

磁気圏型装置RT-1における磁場揺動を伴う 密度崩壊現象の出現条件

東大新領域

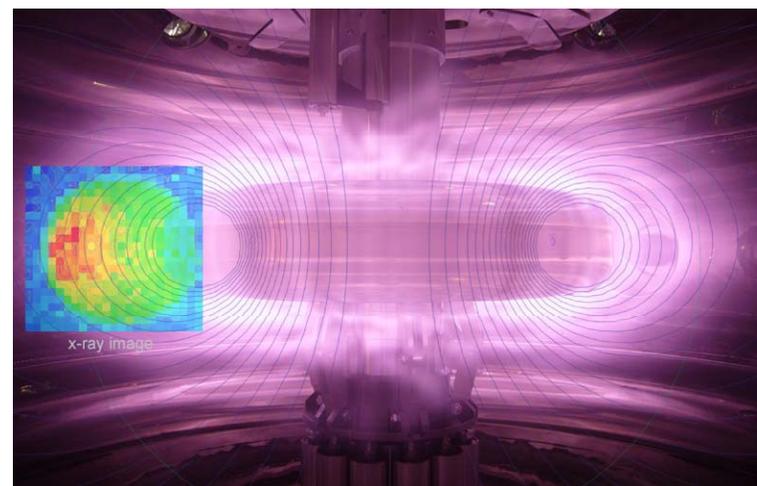
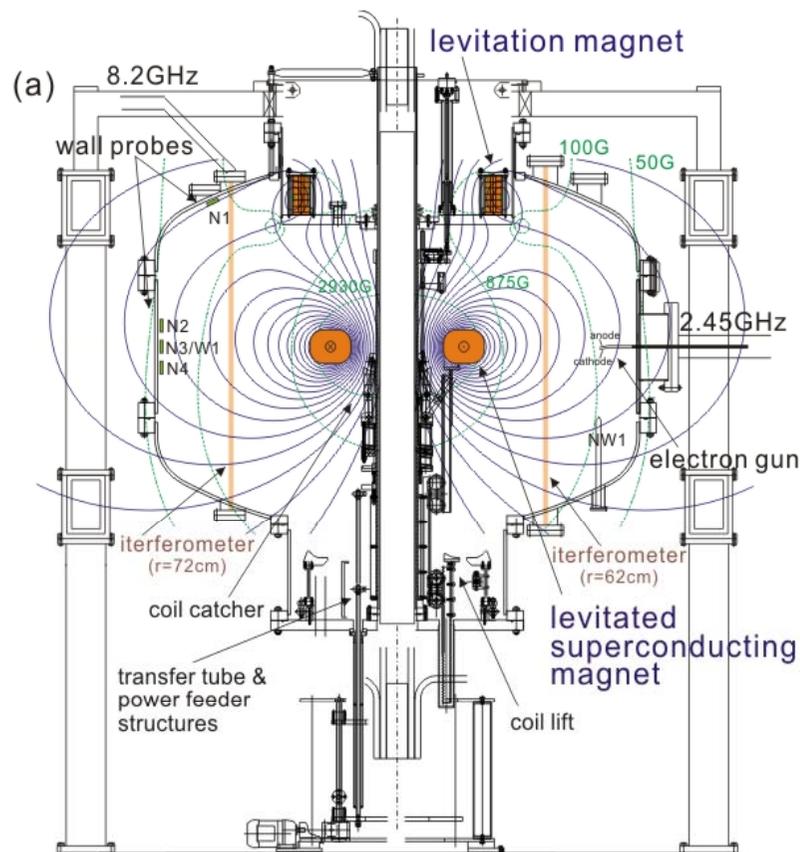
齋藤晴彦, 吉田善章, 矢野善久, 森川惇二, 笠岡紀和, 坂本渉, 野上智晃

- 目次
1. 磁気圏型配位RT-1における高 β プラズマ研究
 2. 研究背景と本研究の目的
 3. 密度崩壊を伴う揺動の出現条件
 4. 入射電力の増強によるパラメータ範囲の拡大
 5. まとめと今後の課題



研究背景1: 磁気圏型装置RT-1 (Ring Trap 1)における dipole磁場配位を用いた高 β プラズマ閉じ込め研究の進展

2/10



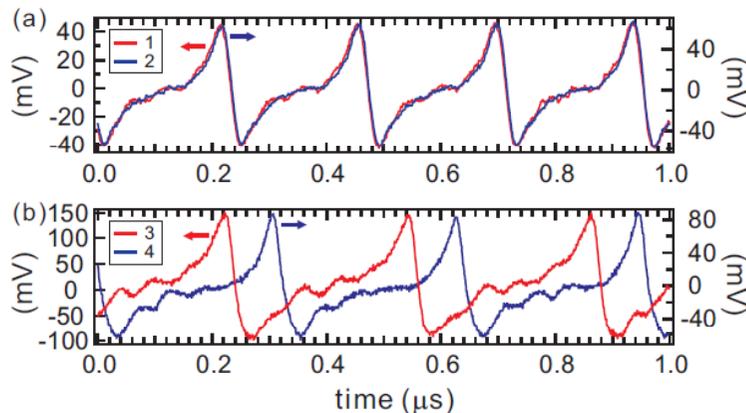
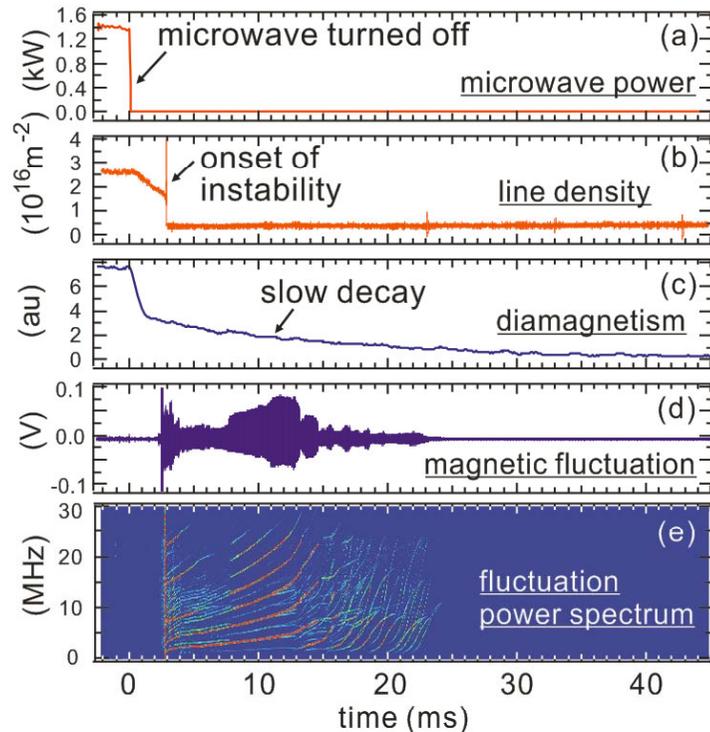
- 高温超伝導 (Bi-2223) マグネット
0.25MA, 112kg

フィードバック制御により磁気浮上し、
無冷却状態で6時間の浮上運転

2010 Yoshida *et al.*, Phys.Rev.Lett. 104, 235004.
2013 Yoshida *et al.*, PPCF 55, 014018.

- 先進的核融合を目指す超高 β プラズマの安定生成
 - ECHによる高温電子プラズマ実験: 局所 $\beta \sim 70\%$, 閉じ込め時間 $>0.1s$, 内向き輸送
 - イオン加熱(流れ駆動)実験を開始している (矢野29aEC-11, 後藤29aEC-13)
- トロイダル非中性プラズマ(反物質プラズマを含む) (笠岡26aEF-3)

研究背景2: RT-1の高温電子プラズマでは, 特に高温電子成分が過多の場合に, 密度崩壊を伴う揺動発生が観測される. 3/10



揺動等の時間発展波形

● 観測される揺動の性質

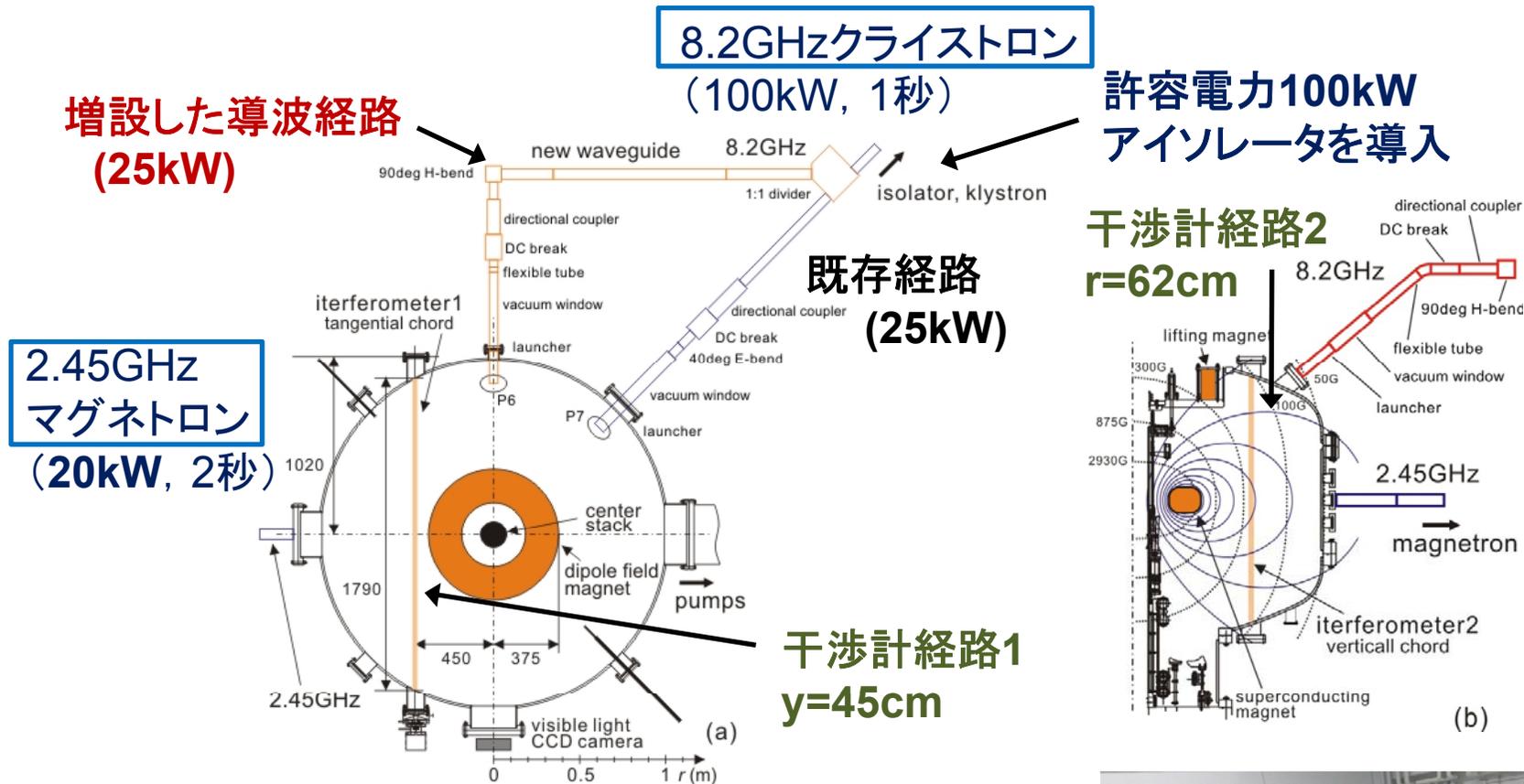
- 波動の伝搬方向は, **電子の反磁性ドリフト方向**と一致するトロイダル方向
- 磁力線に沿って位相差は観測されない
- 顕著な場合は, マイクロ波入射中に放電が維持されず, 密度崩壊に至る

● 不安定な揺動が出現する条件

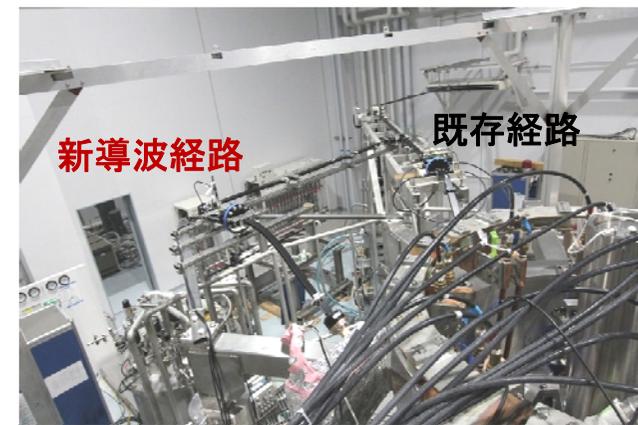
- 出現頻度は, 生成条件, 特に封入ガス圧力と強い相関がある
- 低ガス圧で**高温電子が過多となる条件**で顕在化するが, 安定高 β の条件もある

出現条件の実験的な解明は, 高性能プラズマを維持する上で, また磁気圏プラズマの理解を進める上でも重要である

- Dipole磁場中のプラズマで**密度崩壊を含む揺動現象**が出現する条件を実験的に明らかにし、生成可能なパラメータ範囲を拡大する事を目的とする
- **生成可能なパラメータ領域を広げる**事を目指して、以下を実施した
 - 導波経路の増設による8.2GHz入射電力増強(定格25kW→50kW):
⇒ 安定な運転領域を拡大し、さらなる高 β 化を目指す
 - 2.45GHz及び8.2GHzを併用したECHによるプラズマ生成・加熱:
⇒ 共鳴位置の差異を利用して、密度分布の制御を行う
- 生成したプラズマに対して以下に着目した計測を実施した
 - プラズマ中の高温電子成分が大きな割合を占めるので、干渉計を用いた密度評価には**相対論的効果を考慮した補正**を行う
 - それによりプラズマの密度と空間分布を評価し、磁気(~100MHz)プローブにより検出した揺動発生との関連を調べる



- 加熱系
 - 2.45GHz及び8.2GHzマイクロ波によるECH
- 計測系
 - 75GHz干渉計 (2コード)
 - 磁気プローブ, Si(Li)検出器, 静電プローブ等



- 相対論的補正を加えた誘電率テンソル*は

$$\vec{\epsilon} = \begin{pmatrix} 1 - \alpha X / (1 - Y^2) & i\beta XY / (1 - Y^2) & 0 \\ -i\beta XY / (1 - Y^2) & -1 + \alpha X / (1 - Y^2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 - \gamma X \end{pmatrix} \quad \text{で与えられる.}$$

ここで $\alpha = 1 - \frac{5}{2\mu} \frac{1+X}{1-X}$, $\beta = 1 - \frac{5}{\mu} \frac{1}{1-X}$, $\gamma = 1 - \frac{5}{2\mu}$, $\mu = m_e c^2 / k_B T_e$,

$X = \omega_p^2 / \omega^2$, $Y = \omega_{ce}^2 / \omega^2$ であり, $\omega_p = \sqrt{n_e e^2 / \epsilon_0 m_e}$, $\omega_{ce} = eB / m_e$ である.
 プラズマ周波数 電子サイクロトロン周波数

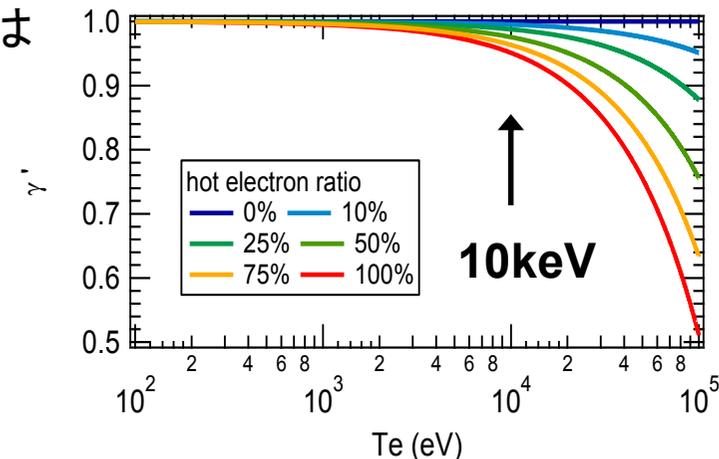
- 伝搬する電磁波の周波数が十分大きく $\omega_p^2, \omega_{ce}^2 \ll \omega^2$ を満たす時は,
 O, X, R, Lのいずれのモードに対しても屈折率は $N \sim 1 - \gamma X / 2$ と近似出来る.

- 電子が高温(割合 r_{hot})と低温の2成分を持つ場合には

$$N \sim 1 - [\gamma r_{hot} + (1 - r_{hot})] X / 2 = 1 - \gamma' X / 2 \quad \text{となり,}$$

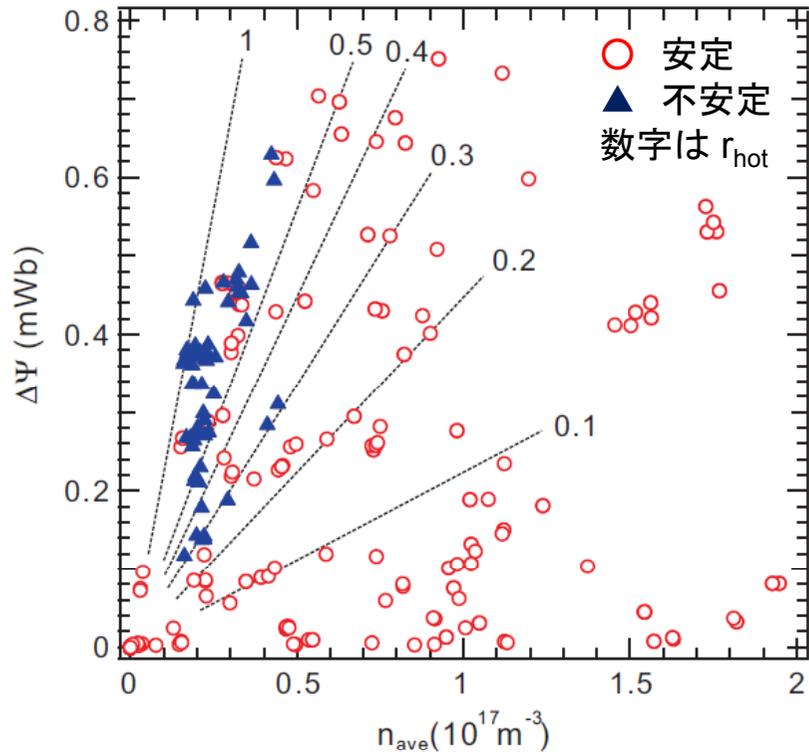
2π の位相差を与える線密度[m⁻²]は

$$\int n_e dl = 5.6 \times 10^{17} / \gamma' \quad \text{となる.}$$



*1992 Mazzucato, Phys. Fluids B 4, 3460.

2009 Hojo et al., Plasma Fusion Res. 4, 010.



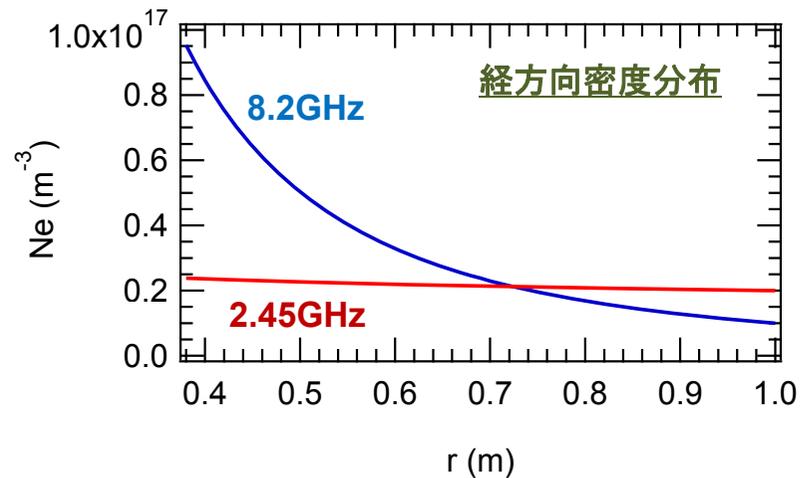
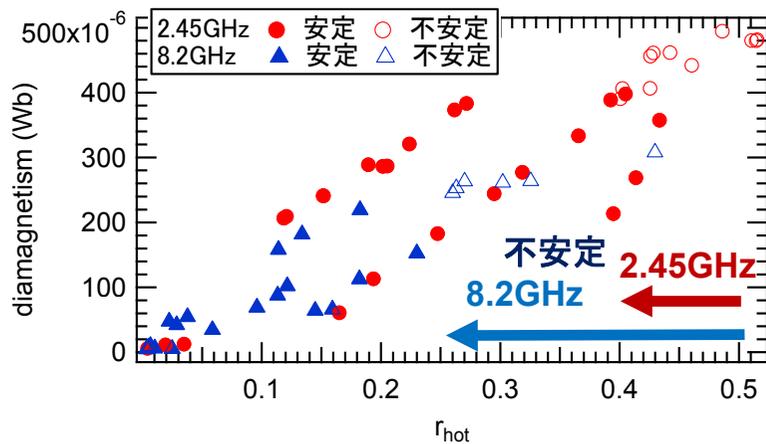
● 高温電子の割合と強い相関がある

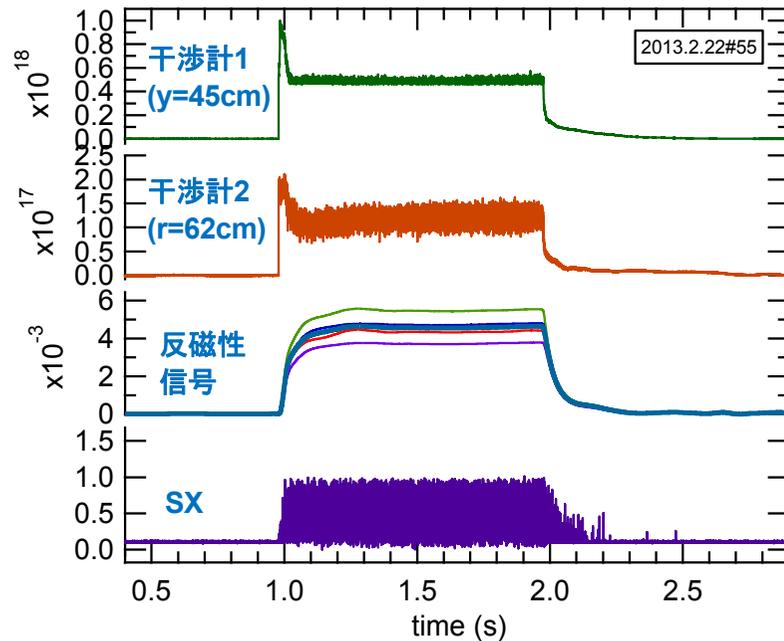
- $T_e \sim 10\text{keV}$, 比較的 β の条件で生成
- $r_{hot} = 30 \sim 60\%$ を超えると不安定化
- 高温電子を持つプラズマの交換型不安定性の安定化条件*

$$\frac{1-r_{hot}}{r_{hot}} = 2 \left[\frac{1}{q} + \left(\frac{1}{q^2} + \frac{1}{q} \right)^{1/2} \right] \Rightarrow r_{hot} \sim 60\%$$

$$q = kv_D / \omega_{ci} \quad *1976 \text{ Berk, PoF 19, 1255.}$$

- それ以外に急峻度等に依存性を持つ

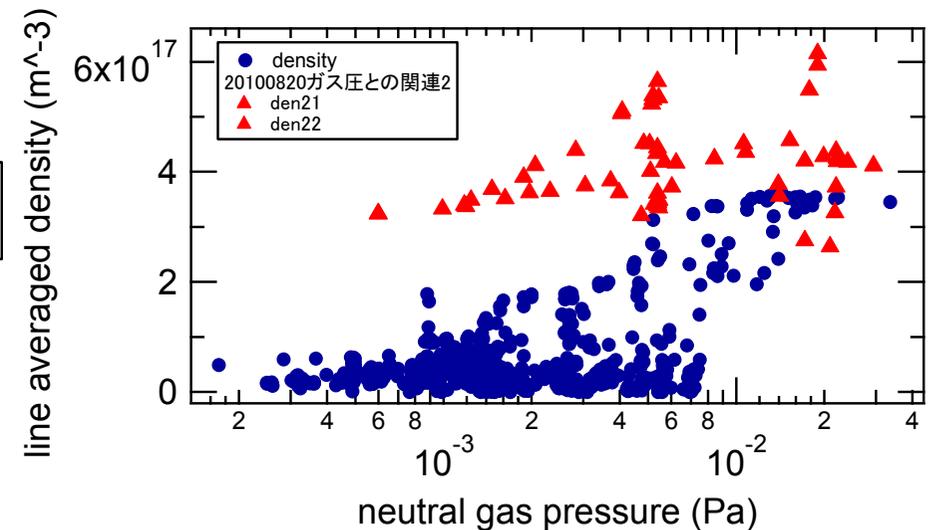
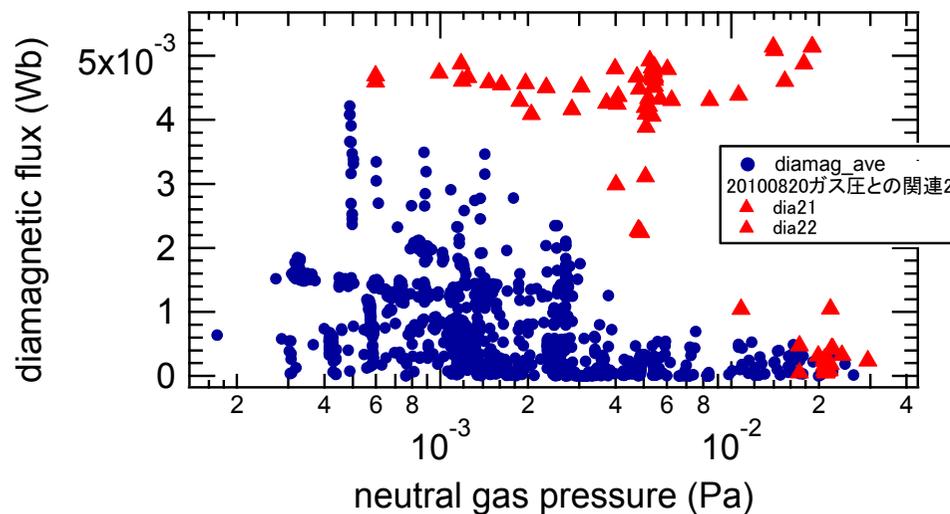


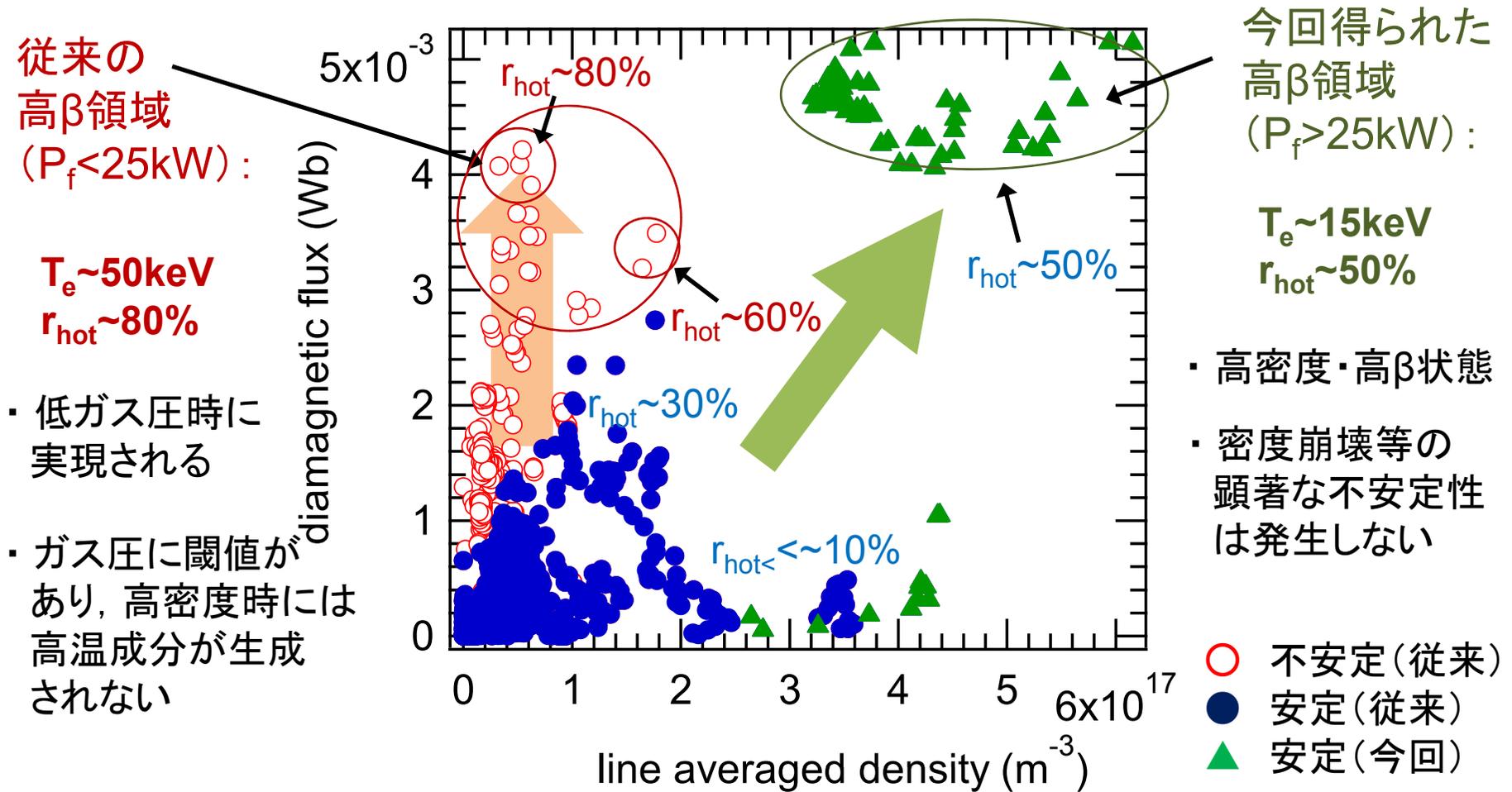


- 比較的低パワーの従来の実験(●)
 - 従来の実験では、高密度と高 β 状態の両立は実現されていなかった
 - 封入ガス圧力の上昇により、高温電子の割合は $\sim 80\% \rightarrow \sim 10\%$ へと急減する
 - 高 β 状態はやや不安定なケースが多い

● 8.2GHz増強後(▲)

- 高密度条件でも高温電子が生成される
- 高密度と高 β 状態が両立出来る





・ 入射電力の増強により、**電子密度が高い状態でもプラズマは有意な割合の高温電子成分を持ち、安定な生成条件が実現された**

⇒ 従来は到達困難な領域での安定な高 β プラズマの生成が可能となった

まとめ

- RT-1で不安定な揺動が出現する条件について、以下の知見が得られた
 - 高温電子の割合に強い依存性がある(交換型不安定性とほぼ一致)
 - プラズマが約30%以上の割合の低温成分を持つ事で高 β 状態が安定化する
- プラズマのパラメータ範囲を拡大し高性能化を実現した
 - 導波経路の新設により、8.2GHz電力を35kW(定格は50kW)まで増強した
 - これにより、高密度領域でも高温電子成分を保つ事が可能となった
 - $N_{ave}=6 \times 10^{17} m^{-3}$ (従来の1.5倍), $\Delta\Psi=5.2mWb$ (1.3倍, 局所 $\beta\sim 90\%$)

今後の課題

- プラズマ性能のさらなる向上と不安定条件の詳細な解明
 - 8.2GHz入射電力の定格(50kW, 1秒)までの運転を実現する
 - 揺動特性に着目した β 限界との関連の解明
 - イオン加熱実験に向けたプラズマ運転条件の最適化 (矢野29aEC-11)