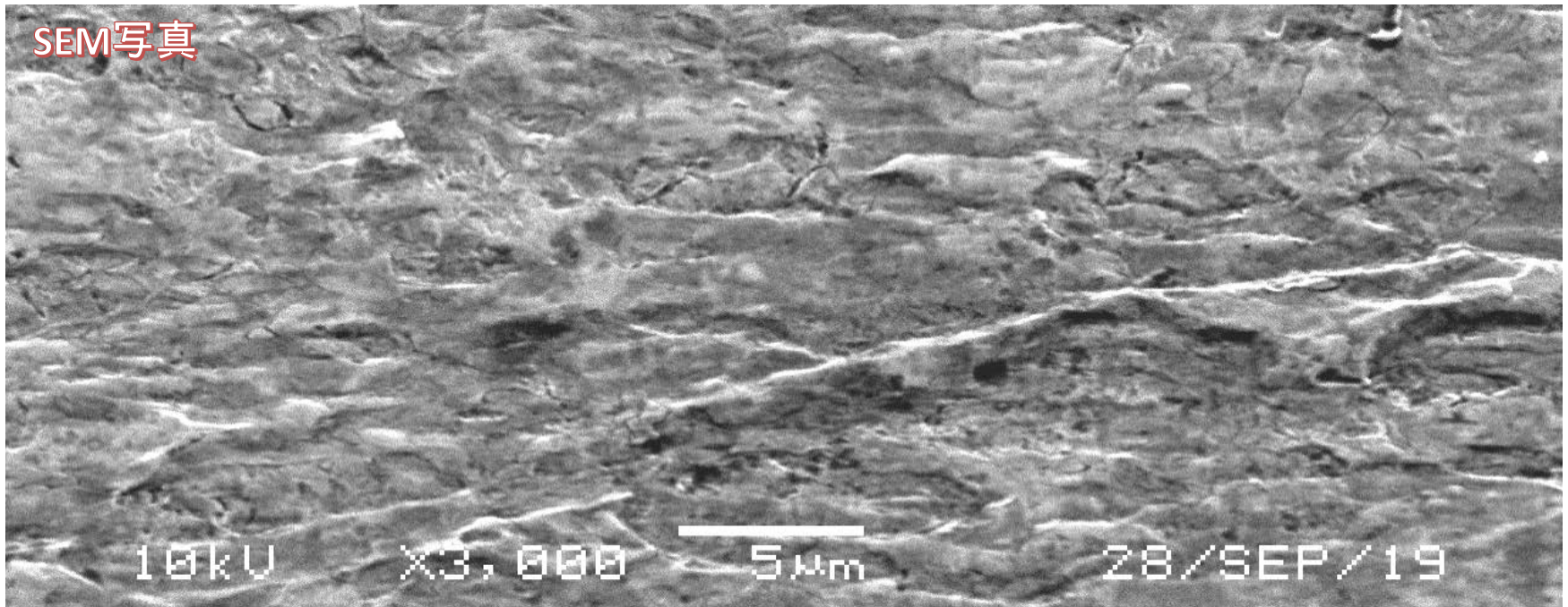
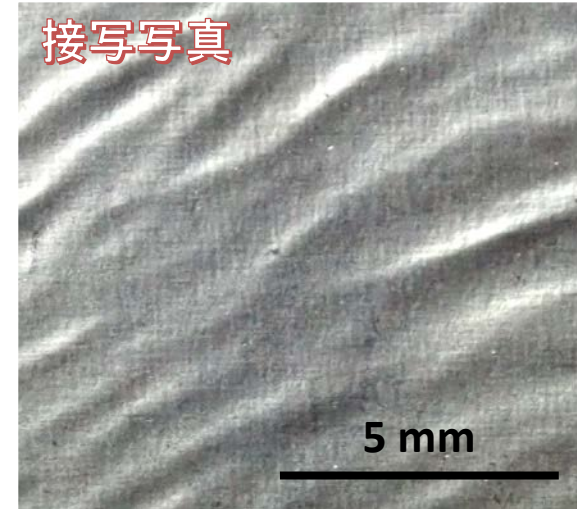
# W(0.1mm<sup>t</sup>)/SUS爆着クラッド材の表面状態

## ■ 機械特性

- 表面は波打っており、盛り上がった部分では接合していない。剥がれやすく、大きな問題点、要改良
- どの場所も表面には微細な剥離や亀裂が発生。

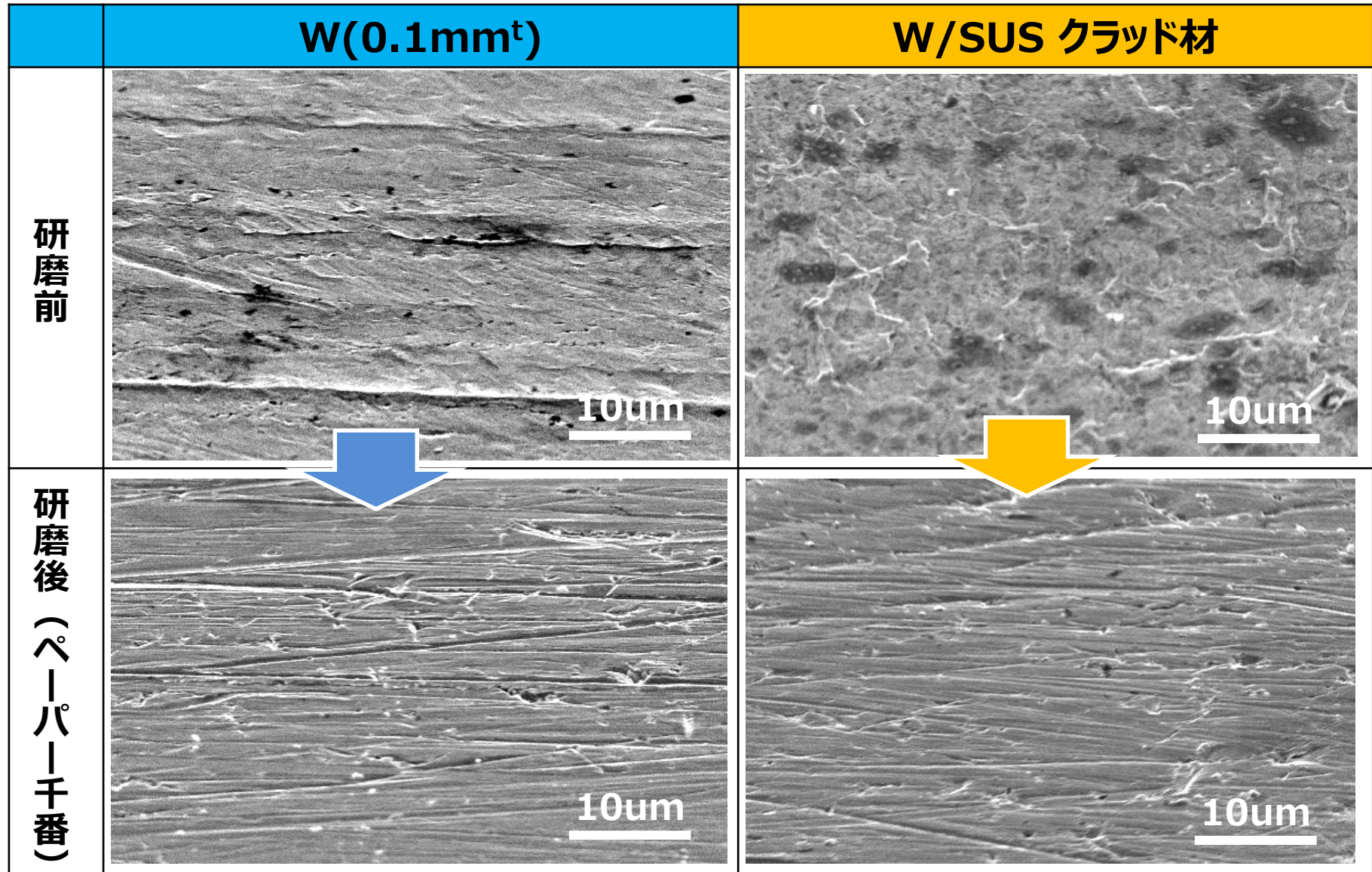
## ■ 真空特性

- 激しい衝撃により**大量の格子欠陥(転位、亀裂、ポイド等)**が発生し、**水素保持量、保持温度**が上がっているのではないかと接合していない場所の真空特性は？



# 爆着クラッド材の表面状態 (#1000研磨前・後のSEM像)

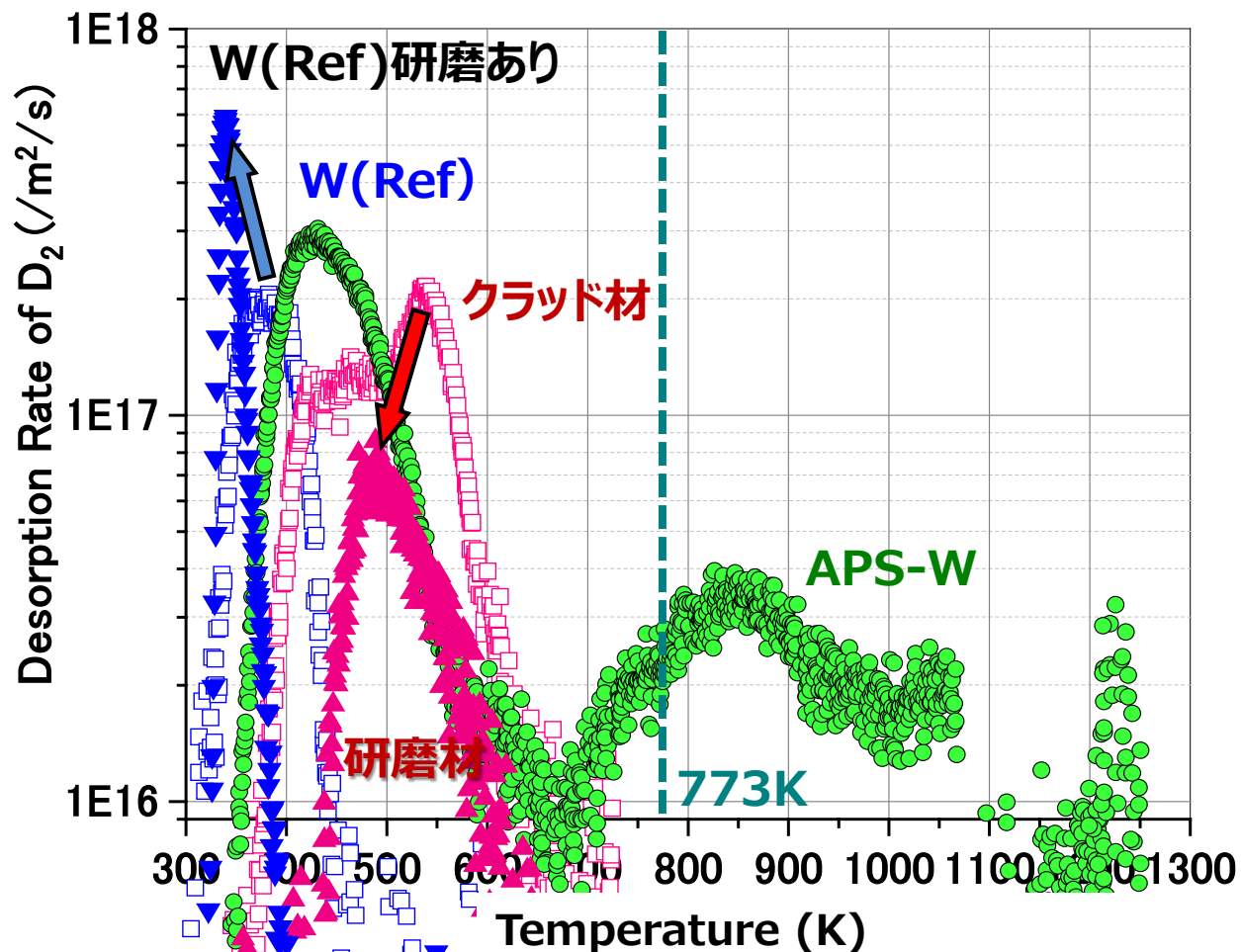
- 激しい変形により剥離しかけた部分を削ぎ落とすと水素の吸蔵・放出特性が良くなるのではないかと⇒⇒サンドペーパーで**表面研磨**(未爆着Wの表面状態と大差無し)



# 水素の吸蔵・放出に及ぼす研磨の効果

・・・#1000研磨前・後の吸蔵・放出特性比較・・・

- 研磨によってクラッド材の重水素吸蔵量がかなり減少。
- ⇒塑性変形の激しと思われる最表面層を落とすことによって爆着時に導入された転位をかなり取り除くことができた。
- 但し、研磨を行ってもW(Ref)と同等の性質とはならない。W層全体に変化が起こっている(近日中に断面のTEM観察を予定)
- 500-600K領域の水素放出をもう少し軽減できないか⇒歪取り焼鈍(1200K近辺)



(注意: 研磨したクラッド材: 重水素注入12日後にTDS測定、他のデータは2-3時間後に測定)

# W/SUS爆着クラッド材の開発課題と他候補との比較

壁温度773Kにおいて水素が大量に吸蔵・放出され可能性は低く、下記の課題をクリアできれば、QUEST高温壁パネル表面被覆材として使用可能と考えられる。

## 開発課題

- ①接合性の向上(爆着条件の最適化、中間材としてCu等の使用、等)
- ②表面研磨に加え、歪取り焼鈍(1200-1300K)を行うことによって水素の吸蔵・放出特性を更に向上

## QUEST用500°C高温パネルの候補材(吉田 私見)

材料	水素吸蔵・放出特性	接合性 機械特性	壁材としての耐熱負荷特性	炉への適用性	価格
W/SUS爆着 接合材	○ ↑	△ ↑	◎	?	○
W/SUSろう付 接合材	○ 要確認	◎	◎	○	?
Mo/SUS接合材	○	○	◎	△	○
SUS	◎	◎ 接合不要	◎	×	◎

# 長時間実験の計画

2018.12.17 報告

2019.4.22修正

2019.9.29 修正

## 液体ダイバータ実験の計画

# 目標と目的(H30-31年度)

- 6時間以上の放電の実現
  1. 再堆積膜厚の上下非対称の影響の有無→現状確認(取り外した高温壁の表面パネルの観察(大矢先生論文))
  2. 排気効率の差(クライオポンプ数)の影響→ポンプ数を1台から3台に変えて実験(H30年度実施済)
  3. 上下のQ-MASSによる燃料圧縮比の計測(H30年度実施済)
  4. トロイダル磁場反転による効果の確認((粒子軌道とCHI電極の効果の切り分け:H31年度実施予定:実験できず))
- 放電中の壁温変化の効果の確認
  1. 放電中に冷却水を流して、Ha線の上下比の変化を確認(H30年度実施済:通水中のガス発生:おそらくフランジリーク要確認)
  2. 粒子バランスの変化を確認(発生ガスにより放電停止:実験できず)
- 高速イオンの存在の確認
  1. PDI信号の確認(京大米田さんの修士論文:追実験結果待ち)
  2. 周波数を計測してイオンバーンシュタイン波へのモード変換の可能性を確認(実施できず)
  3. 高速イオンの測定(NPAの用意は間に合わず)

# 燃料圧縮比の確認

- 上下のダイバータ板の裏側での水素分子分圧を同時測定（今回は下側のみ）（Q-MASSの増設）

- クライオポンプの台数依存性を確認

下側を1台にした場合に水素分圧の差が生じた場合

1. 壁の状態（再堆積層と粒子束）：要現状確認及び壁温変化
2. トロイダル磁場の効果：要磁場反転（H31年度はTF反転）
3. イオン・中性粒子のフロー：要フロー計測

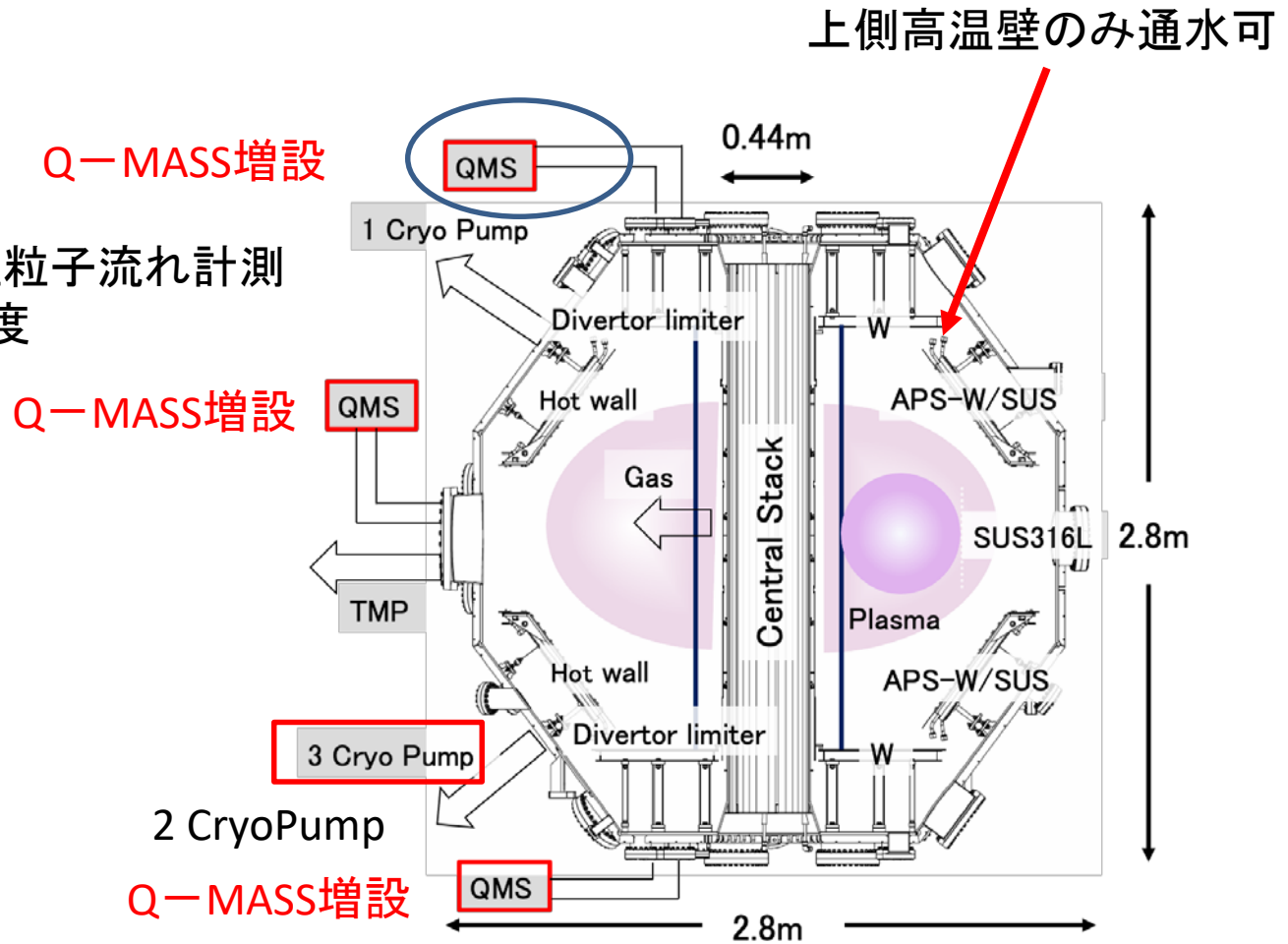
を切り分ける必要あり。

- できるだけ高温の壁で高い粒子圧縮を実現したいので壁温依存性も取得する必要があるかも？（上下非対称温度）

# 上下ダイバータ板背面の水素分圧の測定

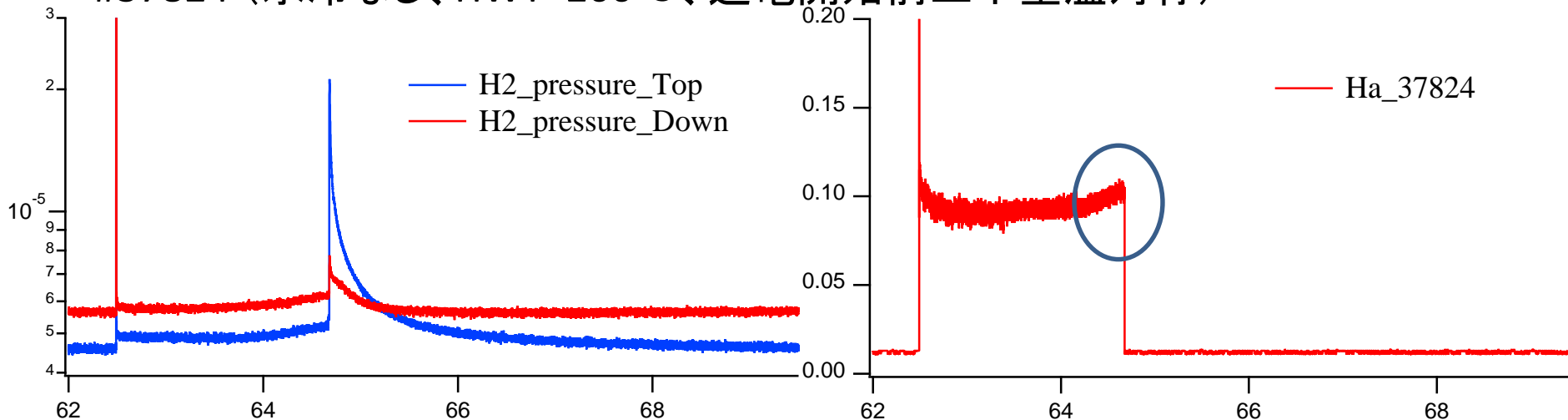
平成31年度

- TF反転
- Q-MASS増設
- イオン流束と中性粒子流れ計測
- 上下非対称壁温度

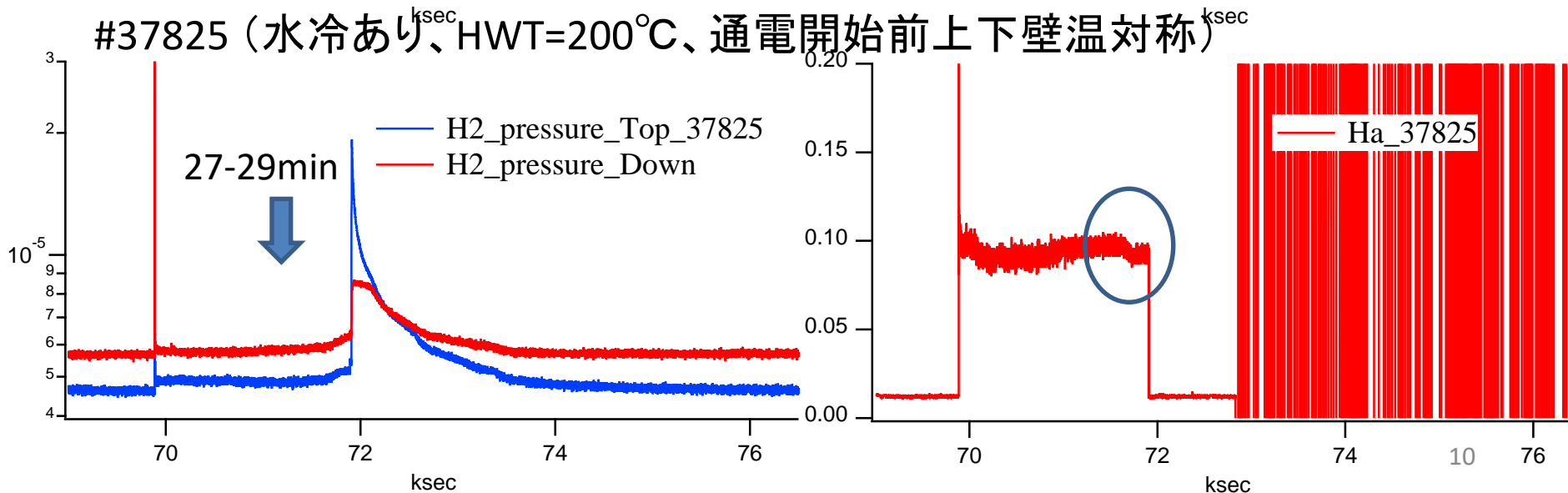


# 壁温200°C水冷によりHa信号に変化あり ただし放電は維持できない

#37824 (水冷なし、HWT=200°C、通電開始前上下壁温対称)

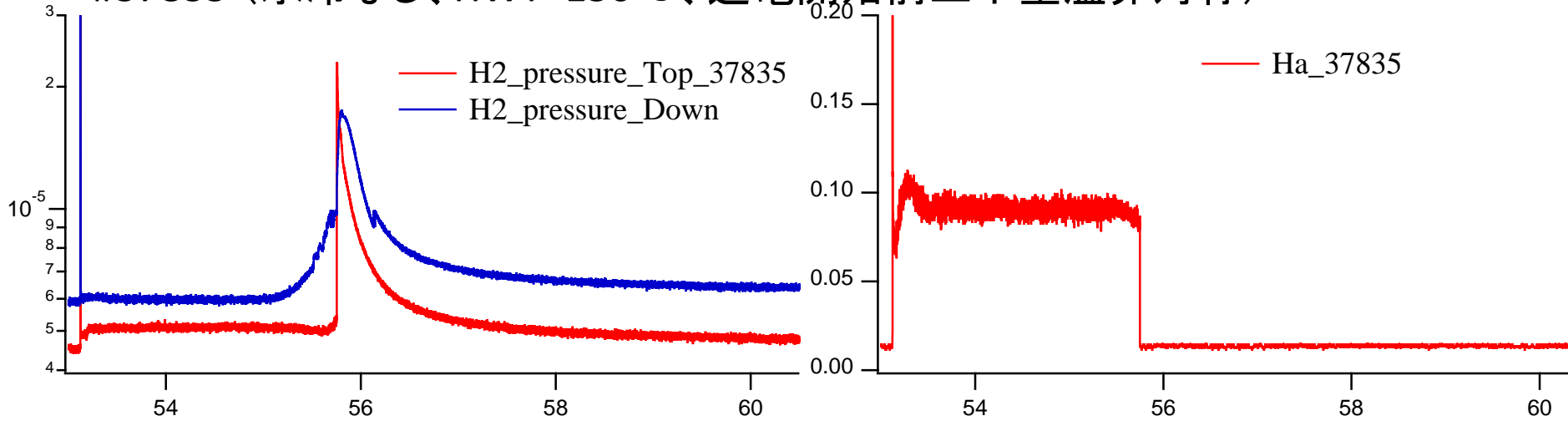


#37825 (水冷あり、HWT=200°C、通電開始前上下壁温対称)

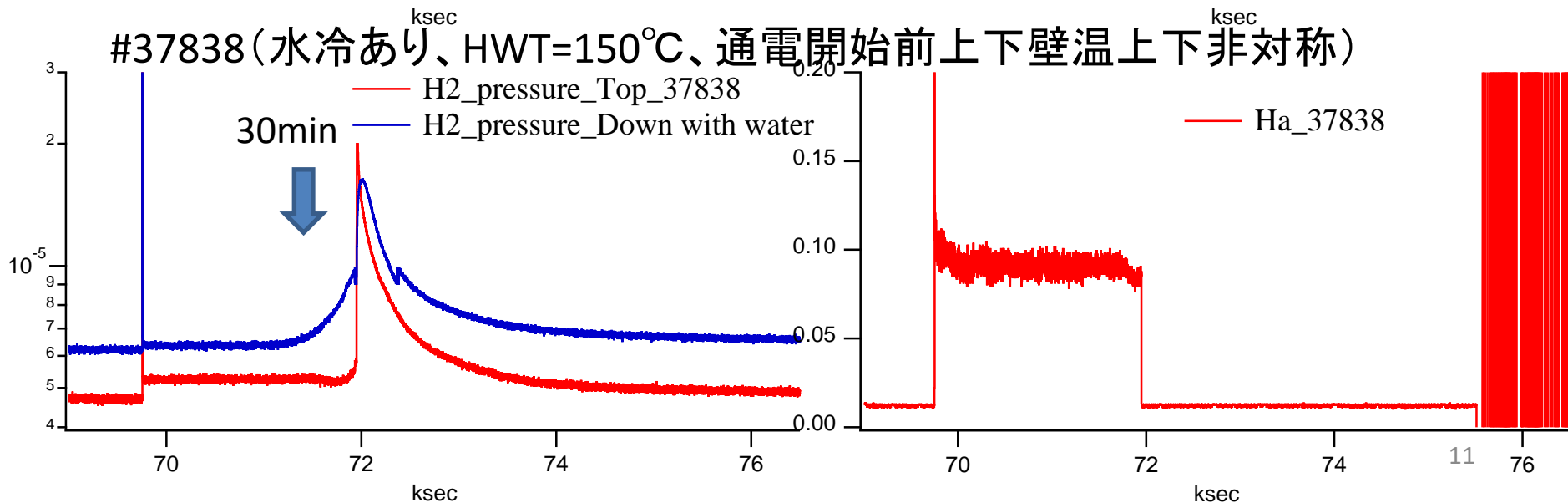


# 壁温150°C 上下のダイバータ板背面 圧力に非対称性あり

#37835 (水冷なし、HWT=150°C、通電開始前上下壁温非対称)

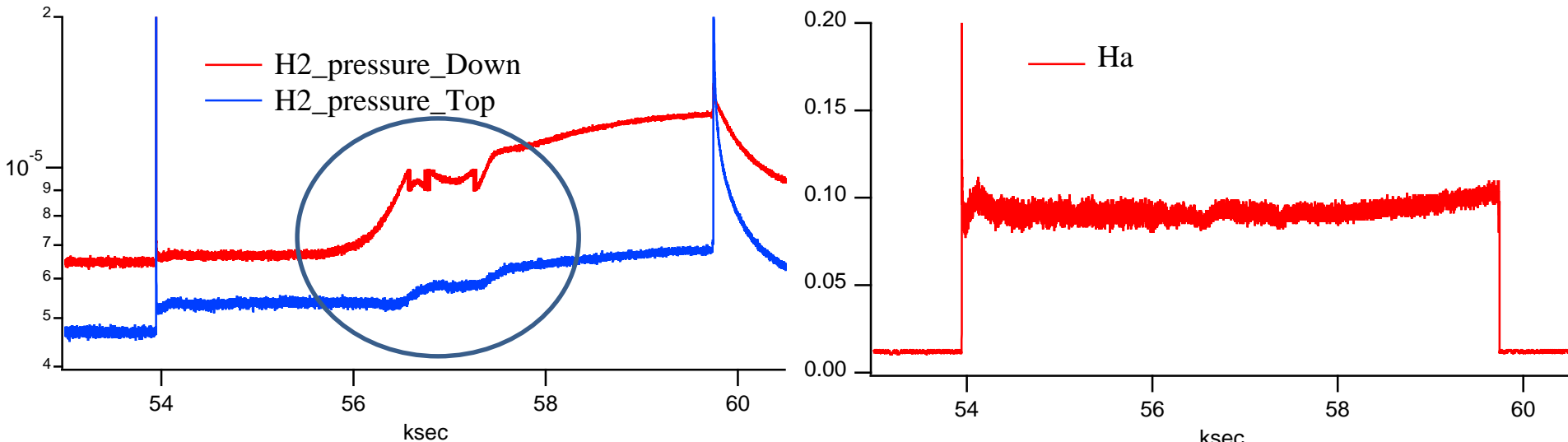


#37838 (水冷あり、HWT=150°C、通電開始前上下壁温上下非対称)

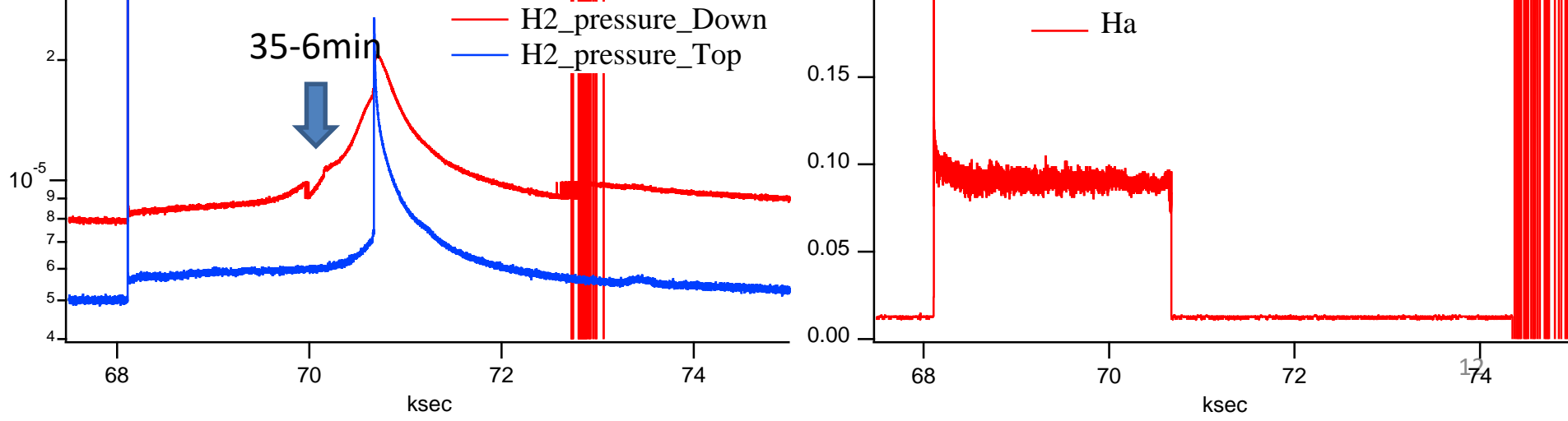


# 上下の壁温が違う場合に、ダイバータ板背面の圧力変化に上下差あり)

#37846 (水冷なし、HWT=150°C、通電開始前上下壁温非対称)

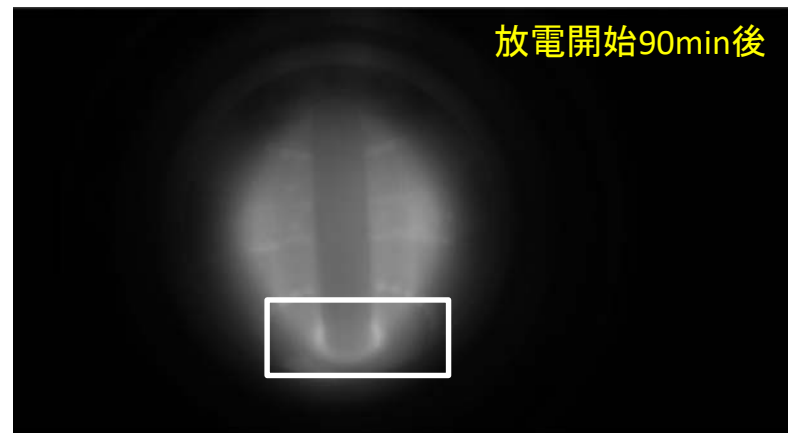
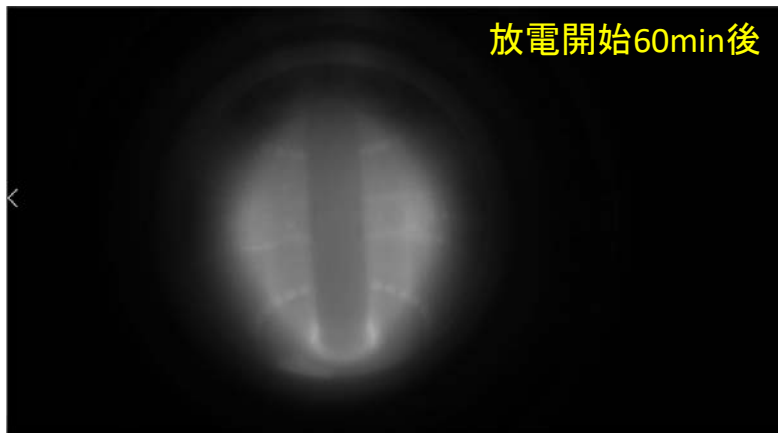
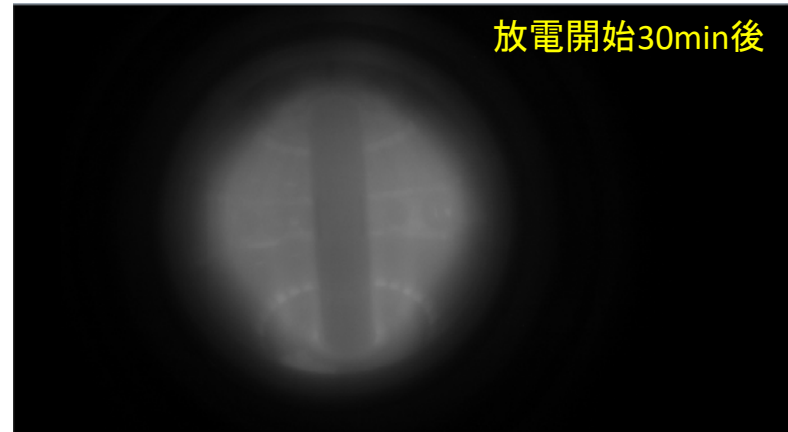
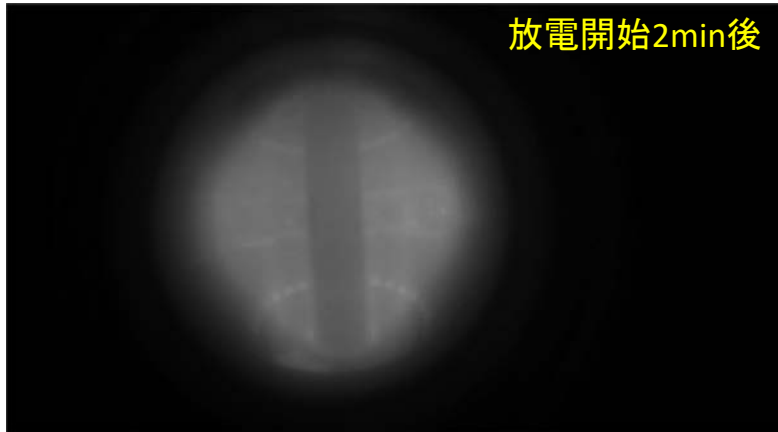


#37847 (水冷あり、HWT=150°C、通電開始前上下壁温上下非対称)



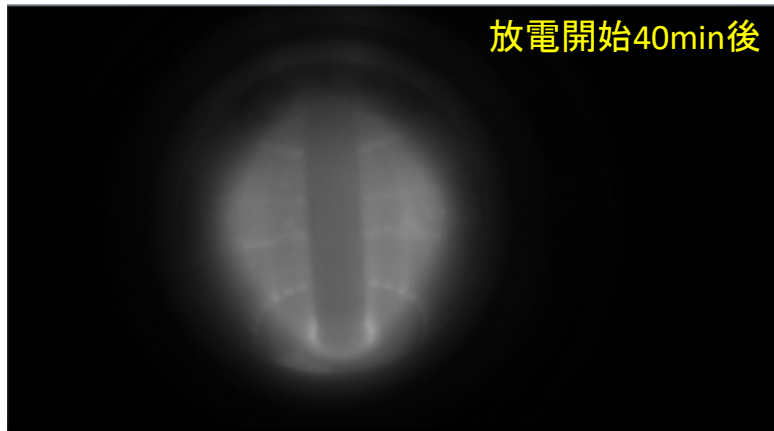
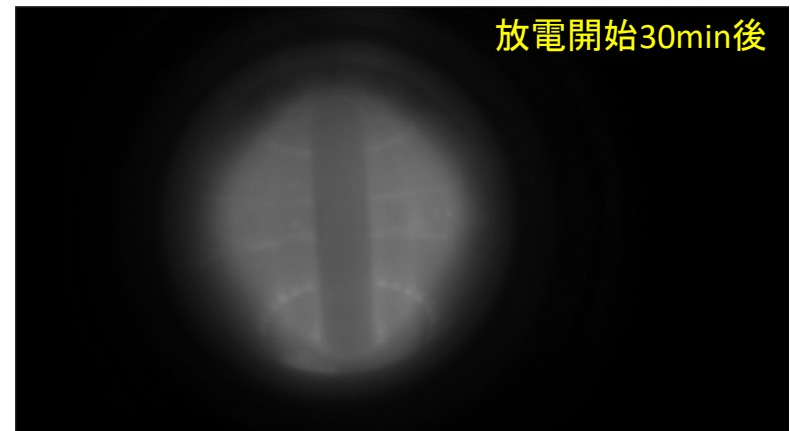
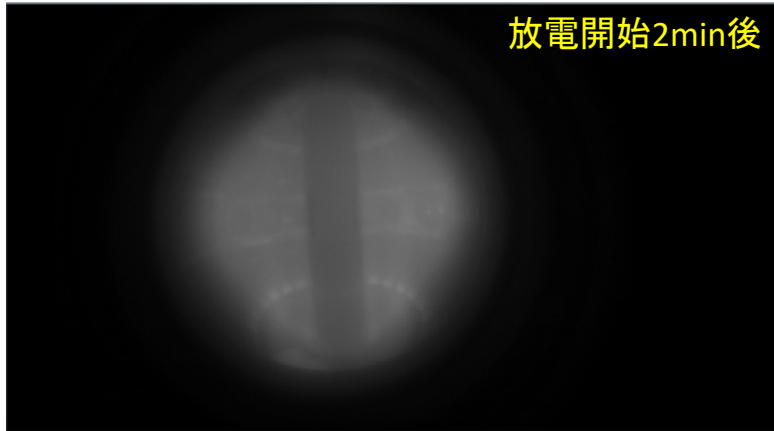
# 長時間放電の後半では、センタースタック下側が光る。 ナチュラルダイバータ効果による粒子圧縮？

#37846 1時間40分放電の画像(水冷なし)



# 長時間放電の画像(水冷あり)

#37847



# H31年度実験予定

- FESTA実験(実験準備中)
- 上下非対称性と粒子圧縮の確認
- 高温壁温度を400°C以上に

# Steps for LM Divertor Development

## Phase I

## Phase II

## Phase III

**Experiment**

Pop Experiment for understanding LM feature

Investigating LM behavior to plasma induced heat and particle loads

Installation of LM divertor on QUEST

**Simulation**

Including MHD effect on CFD Calculation

Including thermal effect on MHD-CFD Calculation

Design work for QUEST divertor using MHD-CFD Calculation

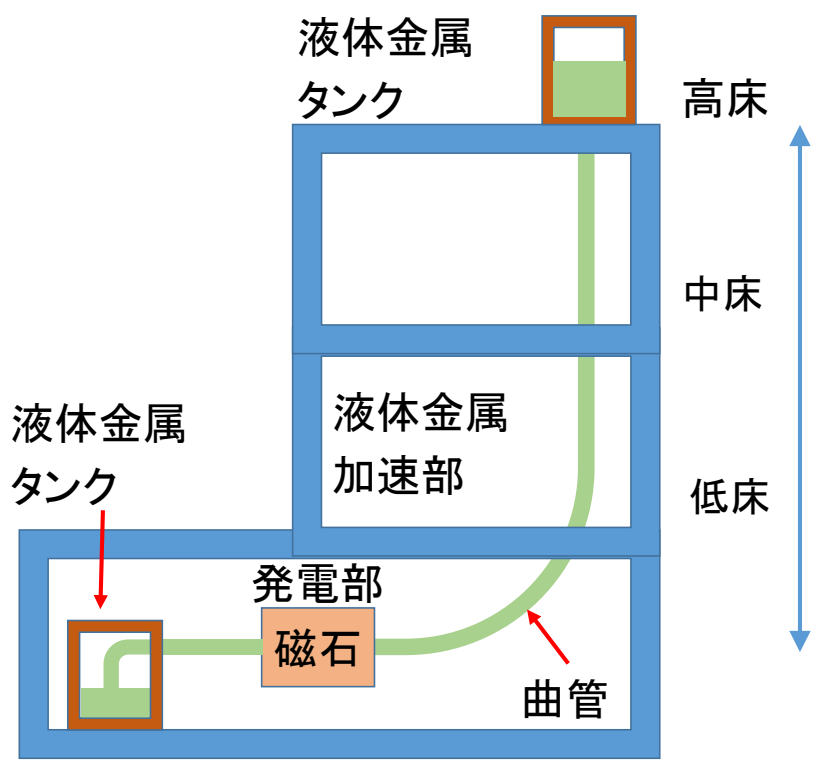
**OUTPUT**

Applying MHD power generation

Dinamo Effect on the Earth

Contribution to Nuclear Fusion

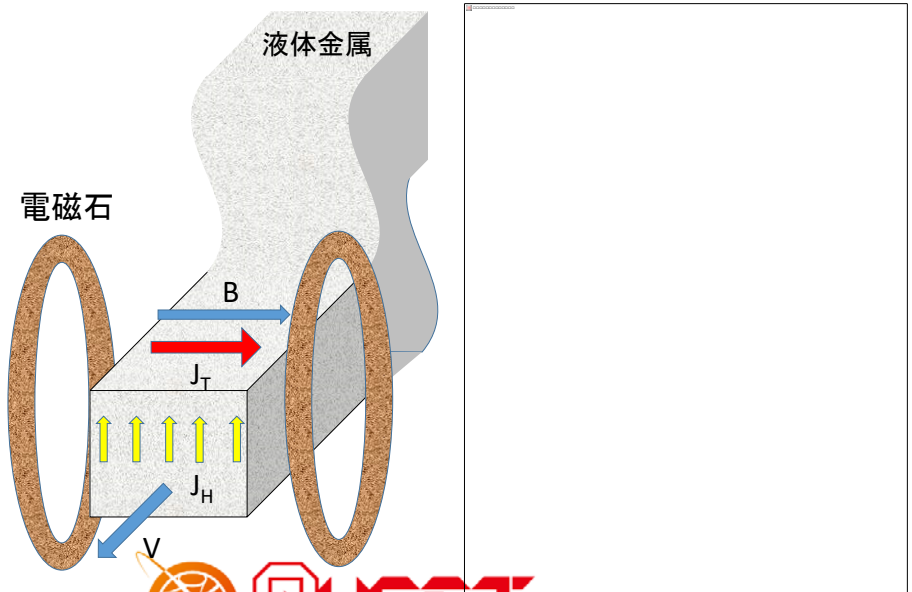
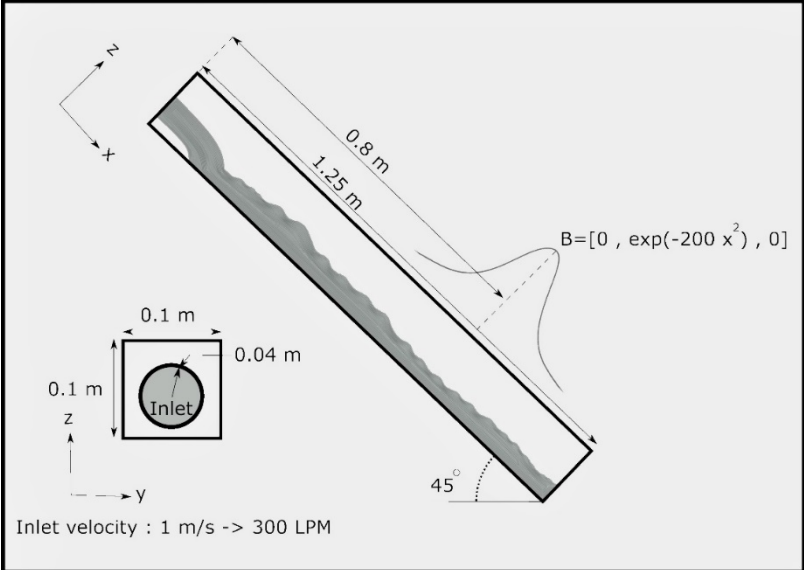
# 楊液体金属発電の実証（科学研究費 挑戦的研究（開拓））



- 液体金属は液体錫を使用
- 液体金属の取り扱いや基本的性質の理解及びシミュレーションの開発はPhase Iと共通
- 高熱負荷は範疇外であるが、熱負荷を与えたときの挙動についてはPhase IIと共通

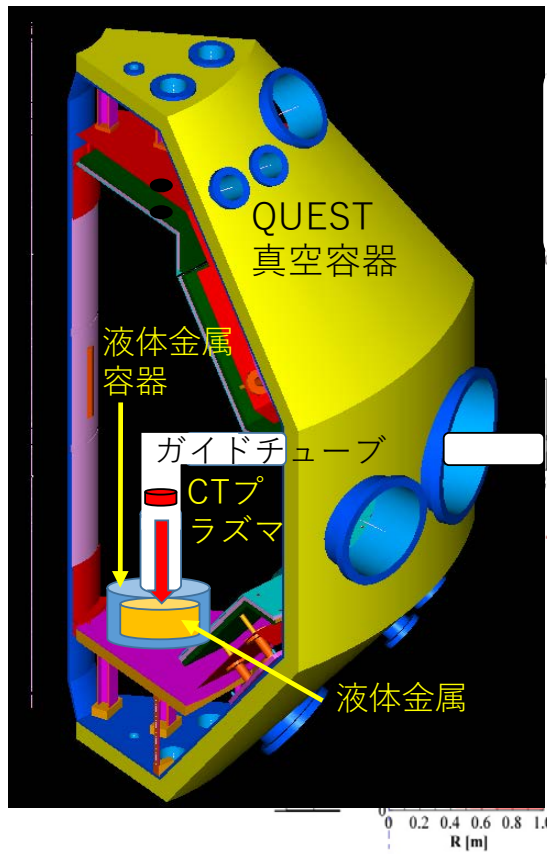
	H31年度	H32年度	H33年度	H34年度	H35年度	H36年度
実験	・液化錫200kg落下実験(低床)	・発電部設置 ・計測器設置	・液化錫落下実験(中床)	・液化錫落下実験(中床)	液化錫1t落下実験(高床)	液化錫2t落下実験(高床)
計算機シミュレーション	・槽応力計算	・電磁流体計算の検証	・乱流起電力の検証	・乱流起電力の影響評価	・発電効率の評価	・エネルギー収支の評価
目的	・装置の健全性確認	・MHD発電の検証	・乱流起電力の確認	・乱流起電力の効率評価	・発電効率の検証	・実用化への見通し

# Phase I: Basic Physics experiment is on-going

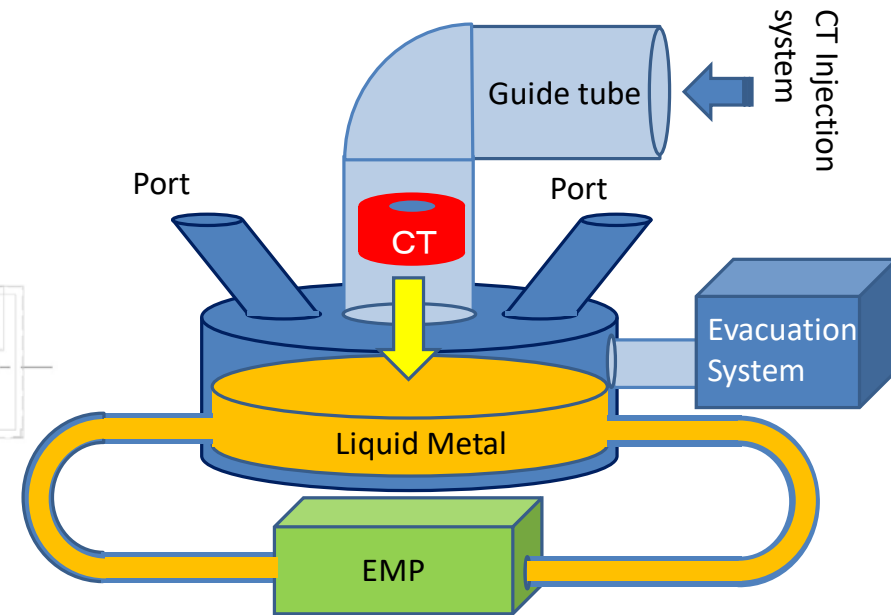
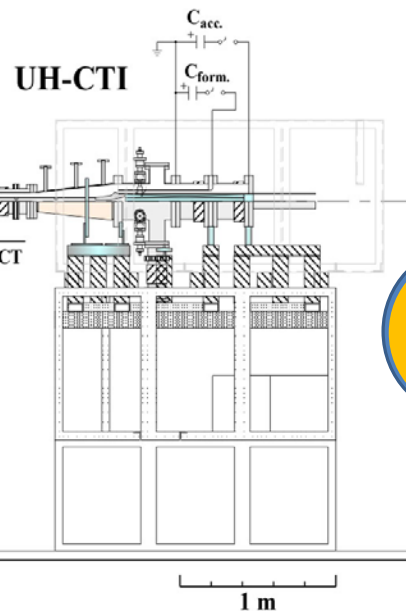


# Phase II: The preliminary experimental plan for installation of liquid metal divertor on QUEST.

既設QUEST装置

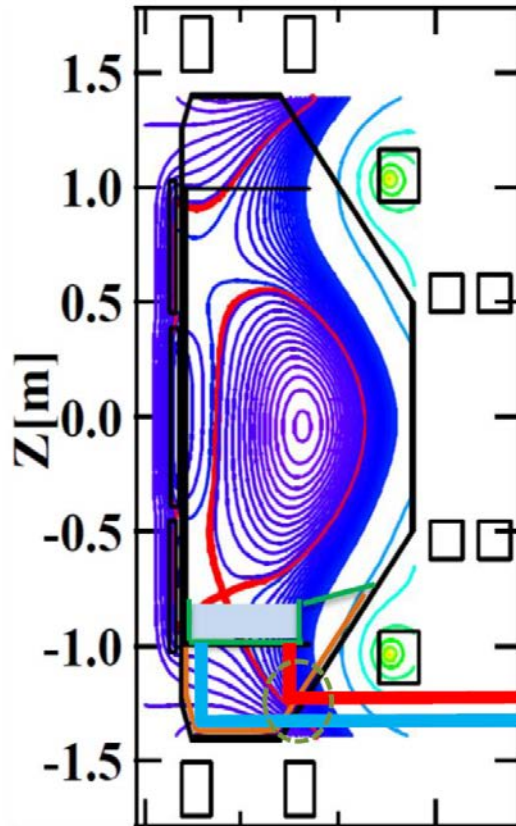


既設CT入射装置



# Phase III: Computational fluid dynamics is useful to evaluate liquid metal behaviour. Especially sprashing and contamination.

## Experiment in QUEST



## Computer Simulation

Develop a liquid metal flow solver for investigation of MAGLIMD.

by Hanada, Shimada, et al



by Hu, Al Salami, et al

Collaboration

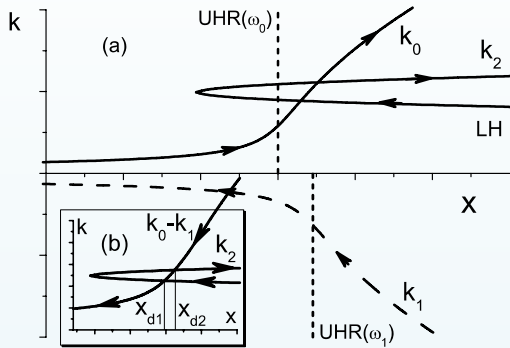
Liquid metal conditioner



M. Shimada and K. Hanada "Conceptual Design of Magnetically-Guided Liquid Metal Divertor on QUEST" Proc. Plasma Conference (2017) 22P-101.

# 28 GHz システムを用いた実験で目指すもの

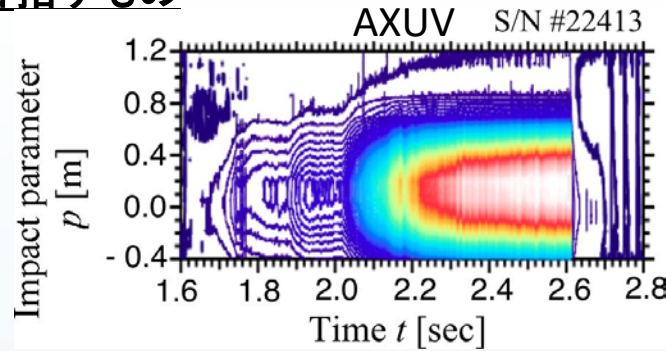
## O-X-B EBW experiments



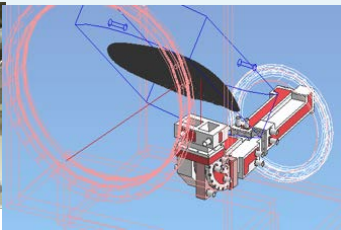
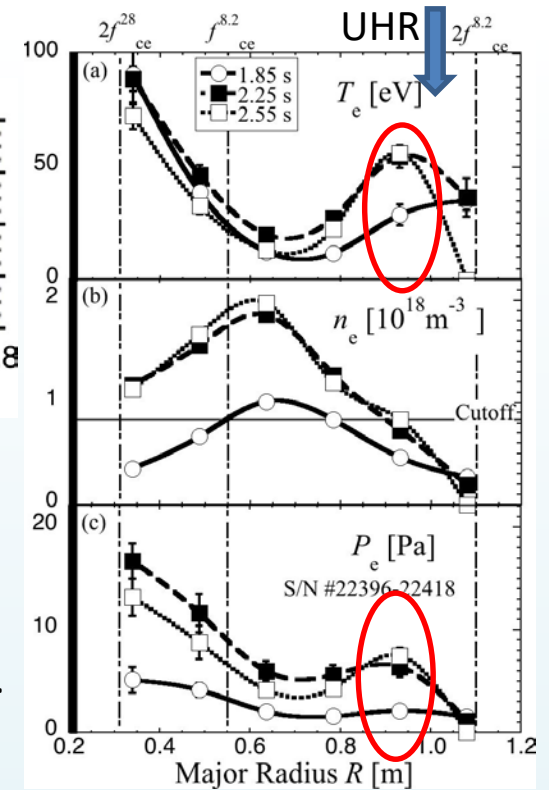
### Backscattering Instability

$$\frac{P_{th}}{\pi \rho^2} \left[ \frac{W}{cm^2} \right] \sim T_e \uparrow$$

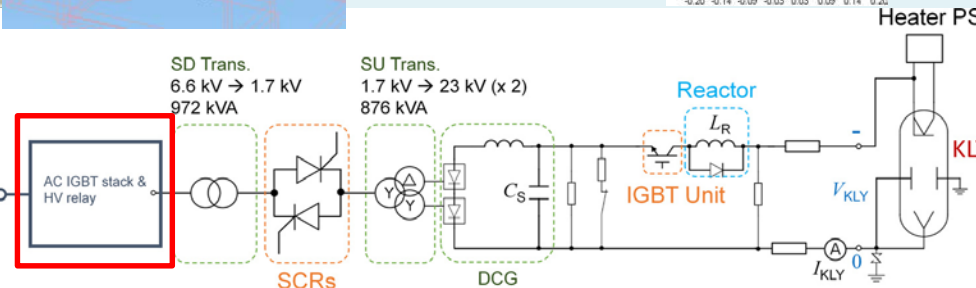
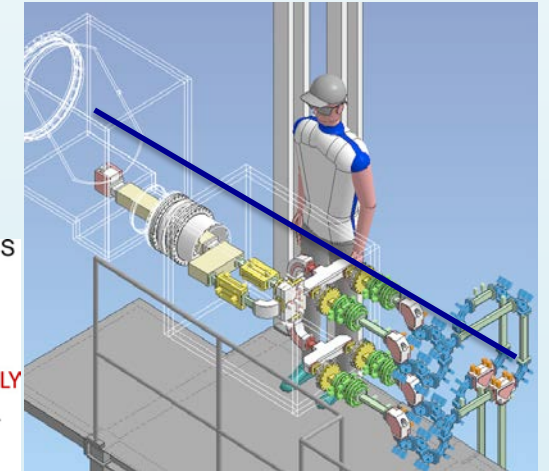
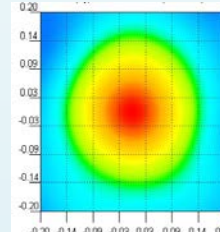
[ 8.56 GHz + 28 GHz ]



Bulk and mildly energetic electron heating effect are observed in **over-dense** region. The resonant heating for  $\sim 1\text{keV}$  component with **EBW** and relaxation to bulk electron are assessed. [ 8.2 GHz + 28 GHz ]



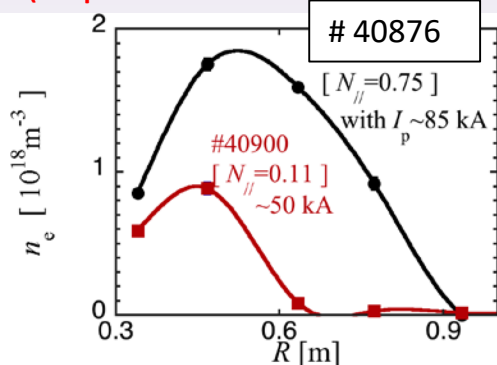
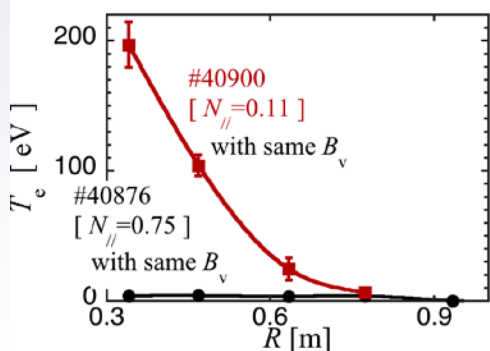
15cm beam  
O-mode /  
X-mode  
1st-2nd ECHCD



# 28 GHz システムを用いた実験で目指すもの

Non-inductive high  $I_p$  and  $n_e$  plasma ramp-up for NBI

For NBI, relatively high  $I_p \sim 100$  kA and high  $n_e \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$  are needed. (if possible with high  $B_+$ )



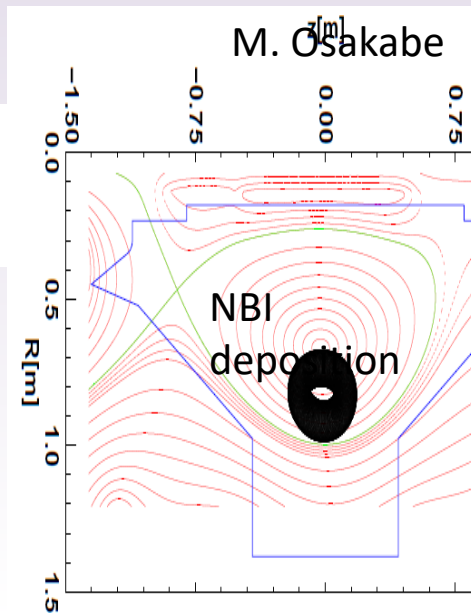
$10^{17} \text{ m}^{-3}$

Focusing Mirror Launcher + Polarizer for local ECHCD

$10^{18} \text{ m}^{-3}$

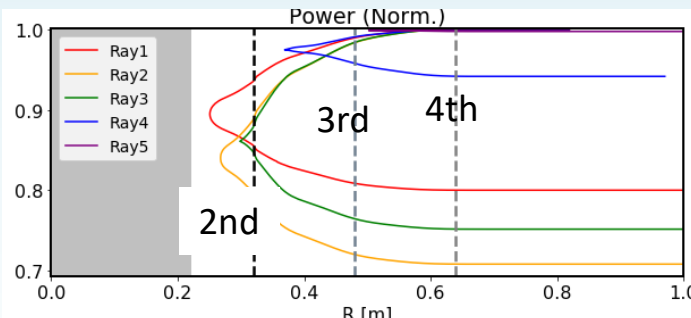
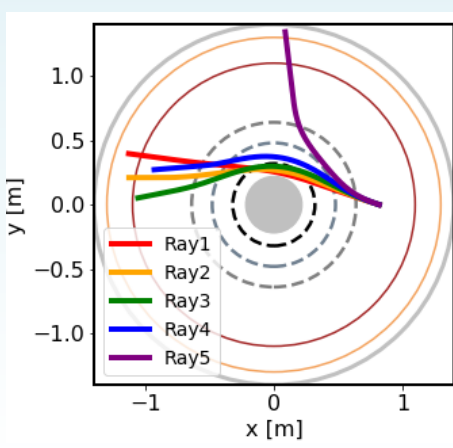
+ EBWH?

$10^{19} \text{ m}^{-3}$

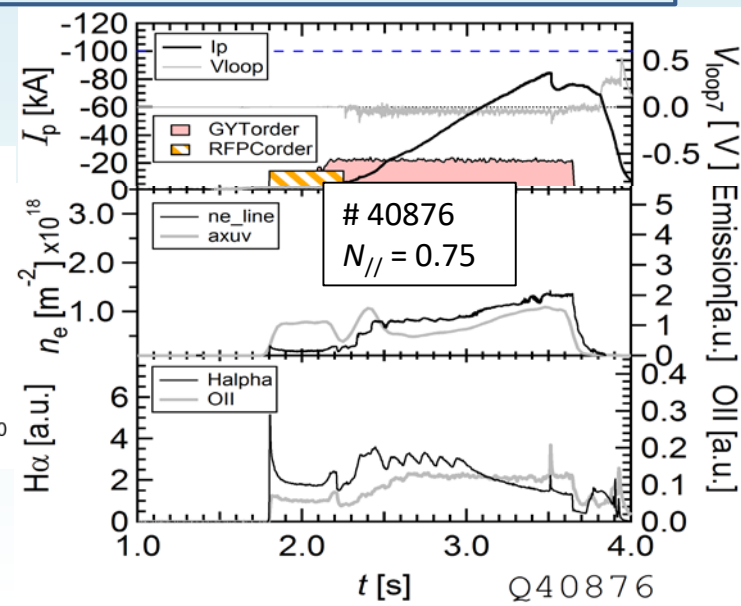


Non-inductive high  $I_p$  and  $n_e$  plasma ramp-up with Higher harmonics 【 ITER : low field op. 1.8 T 】

QUEST : 8.2 GHz (1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>) + 28 GHz (3<sup>rd</sup>) : 0.16 T  
 ITER: 60 GHz (1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup>) + 170 GHz (3<sup>rd</sup>) : 1.8T with M. Ono

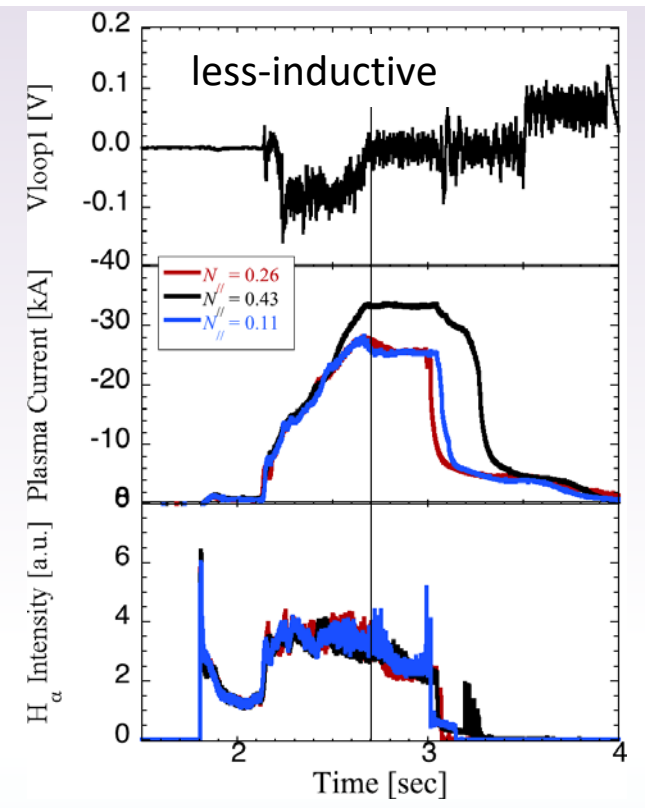
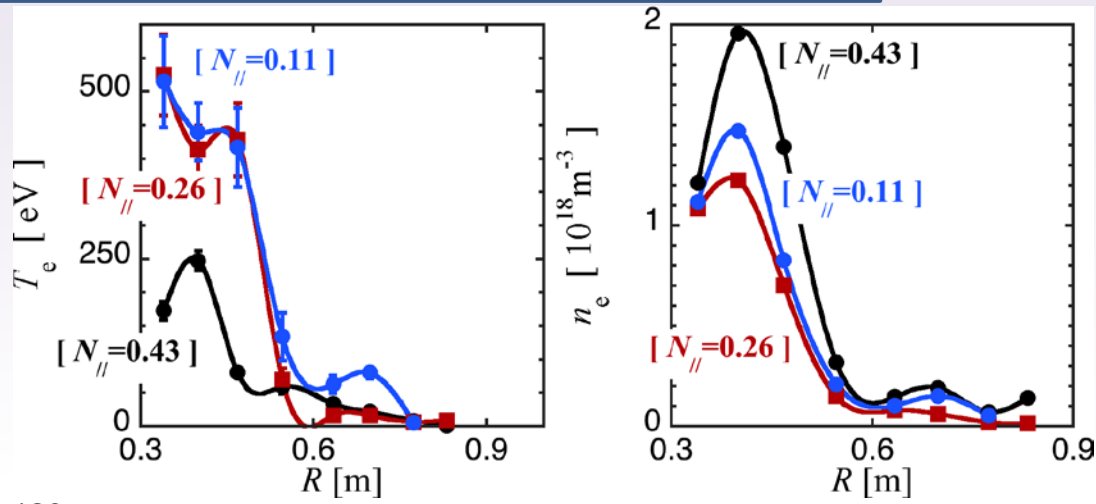


Relativistic Doppler effect  
 TASK/WR  
 Higher harmonic & Overlapping

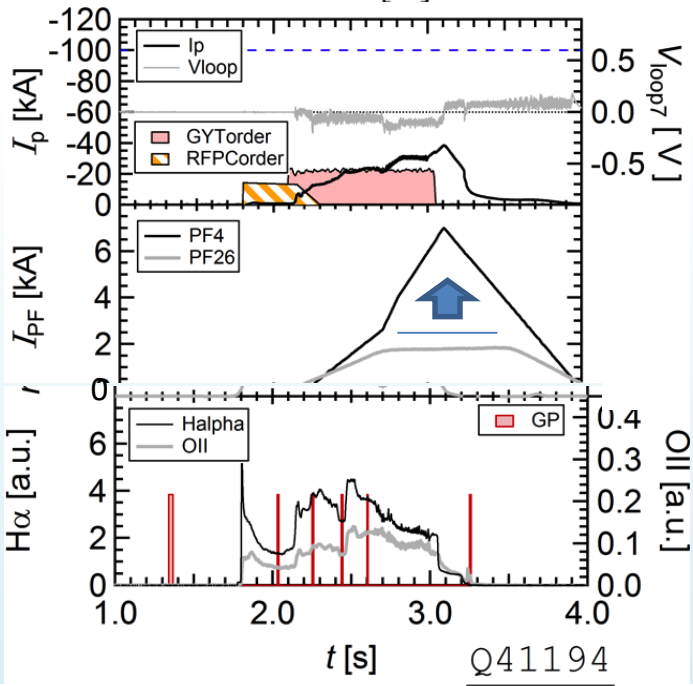
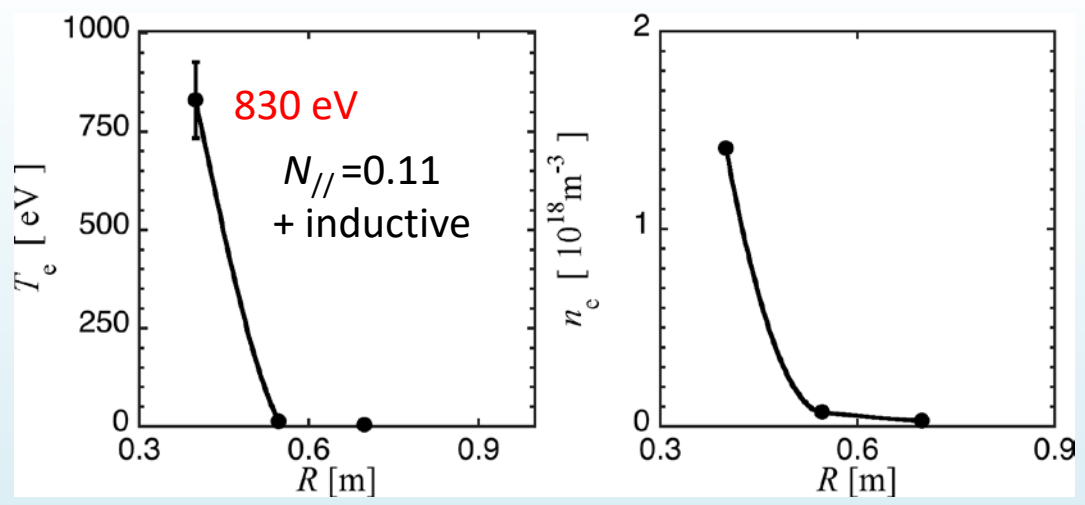


# 28 GHz システムを用いた実験で目指すもの

## Non-inductive plasma ramp-up with bulk heating



+ inductive



# 28 GHz システムを用いた実験で目指すもの

## Steady State Operation

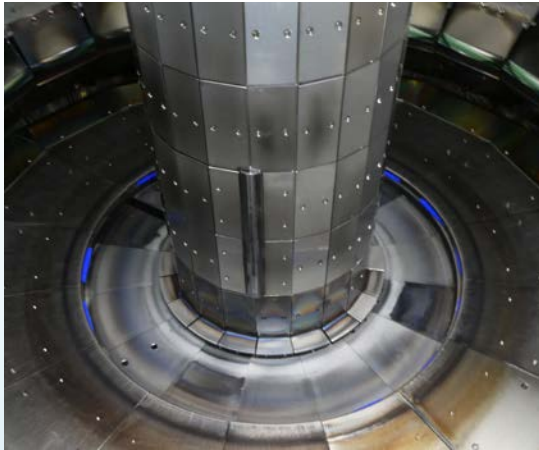
### Water-cooled WG line



### 28 GHz 2 MW dual-frequency gyrotron

Frequency	28 GHz	
Output power	2 MW	0.4 MW
Pulse width	3 s	CW
Output efficiency	50% (with CPD)	
Beam voltage	80 kV	70 kV
Beam current	70 A	20 A
MIG	Triode	
Cavity mode	TE <sub>8,5</sub>	
Output mode	Gaussian like	
Output window	Sapphire double disk	
Collector	Depressed collector	
	Sweeping coils	

## Combined Heating to obtain high $I_p$ , $n_e$ and $T_e$



CTI



CHI electrodes NSTX: **CHI+ECH+FW**

IGBT switching system for double swing OH

# 新たな検討

## 14 GHz System

筑波大学・科学研究補助金申請

Nucl. Fusion 57 (2017) 066001 (6pp)

<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa637a>

## Development of over-MW gyrotrons for fusion at 14 GHz to sub-THz frequencies

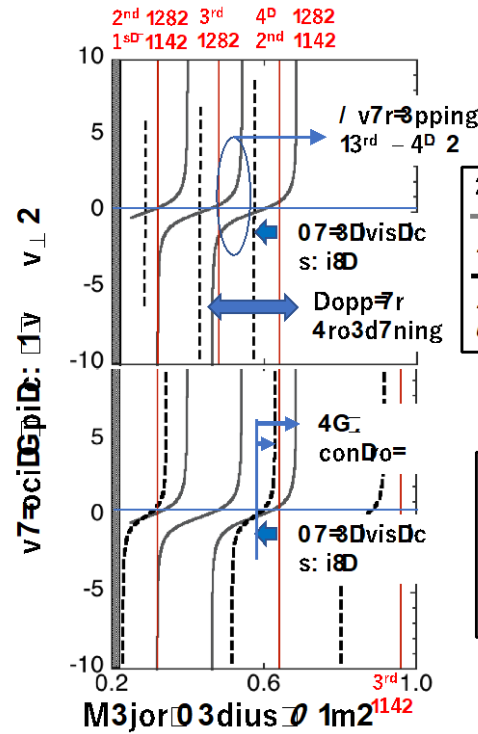
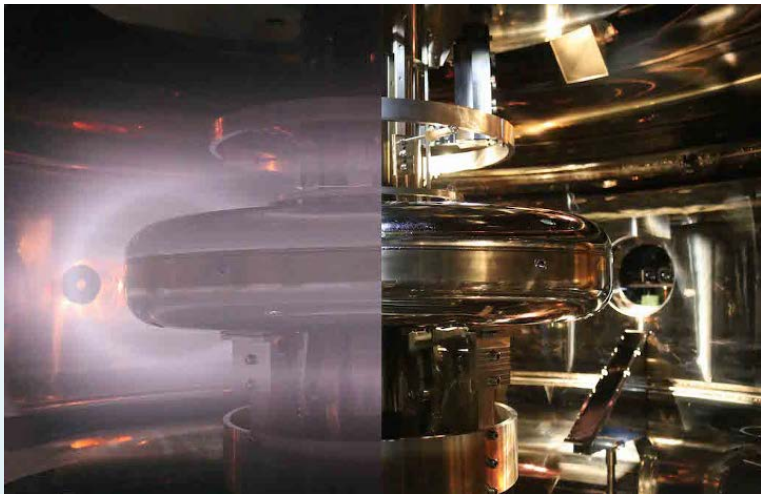
T. Kariya, T. Imai, R. Minami, K. Sakamoto, Y. Oda, R. Ikeda, T. Shimozuma, S. Kubo, H. Idei, T. Numakura, K. Tsumura, Y. Ebashi, M. Okada, Y. Nakashima, Y. Yoshimura, H. Takahashi, S. Ito, K. Hanada, K. Nagasaki, M. Ono, T. Eguchi and Y. Mitsunaka

Large-sized plasma with bulk electron heating (8.56GHz)

Synergetic heating with 28 GHz-wave

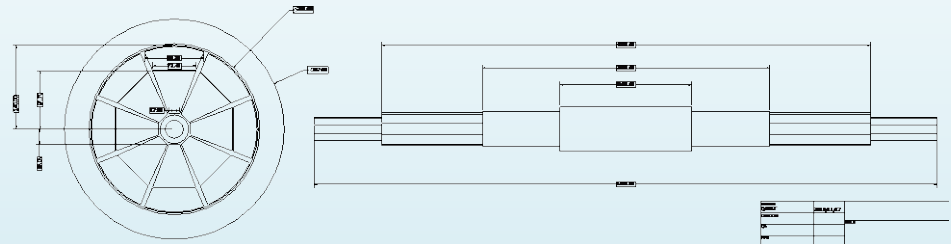
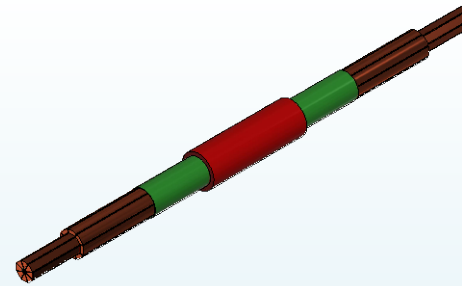
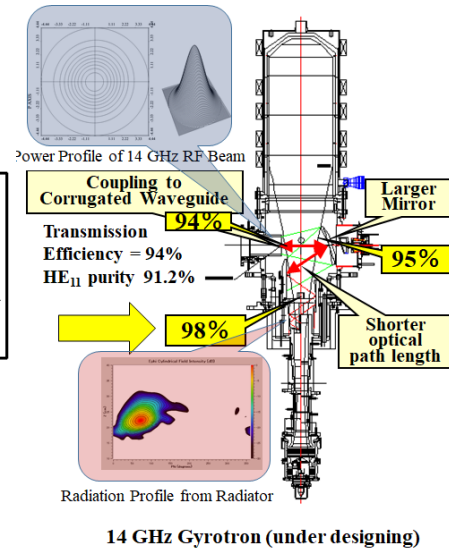
## High Field

双方向型共同研究・NIFS・東京大学



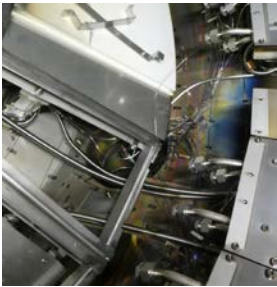
28 GHz  
η = 0.78  
η = 0.01 3D  
θ = 0.32 1m2

28 GHz  
η = 0.78  
14 GHz  
η = 0.40



# 新たな計測器

Flux loop on high T panel



Rogowski for High T use



HX detector with long heavy -alloy collimator



SDR for ECE heterodyne radiometer



Hall sensor



magnetic probe at CS post

reciprocating magnetic probe