

# 磁気圏型高 $\beta$ プラズマの 高周波揺動を伴う密度崩壊の観測

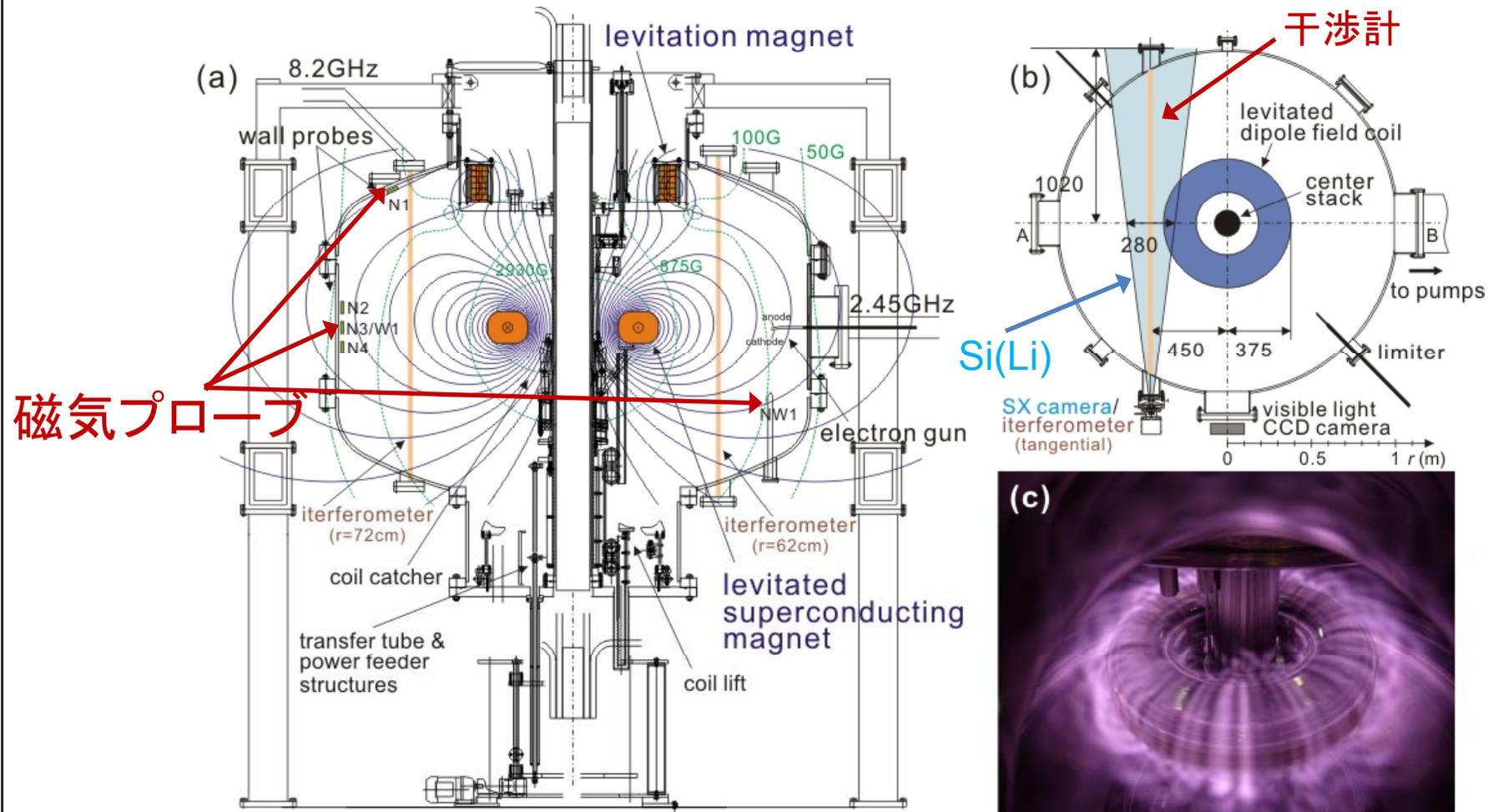
東大新領域

齋藤晴彦, 吉田善章, 森川惇二, 矢野善久, 河井洋輔, 小林真也, 三上季範, G.フォーゲル

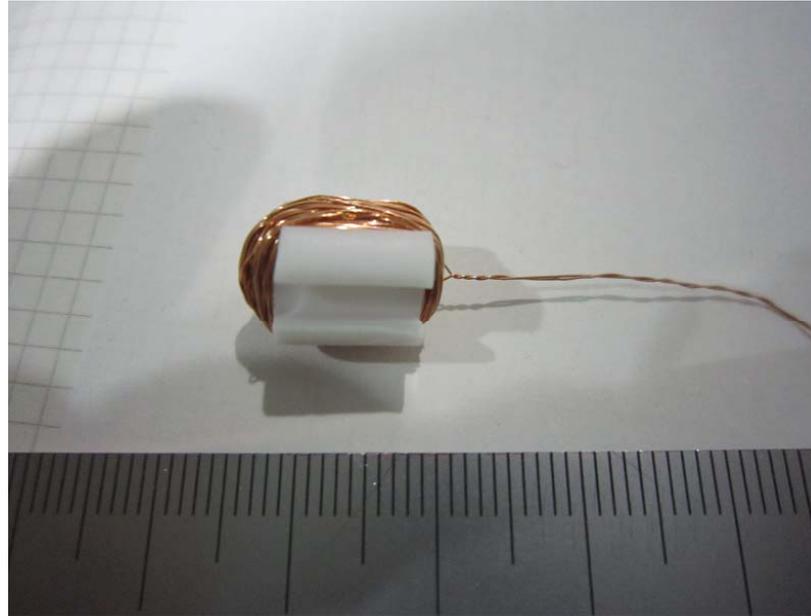
- 目次
1. 研究背景と本研究の目的
  2. RT-1の装置概要と計測系
  3. 高温電子による高 $\beta$ プラズマの実現と揺動の出現
  4. 揺動の各種特性と出現条件
  5. まとめと今後の課題



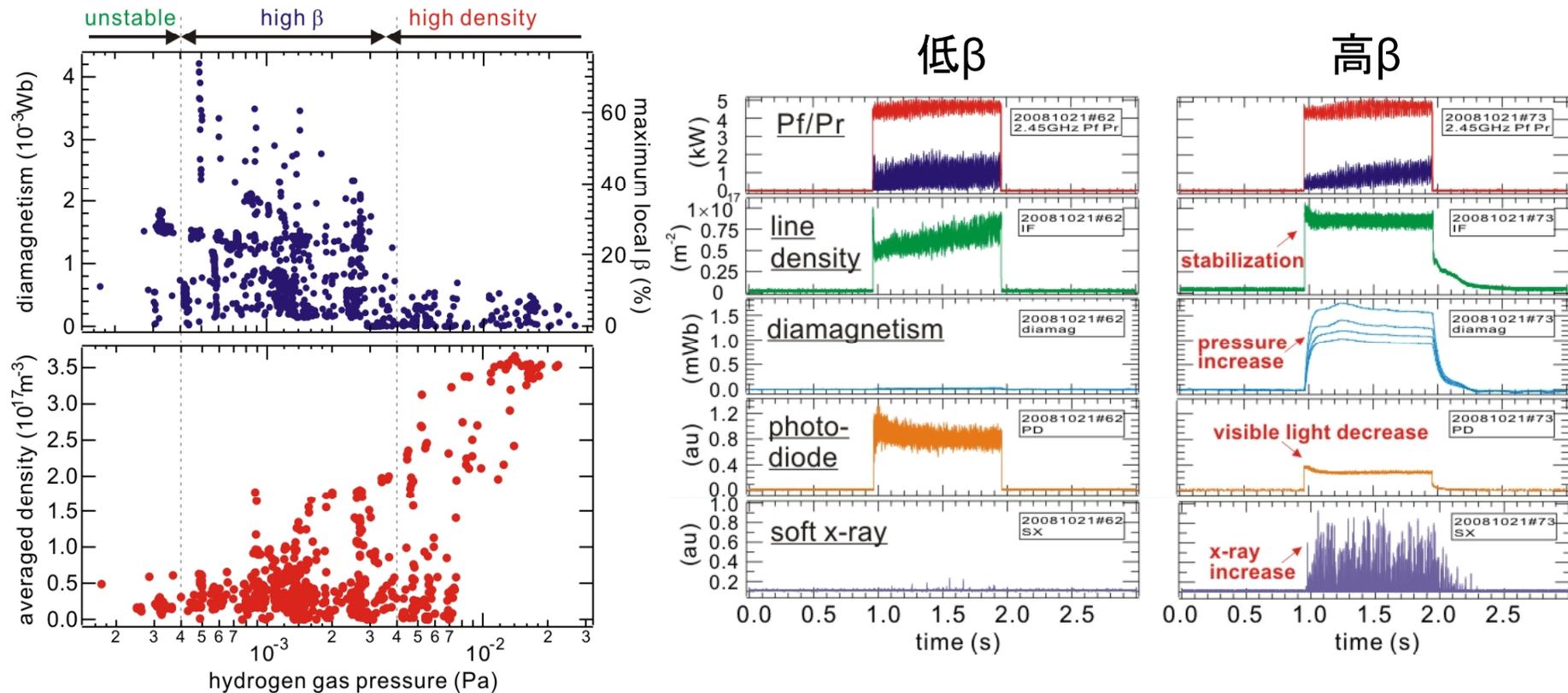
- 磁気圏型配位RT-1では、ECHにより加熱された高温電子が圧力を担う高 $\beta$ プラズマ(局所 $\beta$ は70%に達する)の生成に成功している。
- RT-1における高 $\beta$ プラズマは、先進核融合を目指す高温プラズマの基礎研究として、また磁気圏現象の理解の観点からも興味深い研究対象である( $\beta$ 限界、磁気面を横切る粒子輸送、粒子加速、それらを伴うサブストーム等)。
- これまでのRT-1の実験によれば、封入ガス圧を $10^{-4}$ Pa台程度まで低下させる事で高温電子成分が顕著に増大(主成分)し、高 $\beta$ 状態が実現されている。
- $10^{-4}$ Pa台付近以下の圧力ではプラズマの生成状態が不安定となり、 $10^{15}\text{m}^{-3}$ 程度の低密度状態や、安定生成中/マイクロ波停止後のプラズマの急速な損失が観測される。この時、強い硬X線や電磁ノイズ(機器の誤差動等を生じる)の発生が確認されており、何らかの過程による急速な粒子輸送を示唆している。その過程を明らかにする事は、プラズマのさらなる高性能化を実現する上で重要。
- プラズマ密度の急速な崩壊時(または高密度高 $\beta$ 状態が維持されない時)、高温電子のトロイダルドリフト周波数に近い電磁揺動が観測された。
- 本研究では、揺動の不安定化に伴う密度崩壊過程を実験(磁場及び静電プローブによる揺動とflux計測)的に調べ、抑制するための条件を明らかにする。



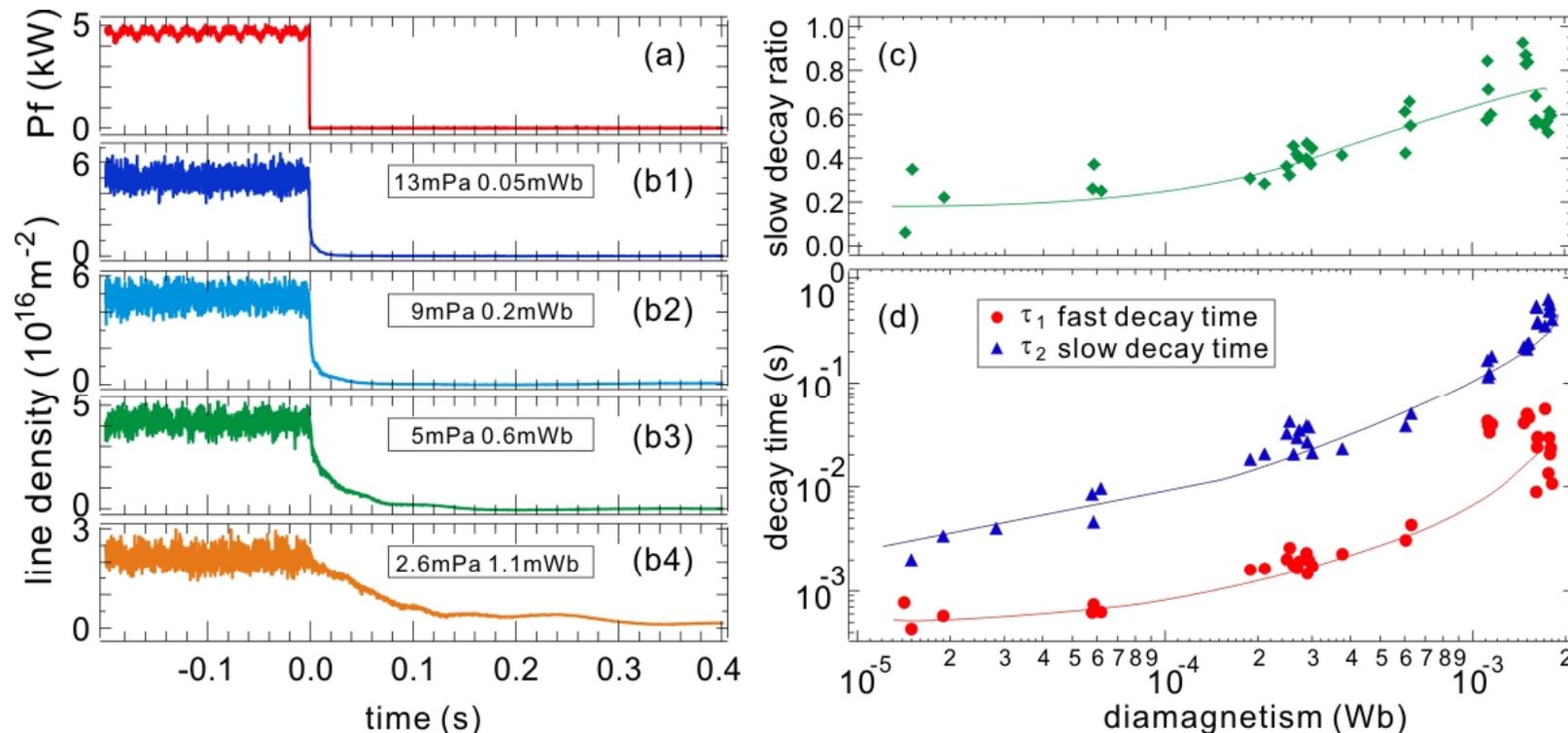
- Ring Trap 1 (RT-1): **磁気圏型プラズマ閉じ込め実験装置**
- Bi-2223線材を使用した**高温超伝導磁気浮上マグネット**
- ~20MHz帯域の磁気プローブ (pickupコイル) 計測を実施



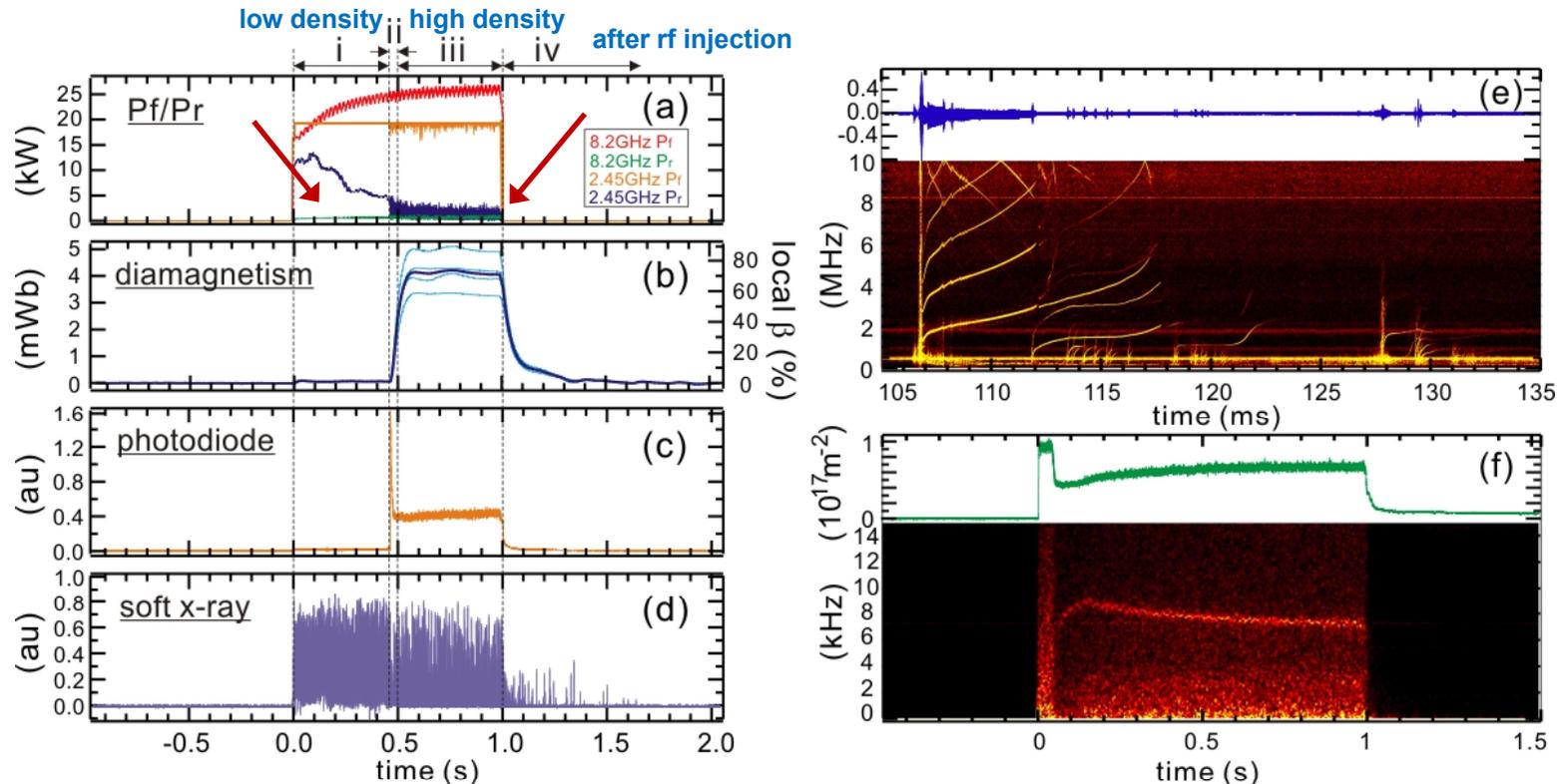
- 10x7mm, 100turnのpickupコイルを, 比透磁率の小さい支持構造(テフロン巻き枠とセラミック管)で保持し, 真空容器内部のプラズマの外部/周辺部に配置.
- Feed through近傍に設置した100MHz帯域の高速バッファ回路を介して20MS/sの高速A/Dでデータ取り込みを行い, 低ノイズで10MHzまでの磁場揺動計測を実施する. 4箇所設置.



- 封入ガス圧の最適化 (0.5mPa前後)により, X線増大と可視光強度の減少を伴う反磁性信号の増大, 高 $\beta$ 化が実現される(高温電子プラズマ).
- より低ガス圧力の条件では, 安定なプラズマ生成が困難になり, 間欠的な放電や低密度状態の持続, **密度と圧力の急激な崩壊**が観測される.
- 高温電子が主体となるさらなる高 $\beta$ 化を実現する上での障壁となっている.

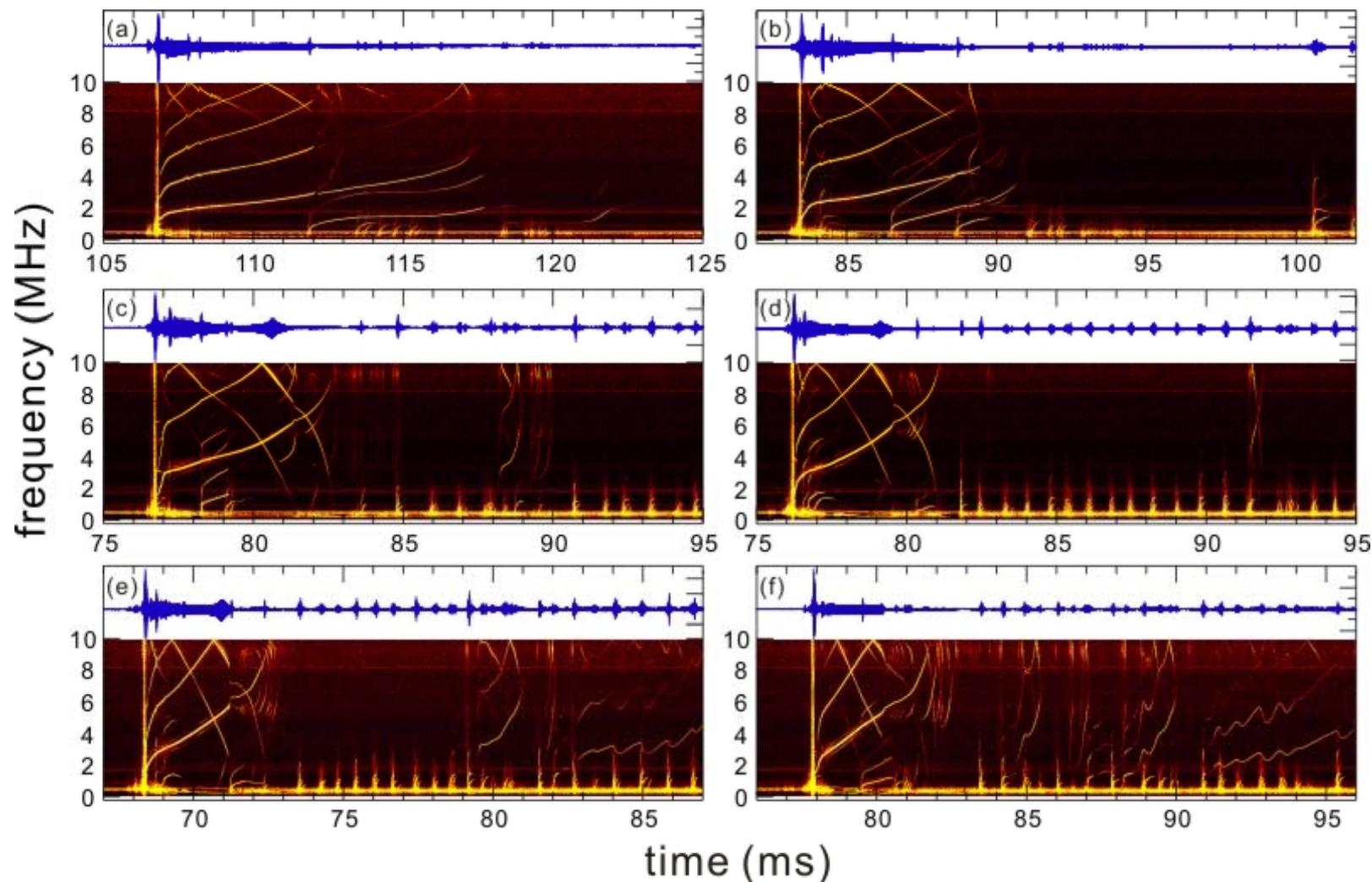


- ・マイクロ波停止後のafterglow中のプラズマの減衰には、時定数の異なる2成分が観測される。
- ・これらは温度の異なる2成分の電子に対応し、高温成分(最大 $\sim 50 \text{ keV}$ )の閉じ込め時間は高 $\beta$ 時に最大で0.5s程度。
- ・高 $\beta$ 時には、高温電子成分が電子の主成分となっており、その割合が60%以上に達する。このような高 $\beta$ 時に、不安定性が観測される。



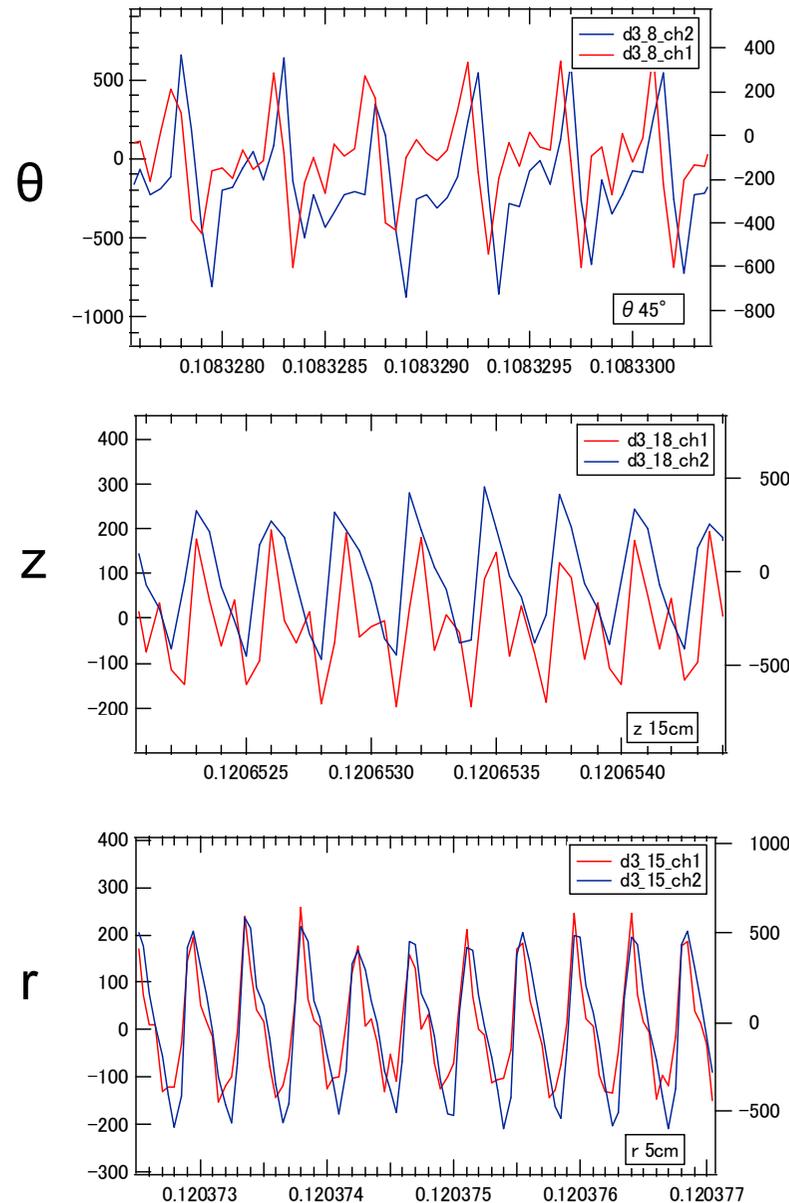
Typical waveforms of high- $\beta$  plasma and electromagnetic fluctuations in RT-1

- ・ 高 $\beta$ プラズマが生成される条件下で、圧力と密度の増大前に、強いX線放射を伴う $10^{15}\text{m}^{-3}$ 程度の希薄な状態となり、複数の揺動モードが観測される。
- ・  $\sim 1\text{mPa}$ 前後では、低周波( $\sim 10\text{kHz}$ )の電磁揺動を持つ。これは、プラズマの閉じ込め性能に顕著な悪影響を与えているように見えない。
- ・ より低い圧力で高温電子増大時、高 $\beta$ 状態の実現を妨げる揺動が発生する。



- RFパワーのみ2kW→18kWまで段階的に上昇：周波数sweepの速度が時間的に早くなる。ガス圧力の低下でも同様の傾向が見られる。（電子温度が高い場合ほど、sweepの速度が早い）。

# 揺動の伝搬方向(多点計測)



- 同じ構成の計測系を使用して, 磁場揺動を異なるトロイダル, ポロイダル,  $r$ 位置のpickupコイルで同時計測.
- 基本波の周波数は各位置で同一であるが, 高次モードとの強度比等はかなり異なり, 局所的な構造も持つ.
- 磁力線(ポロイダル)方向と $r$ 方向に位相差を持たない.
- トロイダル方向には位相差を持ち, 基本波(最低周波数)のモード数は1であり, 電子の反磁性ドリフト方向に伝播している.
- 揺動の周波数は, 高温電子のトロイダルドリフト周波数程度.

- RT-1の高 $\beta$ プラズマは、複数の種類の電磁揺動を持つ：
  - マイクロ波停止後の密度の急低下時、または低密度状態が保持される時、揺動振幅の成長と周波数上昇が同時に起こる。
  - 安定生成中も、高 $\beta$ 時には、振幅と周波数遷移が共に小さい揺動が存在。
- 揺動の周波数は、高温電子のトロイダルドリフト周波数に近く、イオン種(水素及びヘリウム)等のパラメータには顕著な依存性を持たない。
- 周波数はトロイダル、ポロイダル、径方向の異なる位置で同一。磁力線方向と径方向には位相差を持たない。トロイダル方向には位相差を持ち、揺動は電子の反磁性ドリフトと同じ向きに周回している。
- 高周波側へ遷移する揺動を伴う密度減少は、高温電子のトロイダルドリフトと同期した揺動により、粒子の加速と損失が同時に起きる事を示唆している。
- 周波数遷移の速度は、RFパワーの増大やガス圧力の低下(いずれも高温電子成分を増大させる側の操作)により高速化する。いずれも、高温電子のドリフト速度と揺動の何らかの相互作用を示していると予想される。