

02Aa09

第37回プラズマ・核融合学会年会 2020年12月2日

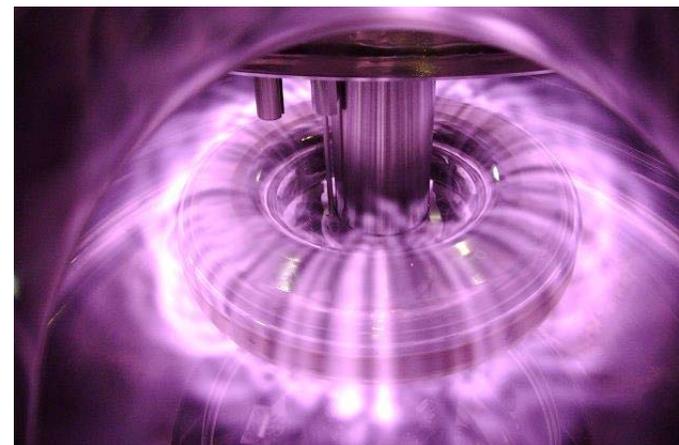
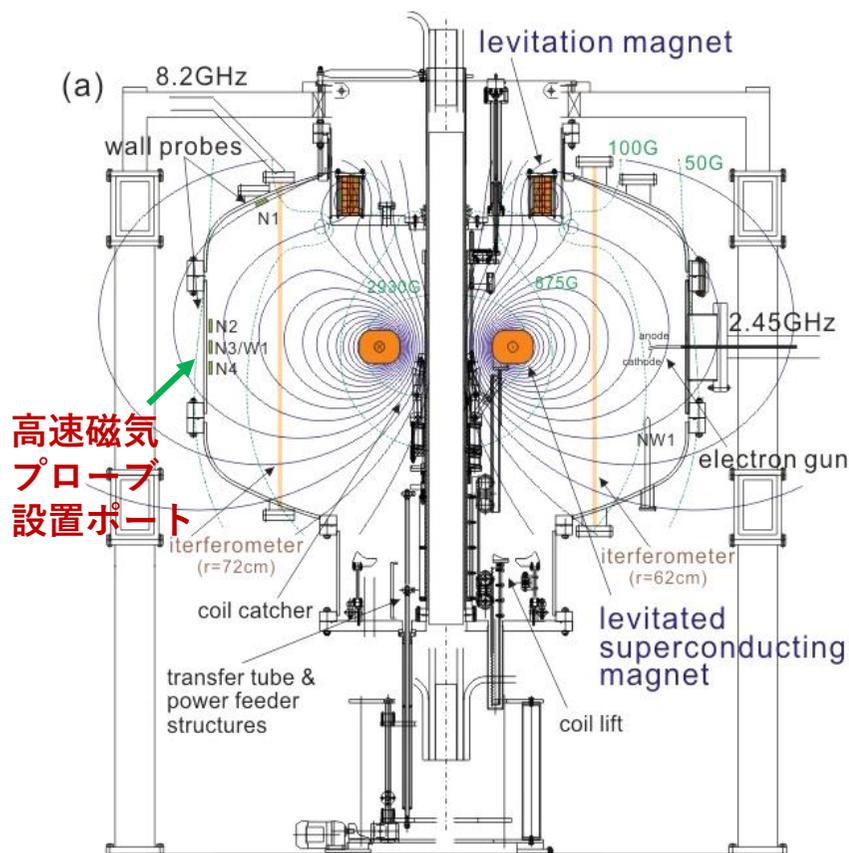


# 磁気圏型配位RT-1の高 $\beta$ プラズマにおける 高周波揺動の自発励起

東大新領域<sup>1</sup>, 核融合研<sup>2</sup>

齋藤晴彦<sup>1</sup>, 吉田善章<sup>1</sup>, 西浦正樹<sup>1,2</sup>, 鋸持尚輝<sup>1,2</sup>, 佐藤直木<sup>1</sup>, 森敬洋<sup>1</sup>, 上田研二<sup>1</sup>

RT-1では、磁気浮上超伝導コイルの作り出すダイポール磁場配位で超高 $\beta$ プラズマによる先進核融合を目指す研究を進めている\*



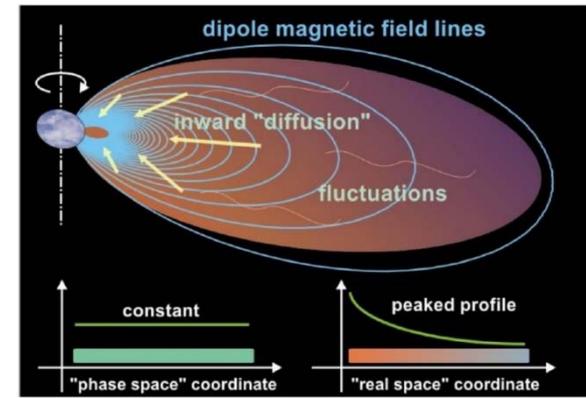
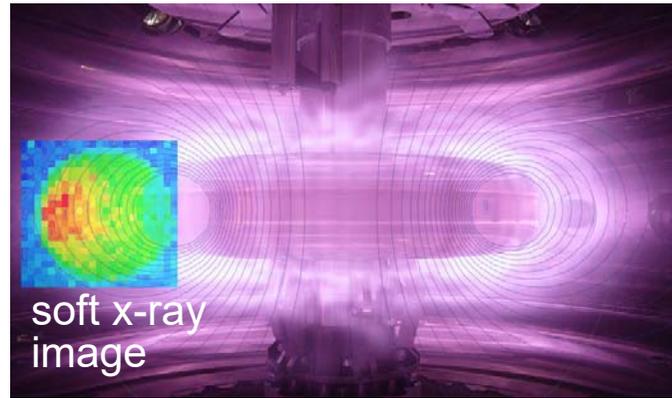
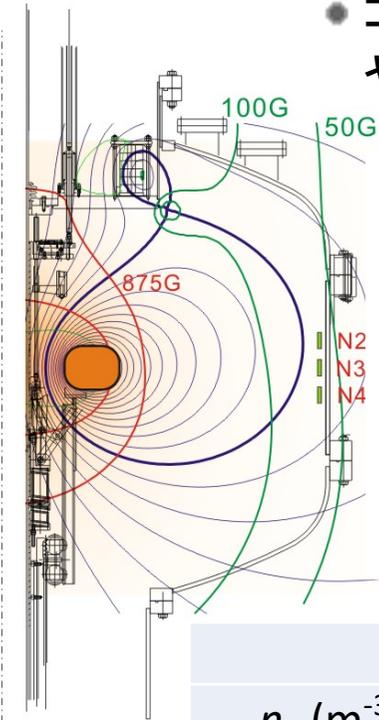
- 高温超伝導(Bi-2223)コイルをフィードバック制御により磁気浮上, 約6時間の無冷却運転
- 2.45GHz/8.2GHzマイクロ波によるECH, ICH
- 磁気計測, 分光, トムソン散乱, X線計測, コヒーレンスイメージング等の各種計測

- 先進核融合を可能にする超高 $\beta$ プラズマの閉じ込め原理確立, 流れを持つプラズマの自己組織化に関する研究を実施している
- ECHによる電子が圧力を担う高 $\beta$ プラズマ(局所 $\beta$ 100%)が生成される(~秒)

\*2006 Yoshida Ogawa+ PFR; 2010 Yoshida+ PRL; 2019 Nishiura Yoshida+ NF

磁気浮上コイルのダイポール配位では，放射線帯を持つ磁気圏に近い環境下で，波動粒子相互作用の実験室研究が可能となる

- コイル磁気浮上により擾乱を抑制した環境下で，温度非等方性やエネルギーの階層性を持つ高温電子ECHプラズマを生成



\*02Aa10 Kenmochi+

	RT1		Geomagnetosphere
$n_e$ (m <sup>-3</sup> )	10 <sup>16</sup> -10 <sup>17</sup>		10 <sup>6</sup> -10 <sup>9</sup>
$B$ (T)	5*10 <sup>-3</sup> - 5*10 <sup>-1</sup>	>>	10 <sup>-7</sup> -10 <sup>-5</sup>
$f_{pe}$	900 MHz - 3 GHz		9kHz - 300kHz
$f_{ce}$	140 MHz - 3 GHz		3kHz - 300kHz
$f_{pe}/f_{ce}$	1 - 6	~	1 - 10
$T_e$	thermal, ~keV, ~MeV		thermal, warm, relativistic
transport mechanism	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ up-hill/inward diffusion*</li> <li>▪ <b>wave-particle interaction</b></li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ adiabatic process (MHD)</li> <li>▪ <b>chorus mode (whistler)</b></li> </ul>

背景と目的: RT-1で従来からのkHz帯の揺動に加え, MHz帯域の揺動の性質とその波動粒子相互作用の解明を目指す

- 低周波(~トロイダルドリフト)揺動に関して, RT-1では内向き輸送と関連した解析を進め, ピークした構造の自己組織化との関連の理解が進展している  
\*02Aa10 Kenmochi+
- 一方, 磁気圏では, より高周波揺動と電子との相互作用による非断熱的加熱機構も, 相対論的粒子生成やプラズマの輸送に重要な役割を果たしている
- 地球や木星の磁気圏で, 幅広いエネルギーの電子と結合可能なwhistlerは放射線帯形成や変動, 電子のエネルギー階層構造を作り出す  
2008 Omura Kato+, J. Geophys.; 2015 Y. Miyoshi+, J. Geophys.; 年会12/1 シンポジウムI
- 非Maxwell分布や温度の非等方性は, 不安定性を駆動する自由エネルギーとなり得る. 磁気圏型装置における高 $\beta$ プラズマにおいても, こうした揺動と波動の粒子相互作用は, プラズマダイナミクスに寄与する可能性がある
- 磁気圏現象(宇宙天気)の実験室研究や超高 $\beta$ 状態の定常生成を目指し, まずは高周波領域で出現する揺動の特性や出現条件等を明らかにする

## Whistlerの分散関係とRT-1のECHプラズマでの予想パラメータ

R波の分散関係

$$\frac{c^2 k^2}{\omega^2} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + \omega_{ce})} - \frac{\omega_{pi}^2}{\omega(\omega + \omega_{ci})}$$

電子                      イオン

$$k^2 = \left[ \omega^2 - \frac{\omega_{pe}^2}{1 + \omega_{ce}/\omega} - \frac{\omega_{pi}^2}{1 + \omega_{ci}/\omega} \right] / c^2$$

(イオンの項は寄与せずガス種に依存しない)

$$\omega_{ce} = 1.76 \times 10^{11} B$$

$$f_{ce} = 2.80 \times 10^{10} B$$

$$\omega_{ci} = 2.39 \times 10^7 B(\text{He}), 9.58 \times 10^7 B(\text{H})$$

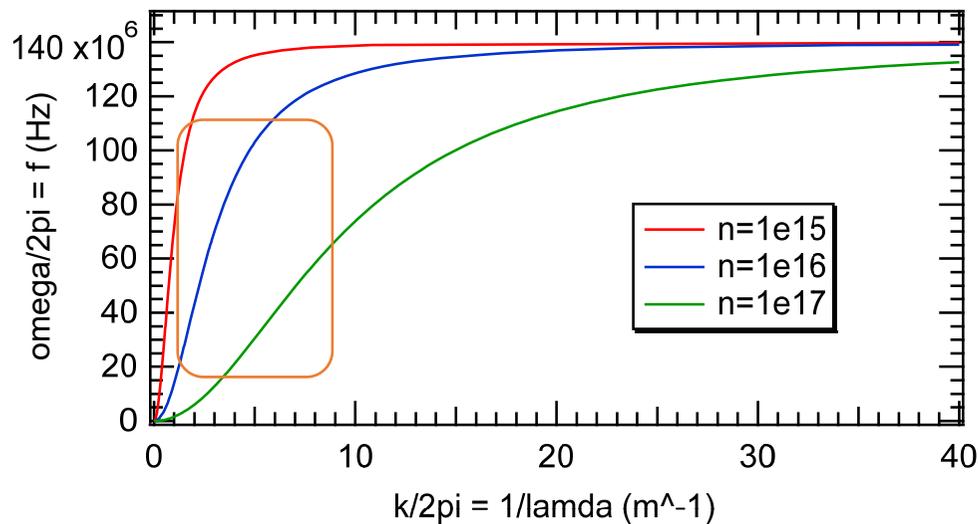
$$f_{ci} = 3.81 \times 10^6 B(\text{He}), 1.52 \times 10^7 B(\text{H})$$

$$\omega_{pe} = 56.4 \sqrt{n}$$

$$f_{pe} = 8.98 \sqrt{n}$$

$$\omega_{pi} = 0.33 \sqrt{n} (\text{He}), 0.66 \sqrt{n} (\text{H})$$

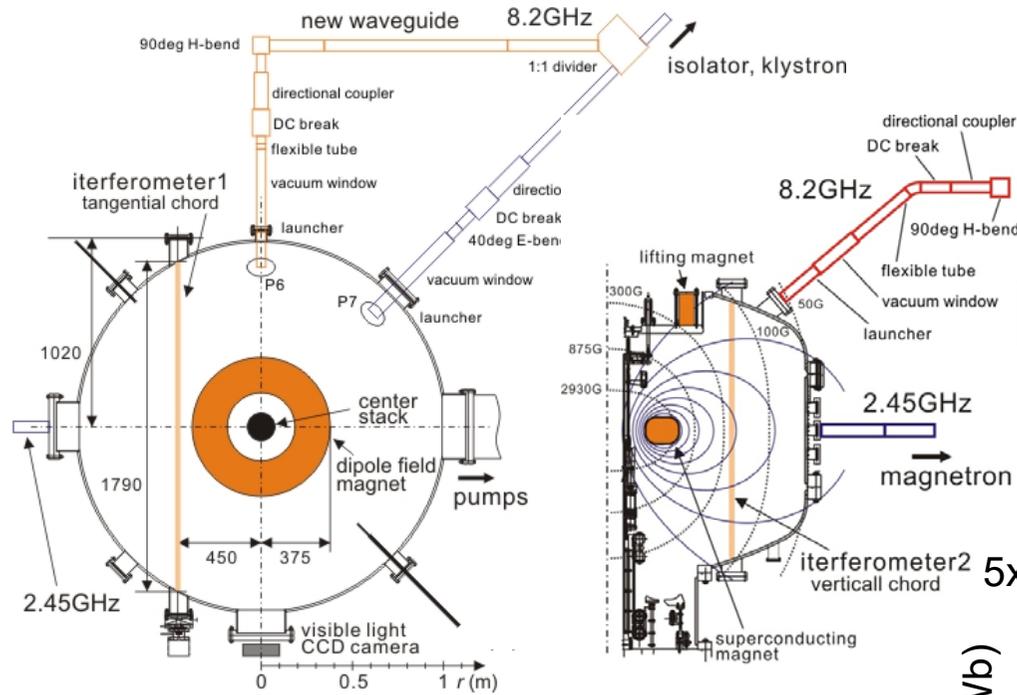
$$f_{pi} = 0.105 \sqrt{n} (\text{He}), 0.21 \sqrt{n} (\text{H})$$



閉じ込め領域周辺部のB=5mTに対し

 $f_{ce}=140\text{MHz}$   $f_{ci}=20\text{kHz}(\text{He}+)$  $f_{ce}$ 以下の20-100MHzの揺動に対して  
 $k/2\pi \sim 1-5$ , 波長は 1-0.2m程度となる

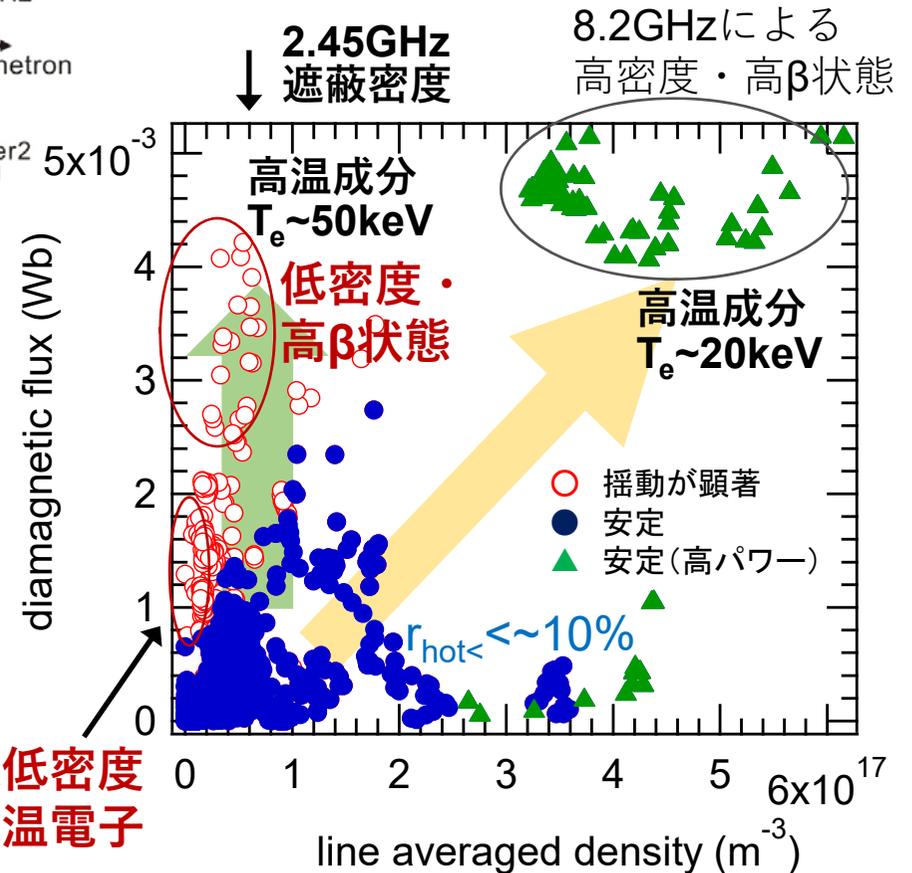
# RT-1のECHによる高温電子プラズマ実験のパラメータ領域



**8.2GHzクライストロン**  
(100kW, 1秒) 休止中

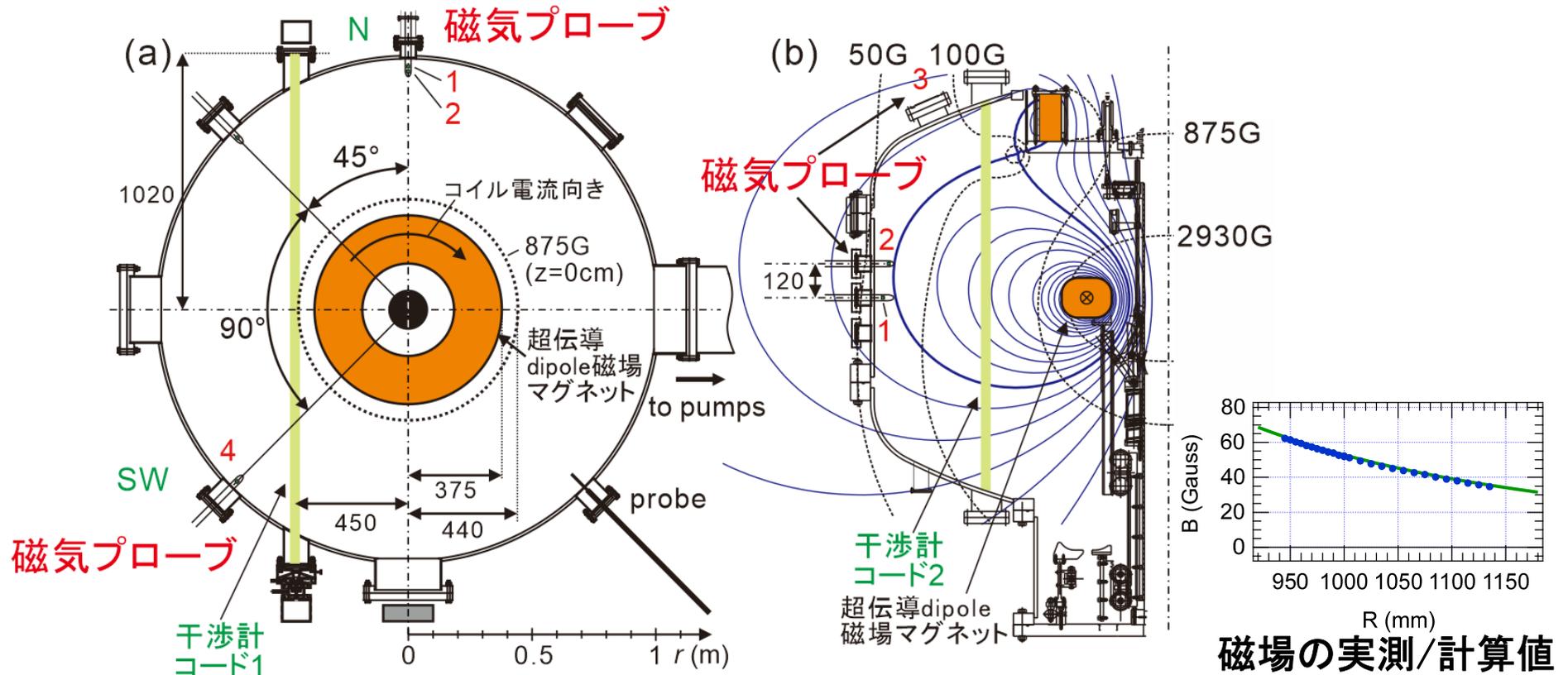
**2.45GHzマグネトロン**  
(20kW, 2秒)

- ECHにより高温電子がプラズマ圧力を担う高βプラズマが生成される
- 高温電子成分の割合を制御可能
- 特に高β時には、強い温度非等方性を示唆する傾向が見られる



**超低密度  
高温電子**

閉じ込め領域の周辺部 ( $B \sim 50\text{Gauss}$ ,  $f_{ce} \sim 140\text{MHz}$ ) に導入した磁気プローブ (逆巻きペア) により磁場揺動と静電揺動を計測



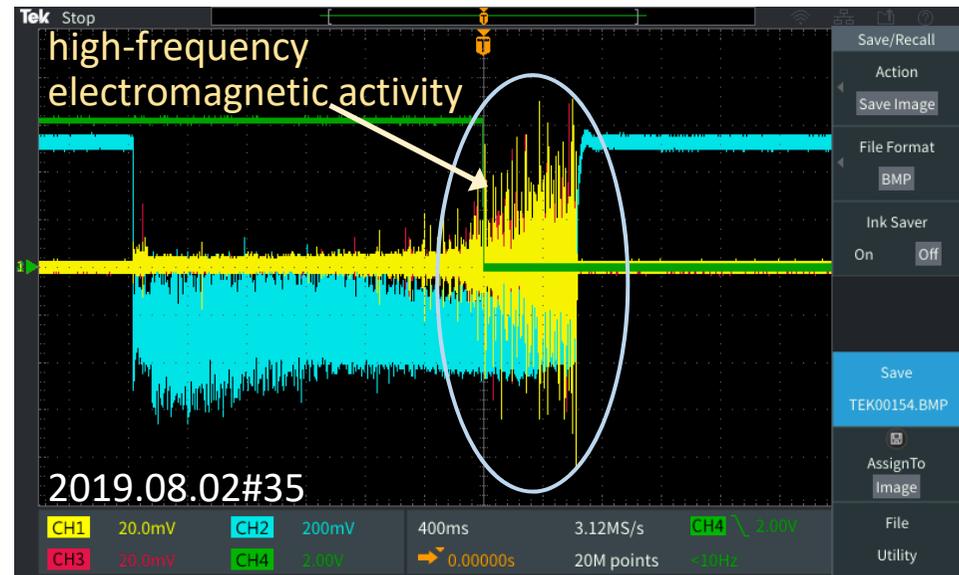
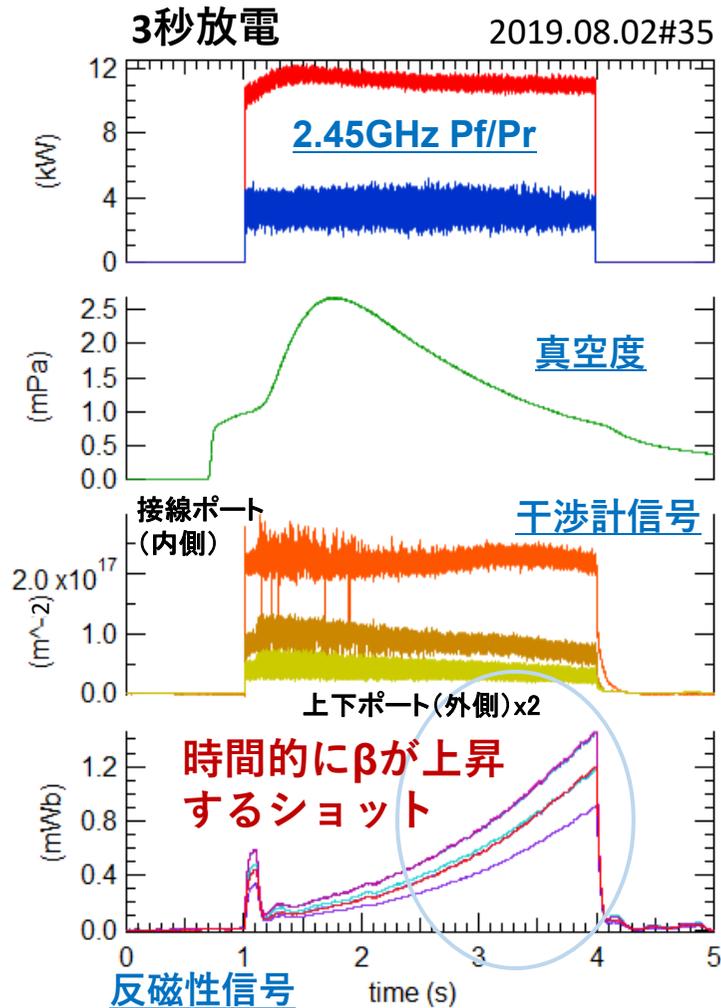
磁気プローブ No.1,2,3: 同一ポロイダル断面内, No.4: 別断面  
測定点の  $B=5\text{mT}$  に対して  $f_{ce}=140\text{MHz}$   $f_{ci}=20\text{kHz}$  ( $\text{He}^+$ )

- コイルループによる磁気プローブ (B dot probe)
- 同一場所で逆巻2chにより磁場と静電信号を区別可能



高温電子によるプラズマ圧力の立ち上がりに伴い、比較的高周波（fceの数十%程度の帯域）の揺動が自発的に励起される

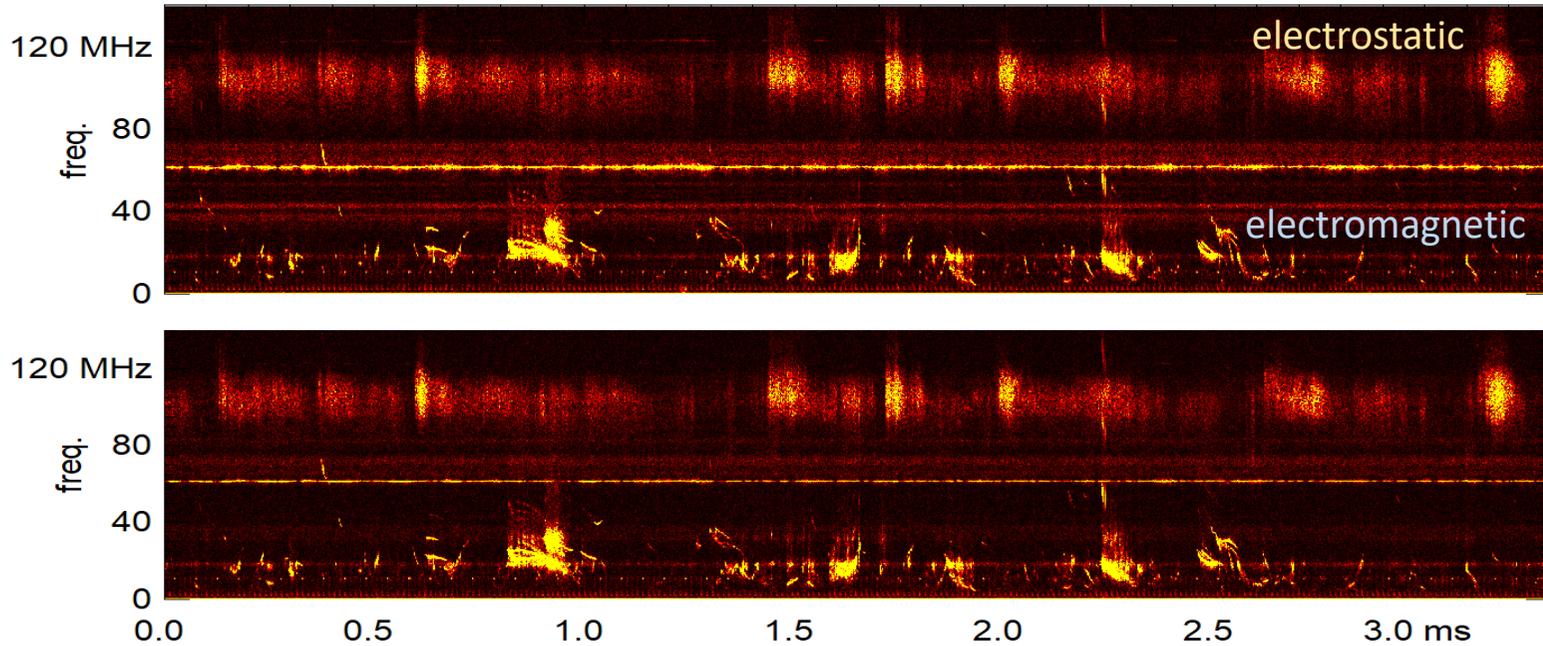
- 出現頻度がプラズマ圧力と強い相関を示す揺動が観測される。
- 入射電力と電子密度に大きな変動なく反磁性信号が立ち上がるショットで顕著。



ch1: 磁気プローブ1, ch2: 干渉計, ch3: 磁気プローブ2

- 3秒間のマイクロ波入射で、時間的に中性粒子密度が低下しプラズマ圧力が立ち上がるショット
- スパイク状の磁場信号が繰り返し観測され、異なるプローブ間で同期を示す

揺動はfceの数十%の磁場成分とfce付近の静電的成分から構成され、  
磁場揺動は時間的な周波数変化を示す

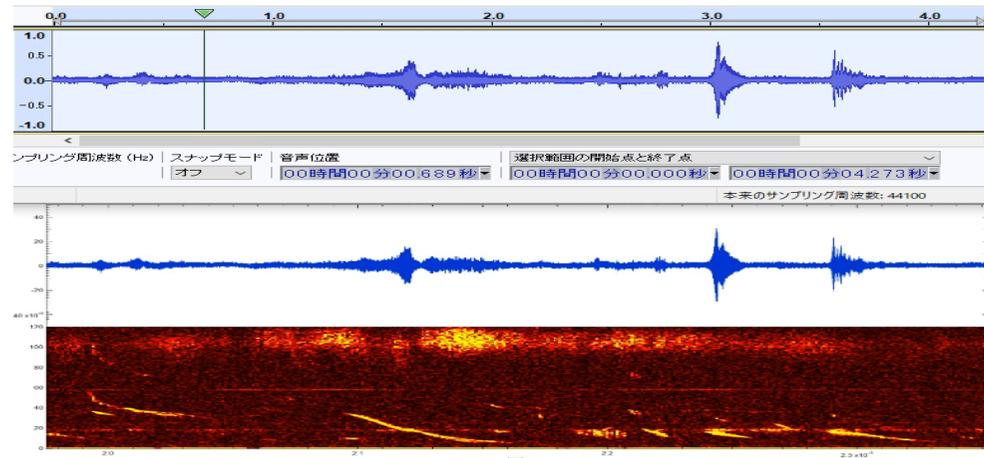
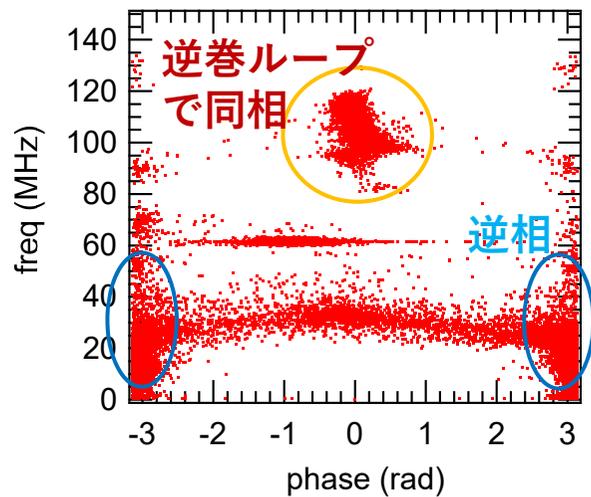


<- fce

<- noise

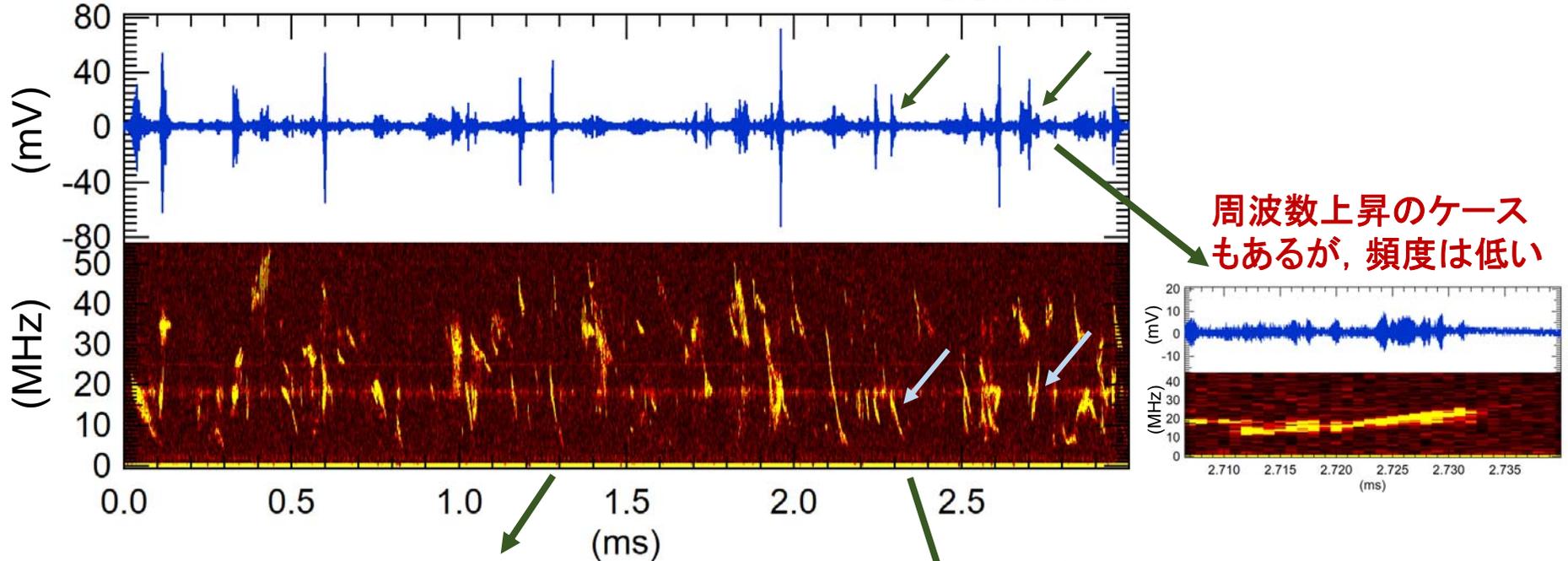
<- noise

<- noise

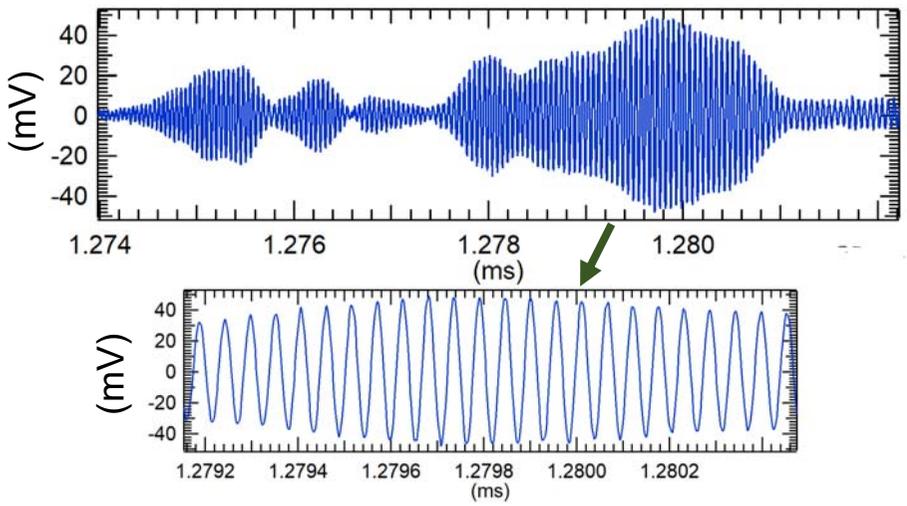


0.1fce~0.4fceに現れる間欠的に見える信号はコヒーレントな揺動から構成されており，多くが周波数の時間的変化を示す

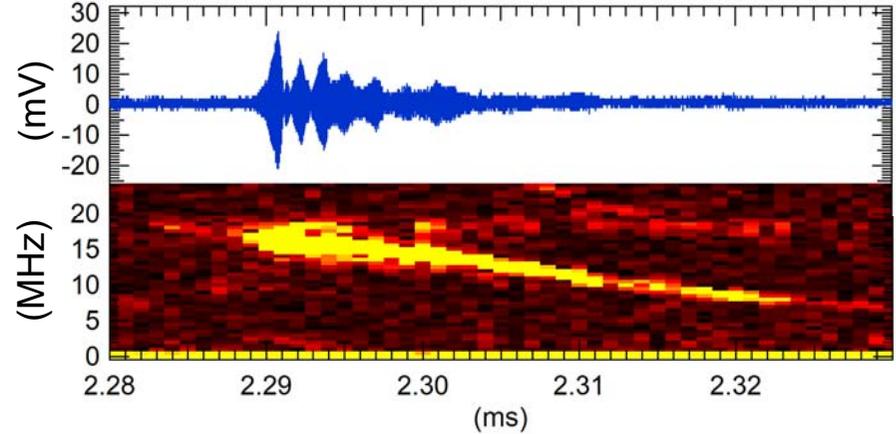
2019.06.25#34



コヒーレントな揺動の包絡線が見えている

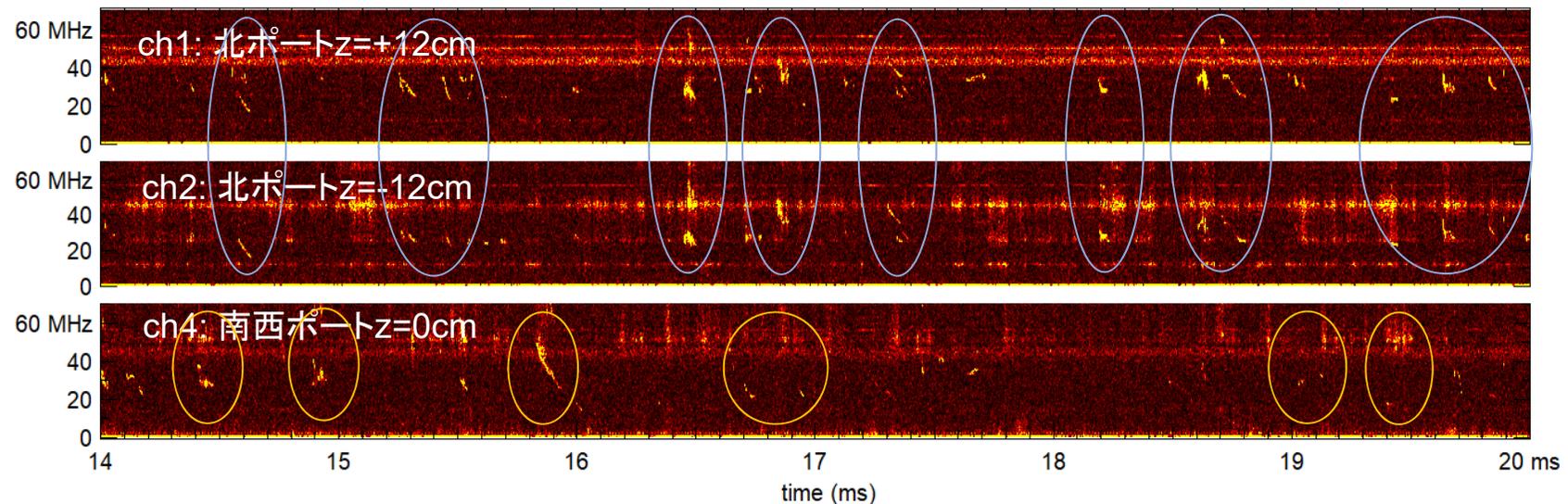
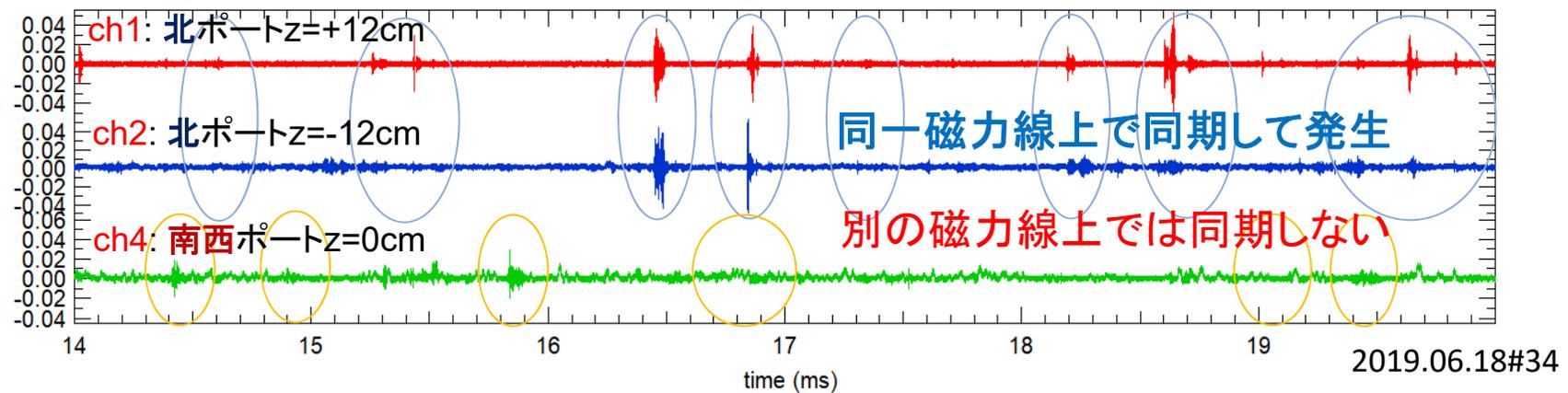
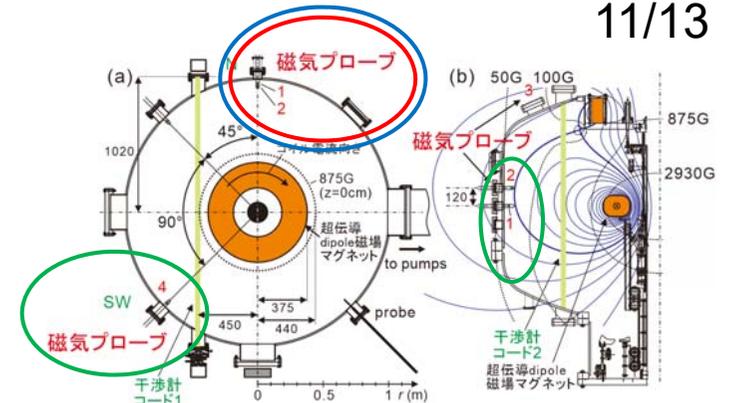


周波数が低下するケースが多い



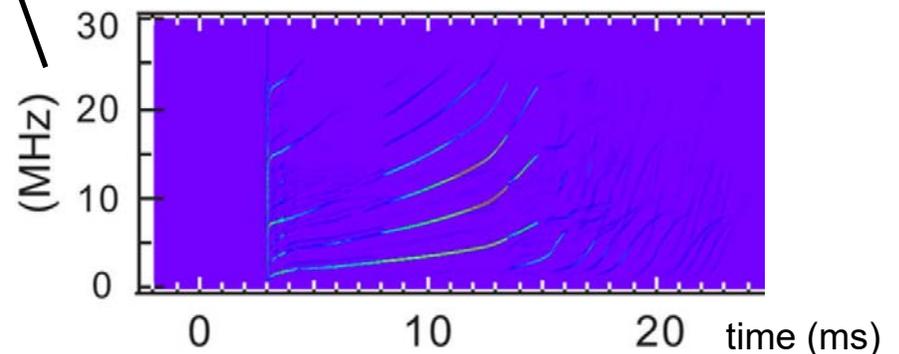
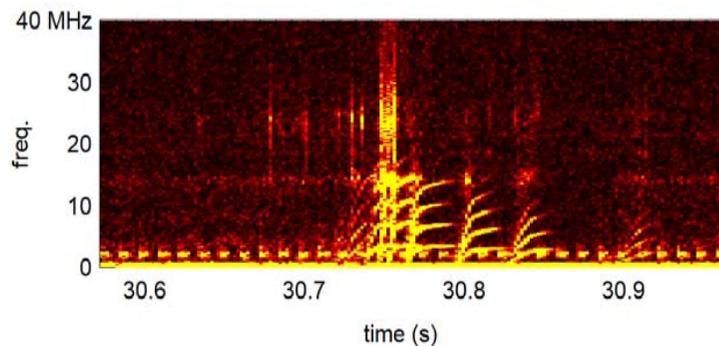
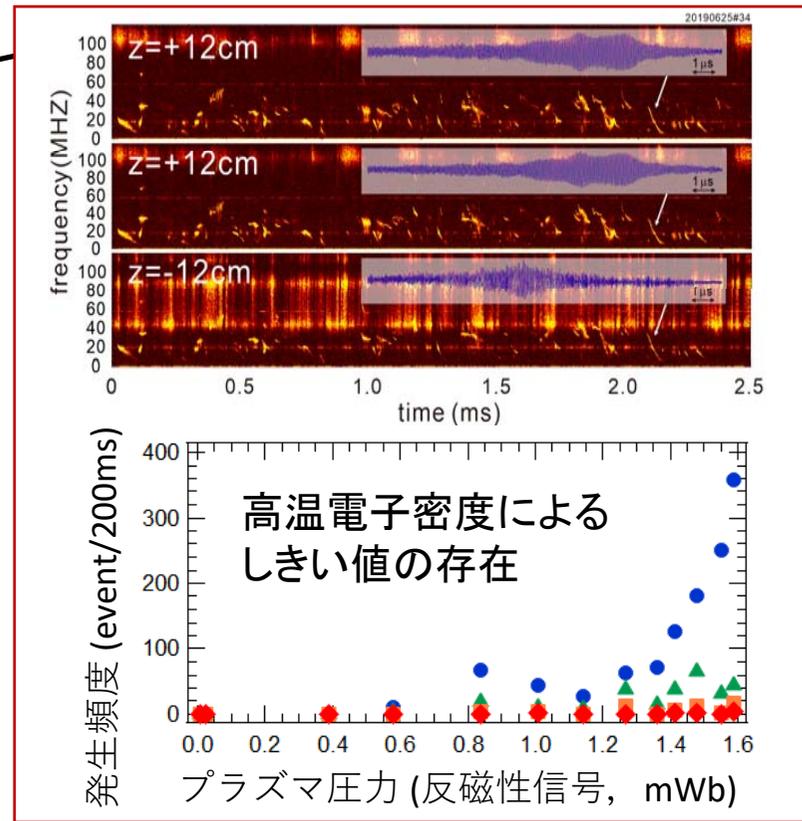
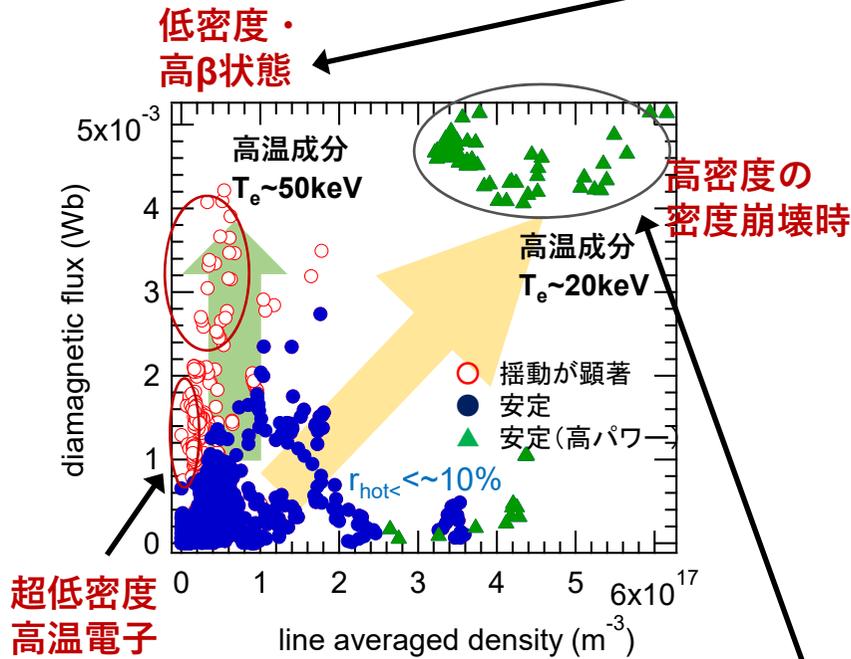
多点計測結果は、波動がダイポール磁場の磁力線に沿って伝搬する事を示している

- 同じポロイダル断面の同一磁力線上のプローブでは類似のイベントが観測されるが、トロイダル方向に異なる位置へは波動は伝わっていない



# Falling toneが主に観測される2.45GHz ECHによる高温電子 プラズマ生成の条件以外ではrising toneのモードも観測される

- 2.45GHz ECHによる中程度の電子密度,  
多くはdown chirpを示す



- 電子密度立ち上がり以前に観測される周波数上昇

- 8.2GHzの高密度プラズマの密度崩壊時

## まとめと今後の課題

\*02Aa10 Kenmochi+

- 磁気圏型配位RT-1で、内向き輸送と関連した低周波揺動に加え、高温電子が関連する $\text{sub} - \omega_{ce}$ 帯の磁場揺動の研究を開始している.
- ECHによる高温電子が圧力を担う高 $\beta$ プラズマ中で、 $f \sim 0.1-0.4f_{ce}$ 程度の間周波数帯 ( $f_{ci} \ll f < f_{ce}$ ) で間欠的に出現する揺動を観測した.
- 揺動はコヒーレントな磁場揺動であり、磁力線に沿って伝搬している.
- 周波数の時間的な変化(多くは周波数低下)が観測される場合が多く、分散を持つ電磁的なモードである: ホイッスラー波の特徴と一致.
- 高温電子成分の増大により、rising toneのchorus状の揺動も観測される.
- パラメータ領域の拡張を含む発生条件や機構, 分散関係, また加熱や輸送との関係の詳細を明らかにする必要がある.
- chorus modeとの関連や, 静電的な電子サイクロトロン波の探索.