

11aB2-2

物理学会2020年秋季大会, 熊本大学 2020年9月11日



磁気圏型配位RT-1の高 β プラズマ におけるホイッスラー揺動の自発励起

東大新流域, 核融合研^A

齋藤晴彦, 吉田善章, 西浦正樹^A, 釧持尚輝^A, 森敬洋, 横田侑己, 上田研二

惑星磁気圏/磁気圏型実験配位で観測されるプラズマ現象には、
複数種類の波動粒子相互作用が重要な役割を果たしている

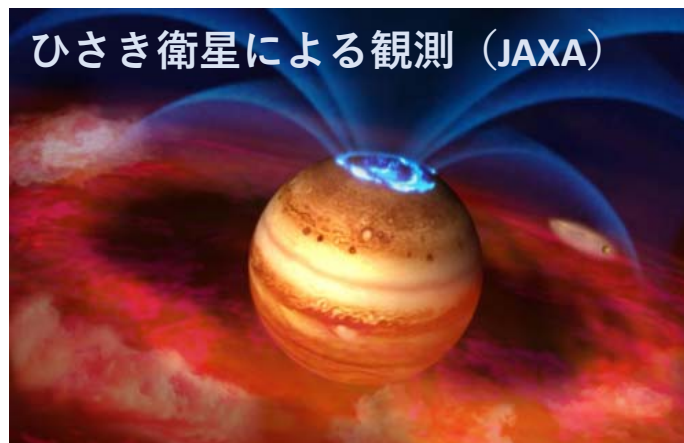
- 惑星磁気圏における放射線帯形成と磁気圏型配位による高 β プラズマ生成には、プラズマの自己組織化現象として共通する機構が伺われる。

- 低周波揺動が構造形成を駆動する「拡散」現象

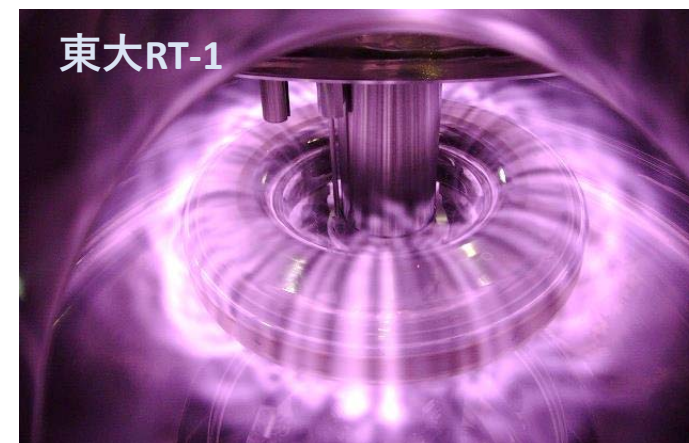
1974 Schulz & Lanzerotti; 2006- LDX
2005- RT (Yoshida, Nishiura, Kenmochi)
2020 Inagaki

- μ と J の保存を保ちつつ、第三断熱不変量 Ψ が非保存となる径方向輸送
- 強磁場領域へ輸送され粒子がエネルギーを得る(断熱的加速)

- 高周波の揺動との相互作用による高エネルギー電子の生成と輸送現象



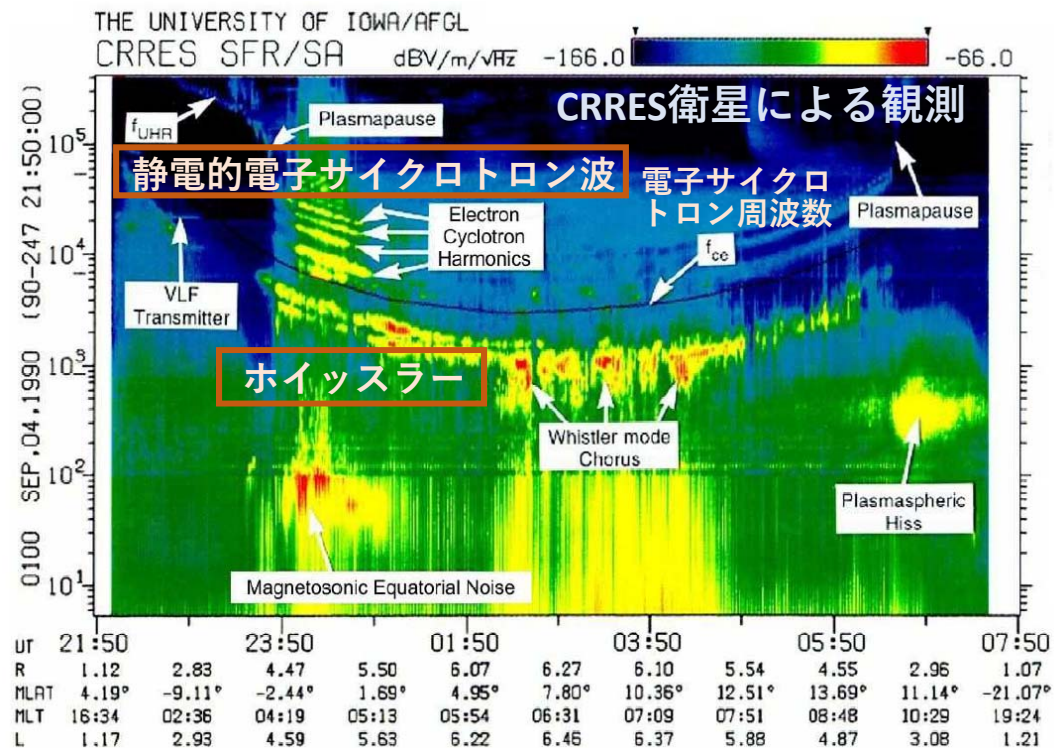
磁気圏現象の理解とspace weather応用



先進核融合を目指す高 β プラズマの実現

波動粒子相互作用は、粒子運動との結合を介して様々な現象を生み出し、プラズマとしてのマクロな構造や性質にも影響を与える

- 磁気圏では高周波領域まで多様な揺動モードが観測され、これらは相対論的電子を持つ放射線帯形成や、オーロラの出現や脈動(粒子輸送)を引き起こす。



太陽表面からのコロナ質量放出



荷電粒子の散乱/落下によるオーロラ

Whistler($< \sim f_{ce}$)や静電的電子サイクロトロン波($n \times f_{ce}$)は電子運動と結合し、粒子の加速とピッチ角散乱により相対論的電子形成やオーロラの脈動を駆動する

放射線帯形成や粒子加速の詳細は未解明 2002 Omura+; 2019 Miyoshi+; 2019 Katoh+;

- 波動粒子相互作用の解明は、先進核融合を目指す高 β プラズマ生成にも重要。

電子温度非等方性や非Maxwell分布により不安定化するwhistlerは、磁気圏型装置のECHプラズマ中で実験室研究が可能となる

- 電子温度の非等方性 ($T_{\perp e}$ が大きい場合)による不安定化

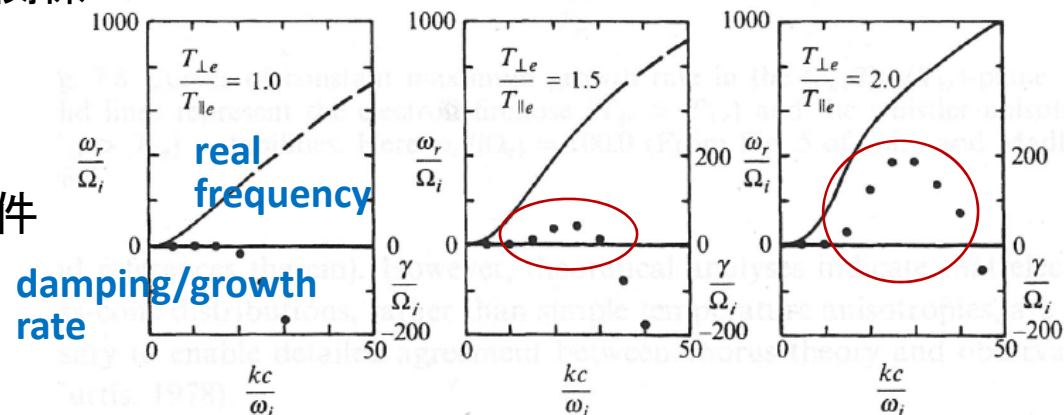
温度非等方性がある時のR波の分散関係

1966 Kennel Petschekより

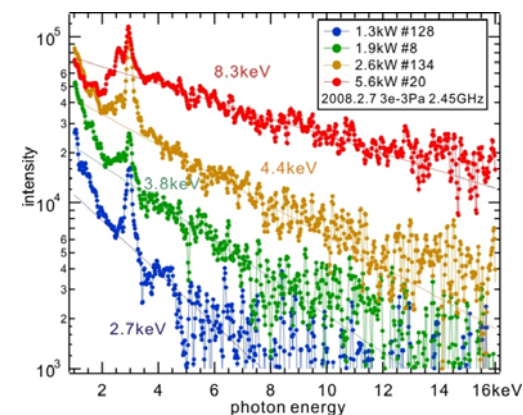
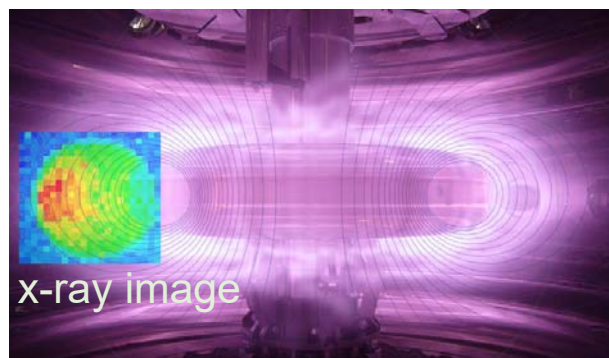
$$\omega_r \simeq k^2 c^2 \frac{\Omega_p}{\omega_p^2} \left[1 + \left(\frac{T_{\perp e}}{T_{\parallel e}} - 1 \right) \frac{\beta_e}{2} \right]$$

ホイッスラーモードが成長する必要条件

$$\frac{T_{\perp e}}{T_{\parallel e}} - 1 > \frac{1}{|\Omega_e|/\omega_r - 1}$$



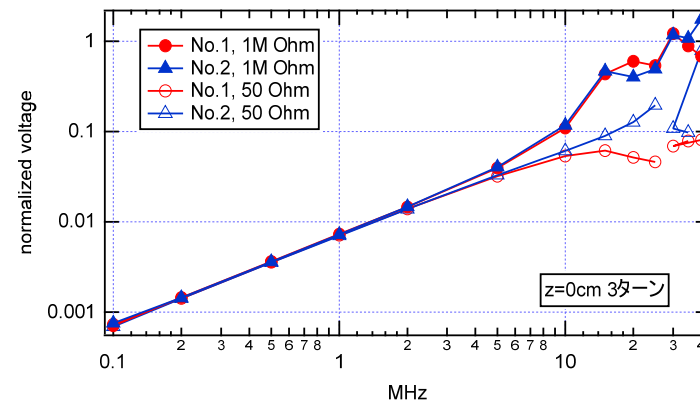
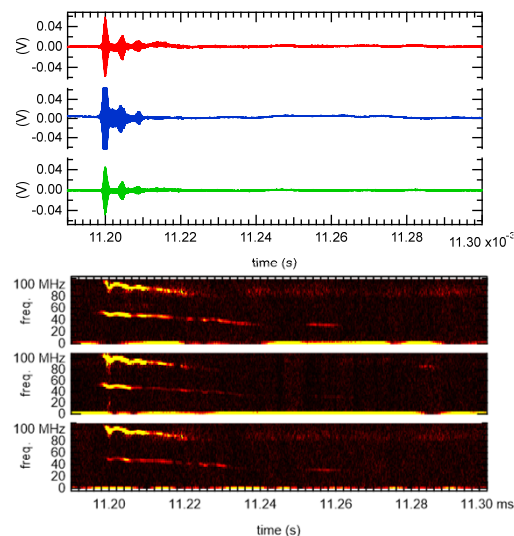
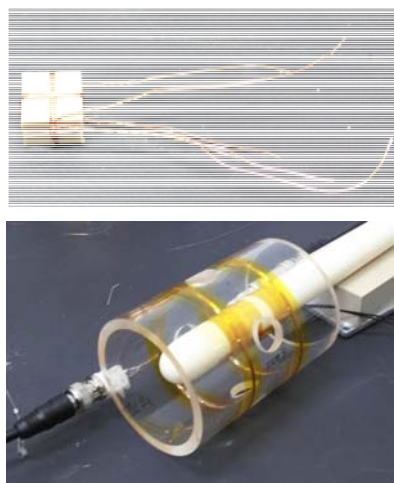
- 先進核融合を目指す磁気圏型装置RT-1の高温電子による超高 β プラズマ



- ➔ 磁気圏現象と等価な物理に着目した波動粒子相互作用の実験室研究
今回：異なるガス種の効果，エネルギー分析（加速の計測）の試み

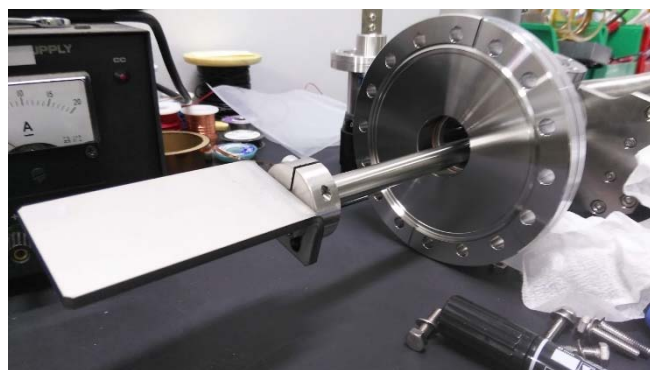
磁気プローブ更新による計測周波数帯の拡大，リミタの導入による揺動場所発生の探索，電子のエネルギー分析を進めている

- 高周波用磁気プローブ(自己共振周波数~180MHz)



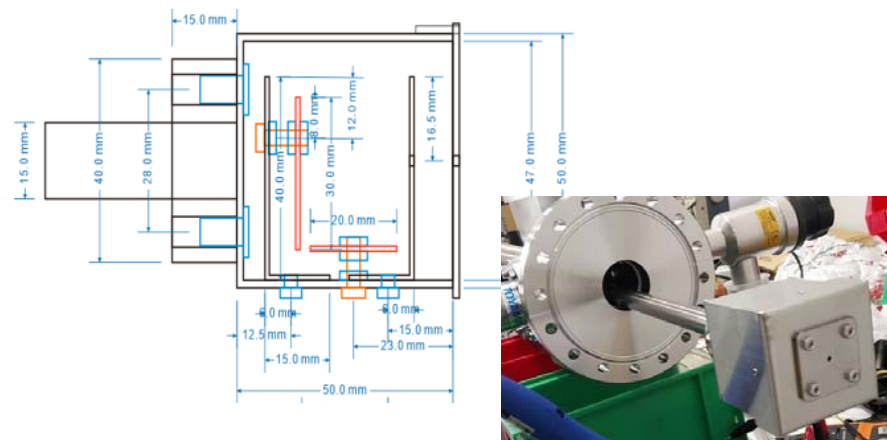
cf) 内向き輸送の低周波揺動~10kHz
(50MHz以上の帯域は改善中)

- リミタ (今回は報告しません)



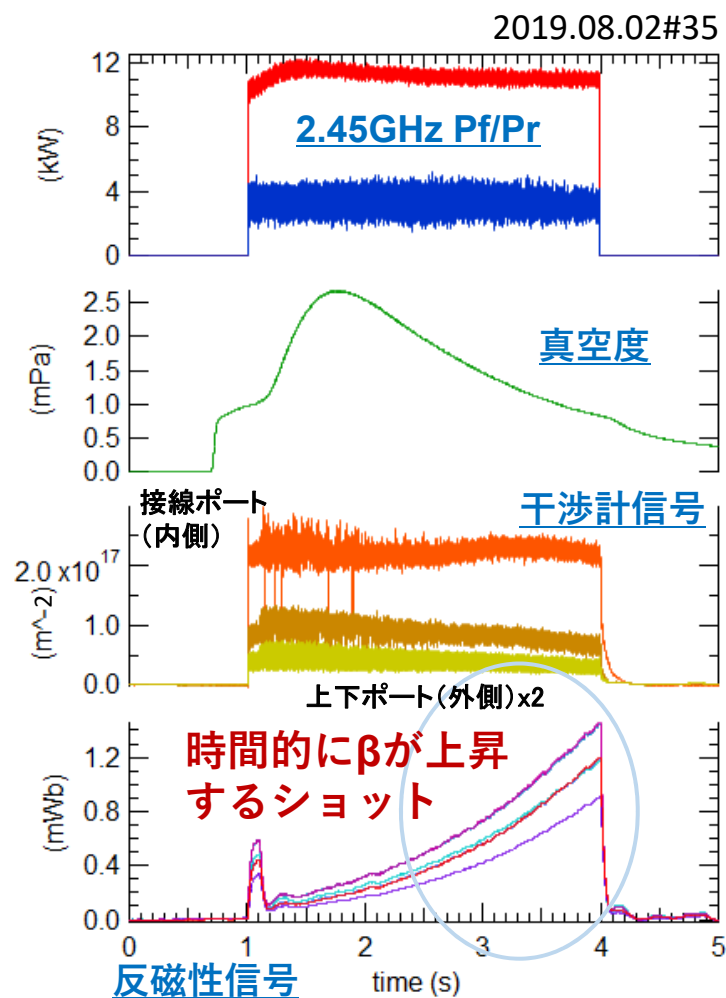
20us

- 電子のエネルギー分析

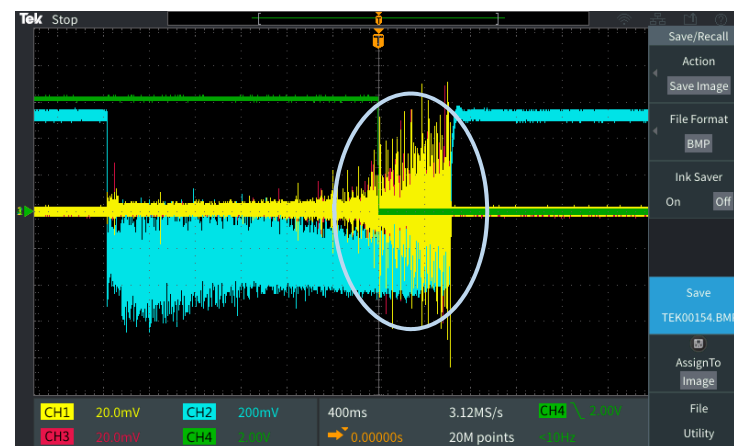


ECHにより反磁性信号/プラズマ圧力が立ち上がり高温電子成分の割合が顕著になる際、比較的高周波の磁場揺動が観測された

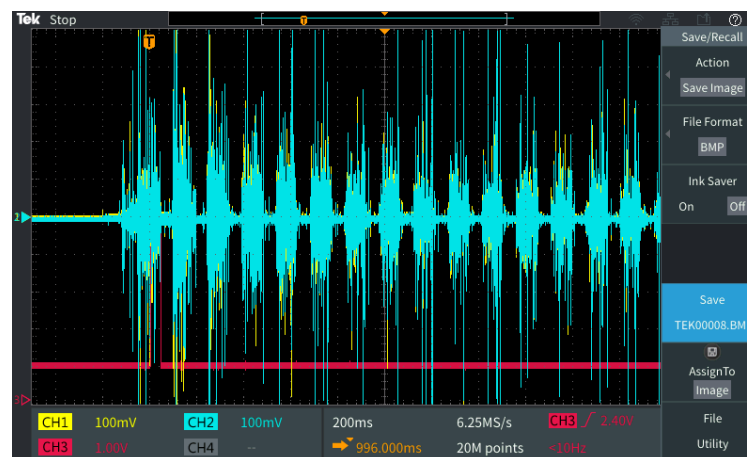
- 磁場揺動発生は高 β 時に限られ、かなり明確なしきい値を示す：高エネルギー電子が関わる不安定性を示唆している。



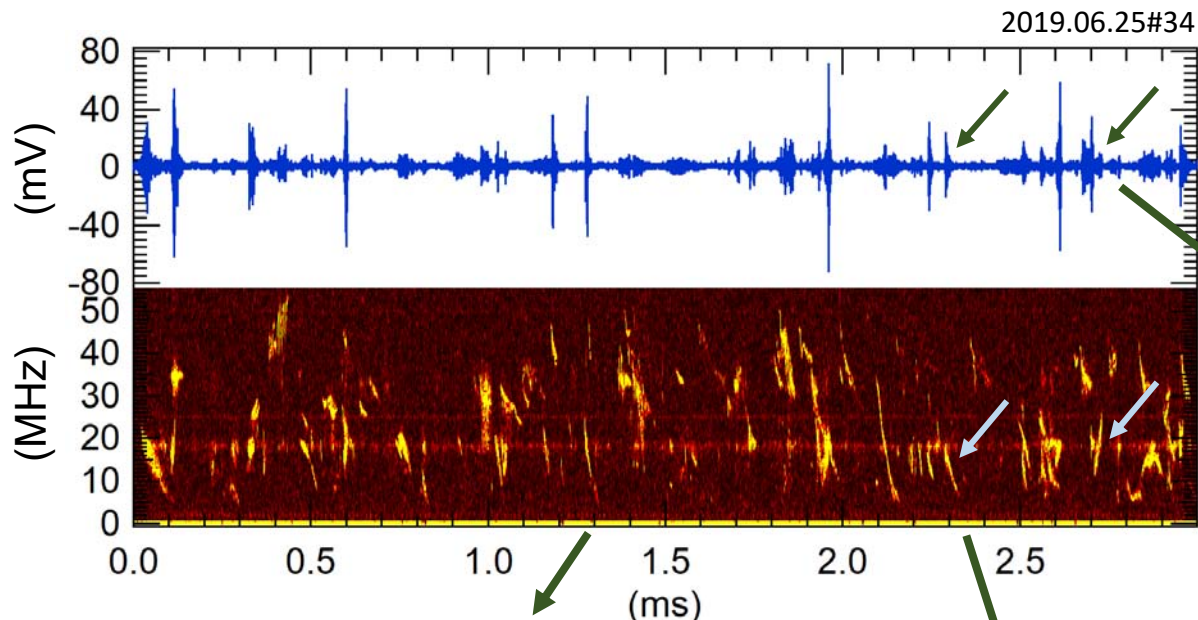
ch1: 磁気プローブ1, ch2: 干渉計, ch3: 磁気プローブ2



2.45GHz power の 8kW-6kW の modulation (しきい値の存在)

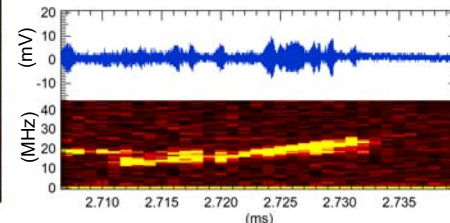


揺動の基本特性： $0.1f_{ce} \sim 0.4f_{ce}$ 付近にコヒーレントなモードが
間欠的に発生し，周波数の時間的变化（多くはdown chirp）を示す

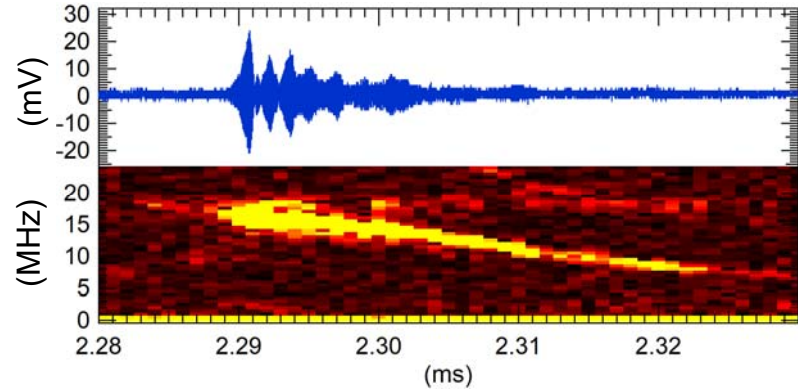


- 計測地点の磁場は約50Gauss
- $f_{ce}=140\text{MHz}$, $f_{ci}=80\text{kHz}$

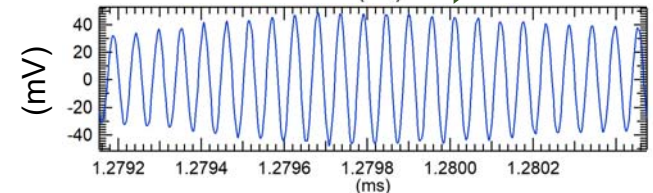
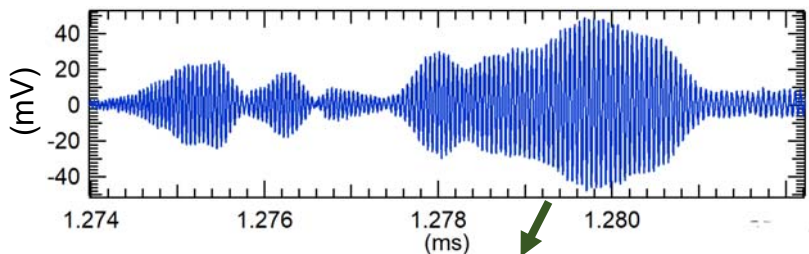
周波数上昇のケースもあるが，頻度は低い



周波数が低下するケースが多い



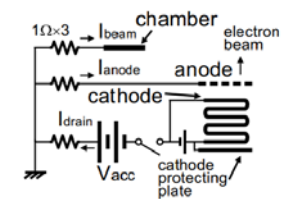
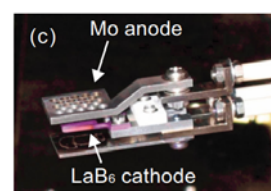
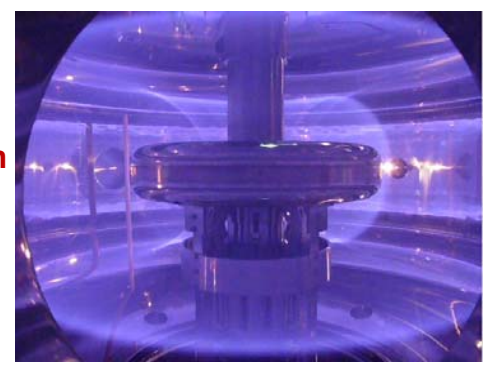
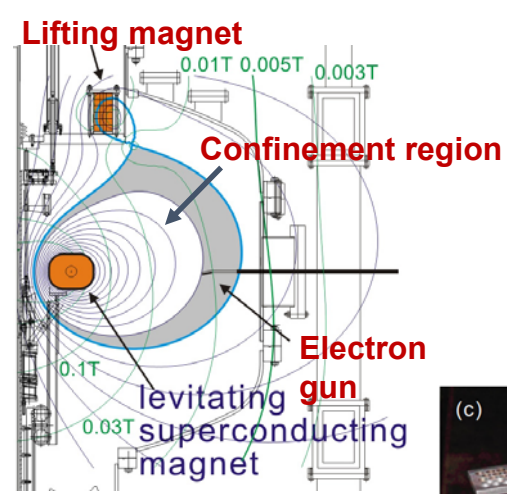
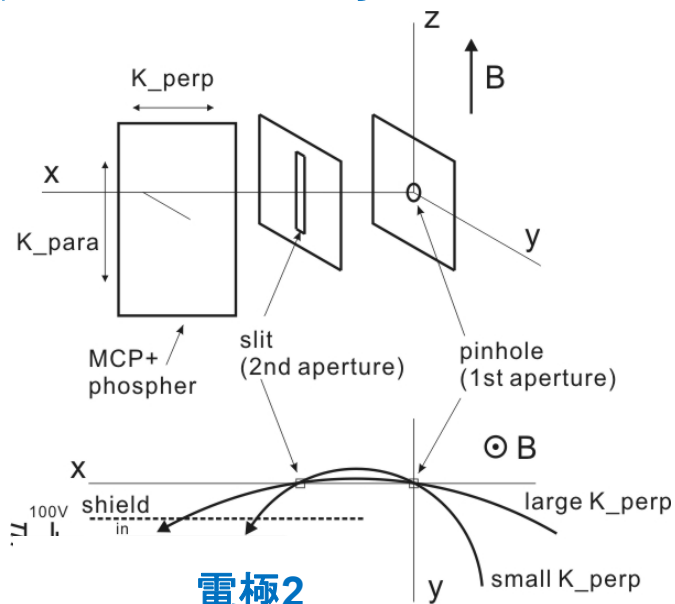
コヒーレントな揺動の包絡線が見えている



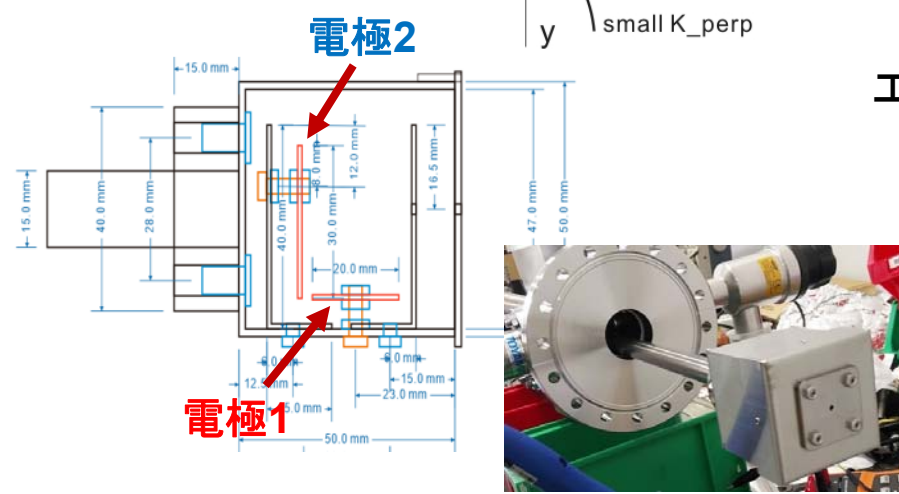
2.45GHz ECH 10 kW (1 s), He 1.0 mPa

電子サイクロトロン周波数より下に出現，
周波数変化は $df/dt \sim \text{MHz}/\mu\text{s}$ のオーダー

揺動発生時の高エネルギー電子検出を目的としたエネルギー分析器のRT-1への導入と電子ビーム入射試験

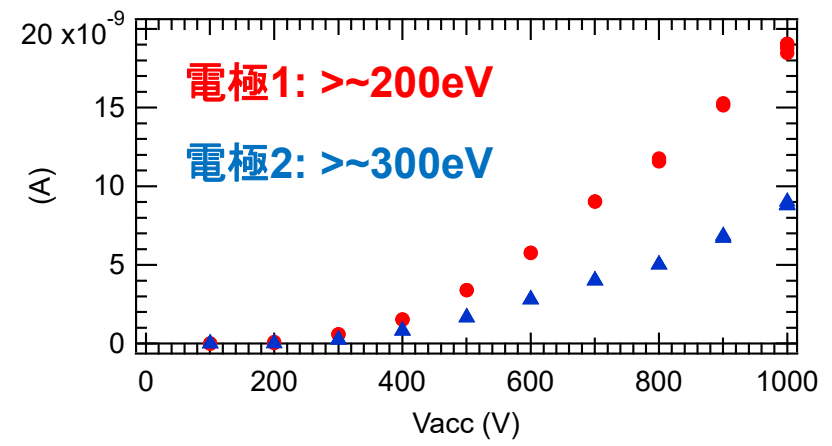


エネルギー可変電子銃による電子ビームの入射



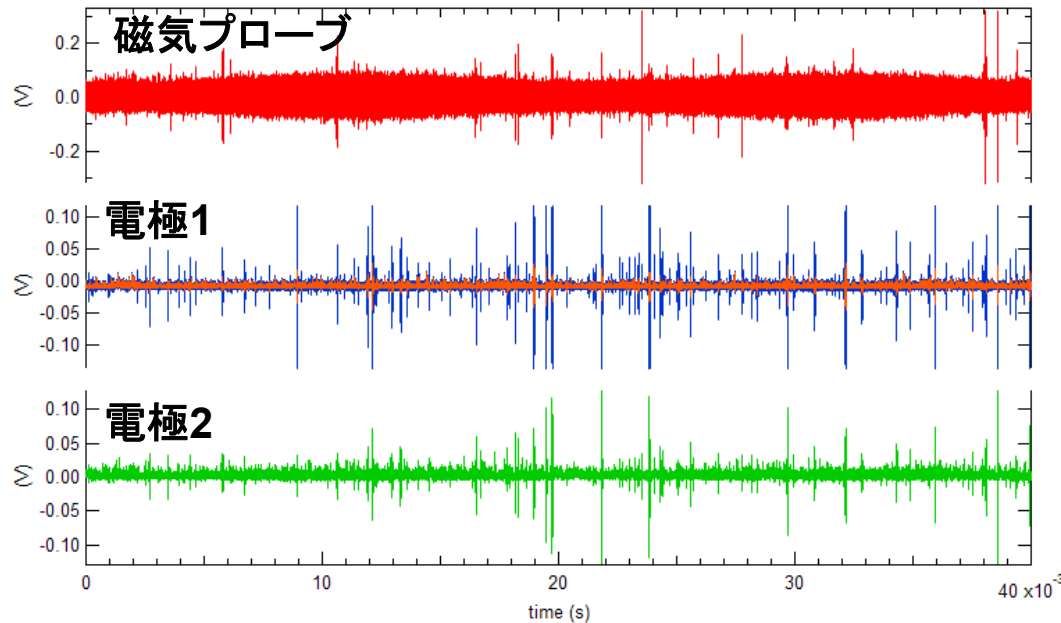
磁場を利用したエネルギー分析器

- 計測地点の磁場は約50Gauss
- $f_{ce}=140\text{MHz}$, $f_{ci}=80\text{kHz}$



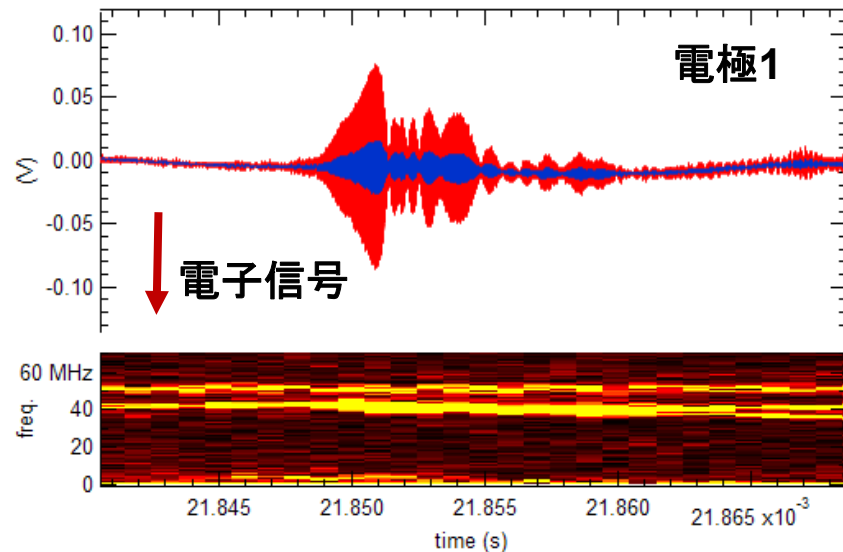
keV以下の中間エネルギー以上の電子に感度を持つ分析器で揺動前後のfluxを計測する

揺動発生時の高エネルギー電子検出を目的としたエネルギー分析器のRT-1への導入と、電子ビーム入射による校正試験 9/13

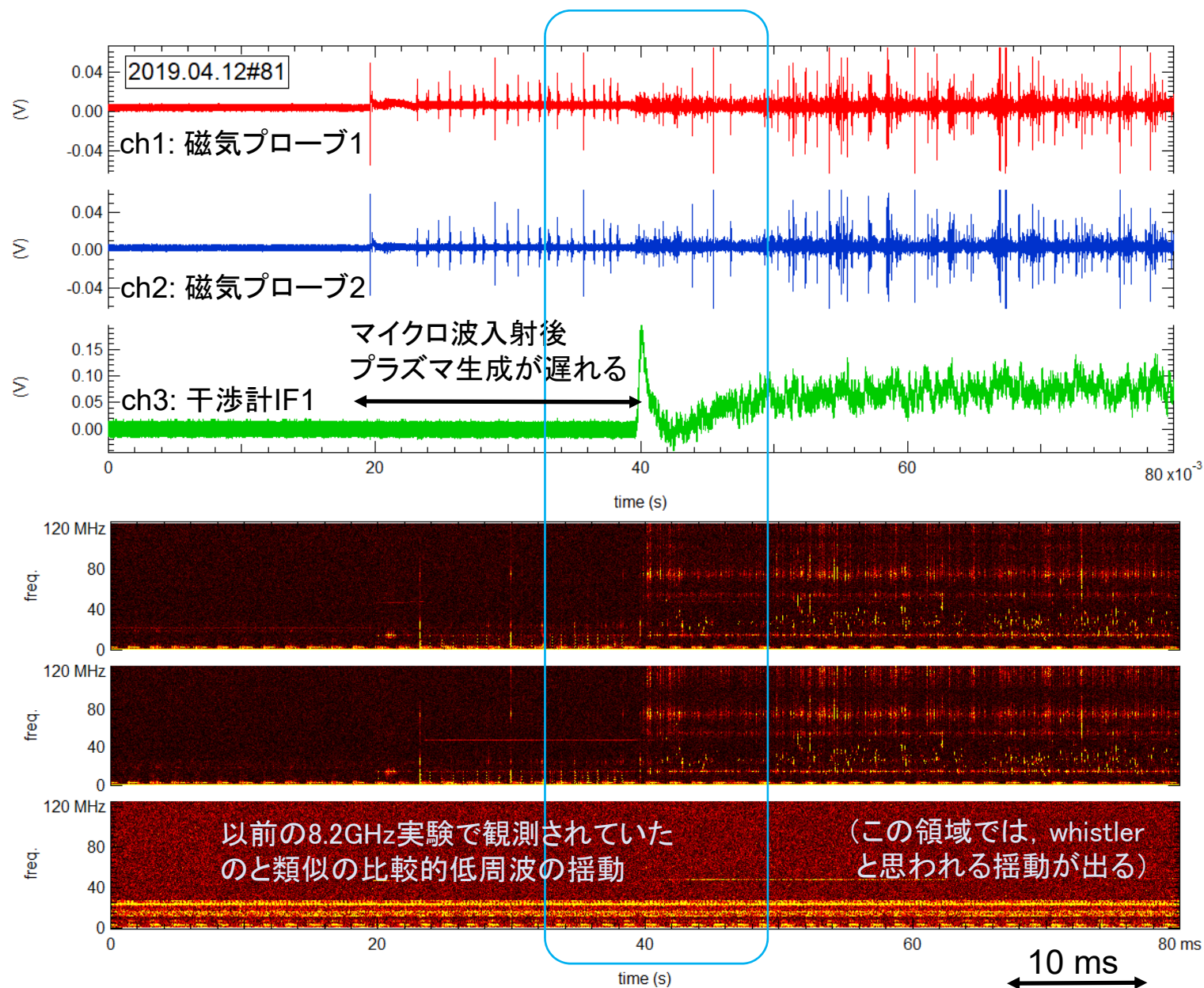


磁場揺動の励起と同期した信号が電極に受かるが、揺動の電場成分が主に見えてしまっている

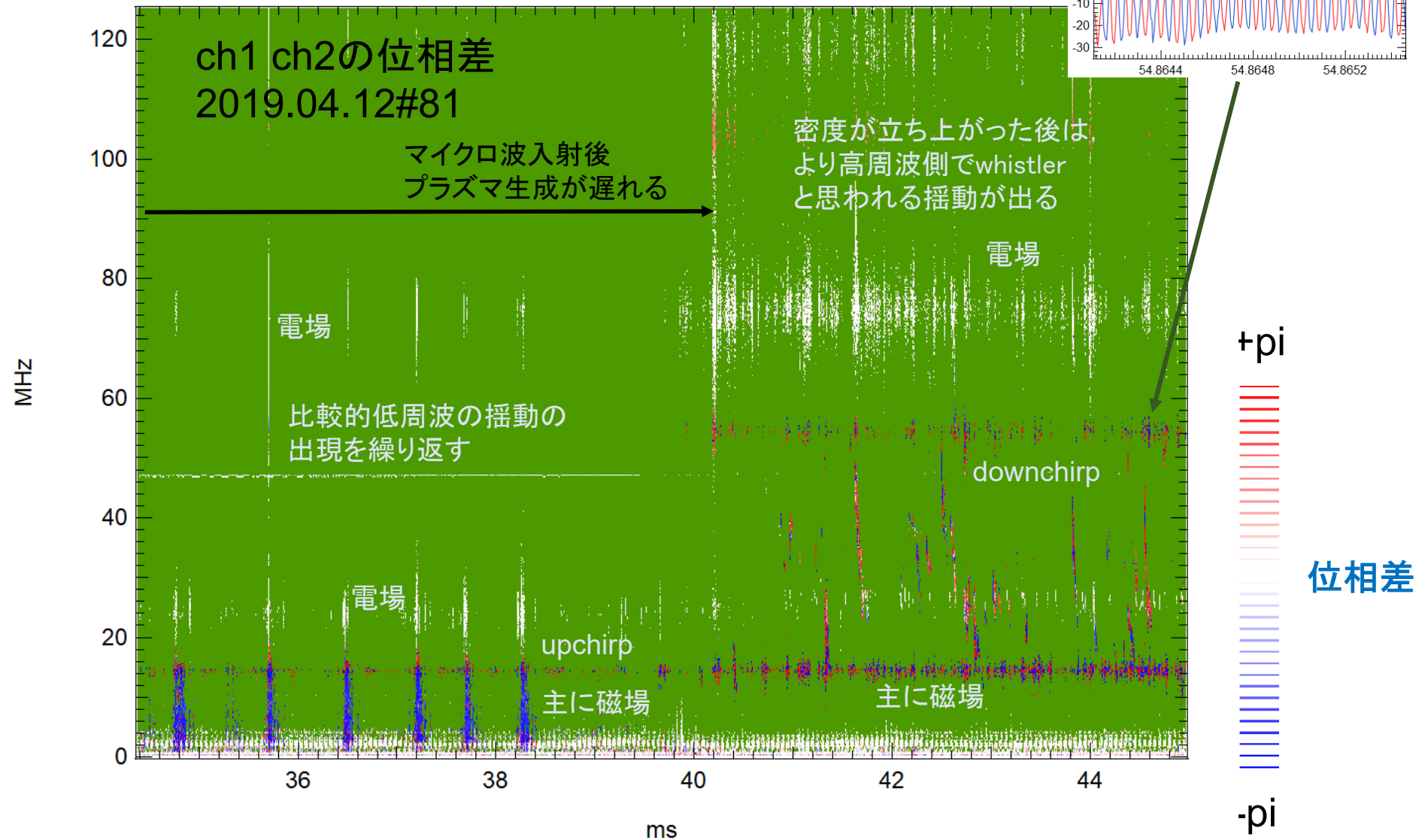
揺動の前後に、電子fluxの入射側にDC的な信号が受かることがあるが、現在のノイズ環境では断定できていない



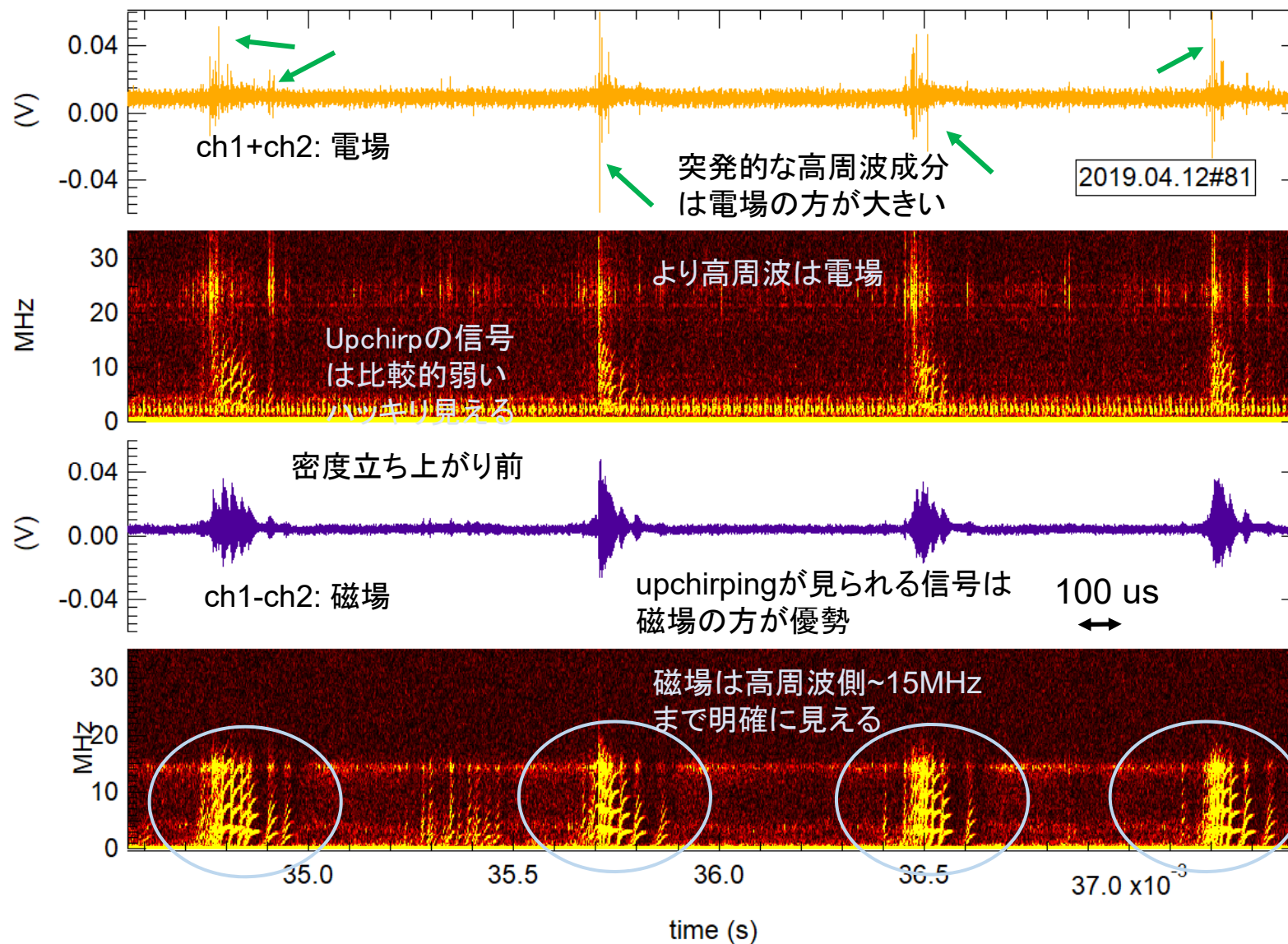
高温電子が顕著な際のRT-1の高 β プラズマでは中間周波数帯でホイッスラー以外と思われるモードの磁場揺動が観測される



マイクロ波入射から放電開始までのギャップ時、極めて低密度の状態では磁場揺動が繰り返し発生している



低密度状態での磁場揺動の周波数スペクトルはChorusモードと類似したような磁場揺動が観測される



まとめと今後の課題

- RT-1において、磁気圏現象（低周波揺動に加え、電子のサイクロトロン運動と結合する波動粒子相互作用）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 β プラズマ中で、 $f \sim 0.1-0.4f_{ce}$ 程度の中間周波数帯 ($f_{ci} \ll f < f_{ce}$) で間欠的に出現する揺動を観測した。コヒーレントな磁場揺動が磁力線に沿って伝搬している。
- 揺動周波数はガス種に非依存。
- 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、強い分散を持つ電磁的なモード（R波）の性質を示している。
- こうした波動が、ダイポール磁場配位におけるプラズマ中で自発的に（外部から波動励起を行わなくとも）発生する。
- 今後の課題： エネルギー分析，分散関係，駆動条件，他の揺動モード