

# RT-1におけるリミタ導入時のECHプラズマ の高エネルギー電子成分の計測実験

東大新領域

齋藤晴彦, 吉田善章, 小川雄一, 森川惇二, 渡邊将, 矢野善久, 林裕之, 水島龍徳

- 目次
1. 研究背景と本研究の目的
  2. 磁気圏型装置RT-1の概要と計測系, リミタ設置
  3. リミタ導入による不純物抑制
  4. 8.2GHz/2.45GHz同時入射によるプラズマ性能向上
  5. リミタバイアスの予備実験
  6. まとめと今後の課題



磁気圏型装置RT-1では, 磁気浮上した超電導コイルによるdipole磁場中でECHプラズマ生成実験を行っている (矢野21pZH-11, 林22aZH-13).

軟X線及び可視領域での分光計測によれば, RT-1のプラズマには, コイルの磁気浮上時にも不純物金属の強いラインが観測されている. 特に, ステンレス由来のニッケル, クロム, 鉄等が強い輝線を持ち, 放射損失を介してプラズマの高性能化の障害となる可能性がある.

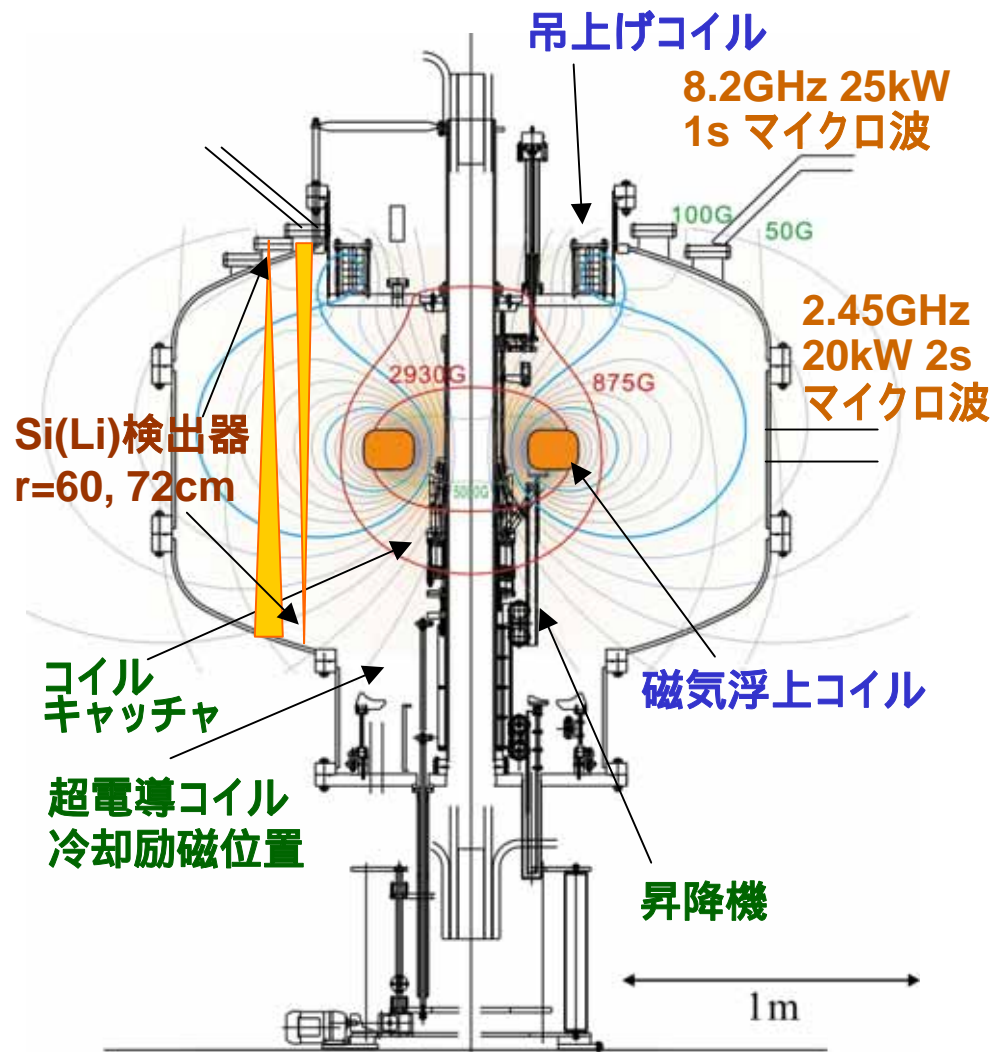
本研究の目的は, 磁気圏型装置RT-1に導入したモリブデン製リミタを使用し, プラズマ中の不純物抑制効果を実験的に評価する事である.

ステンレスと比較して高い融点及び良好な熱伝導性を持つモリブデン板をリミタとして導入しプラズマ生成実験を行った. リミタ導入に伴う不純物の変化やプラズマ密度, 電子温度等のパラメータに与える影響に関して, 軟X線, マイクロ波干渉計等により計測を行った.

また, リミタを電極として利用する事でエッジ部にバイアスを行い, その影響の実験的評価を行った.

# 惑星磁気圏型装置RingTrap-1 (RT-1)

3/14



Ring Trap 1 (RT1) 装置の断面図

高温超電導コイル 116A (250kAT) Bi-2223  
吊上げコイル (最大定格90kAT) による制御浮上。

Dipole磁場を持つ惑星磁気圏型装置。

- 主要な研究課題は、
- ・先進核融合に適した高 $\beta$ 配位の確立
    - 特に流れを持つプラズマの性質の解明\*\*
  - ・トロイダル非中性プラズマの閉じ込め
    - 反物質への応用 (現在は純電子実験)。

高温超伝導コイルを備え、制御磁気浮上状態でプラズマ生成実験を行う。

- ・GM冷凍機により17Kまでコイル冷却。
- ・定格電流は250kAT (116A  $\times$  2160turn)。
- ・再冷却までに約6時間の実験が可能。

Dipole磁場コイルの機械的保持を排除する事により、プラズマへの擾乱を抑制。

8.2GHz / 2.45GHzマイクロ波により、水素のECHプラズマ実験を実施している。

\* Z. Yoshida et al., Plasma Fusion Res. 1, 008 (2006).

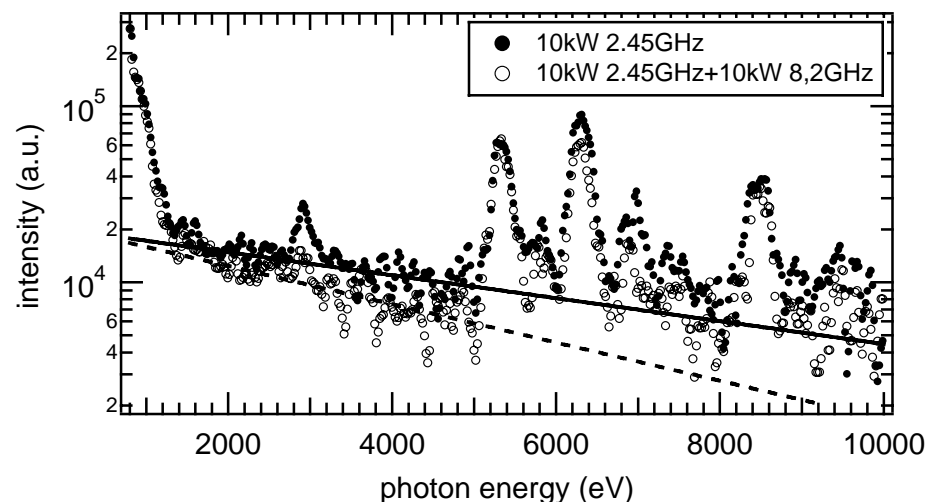
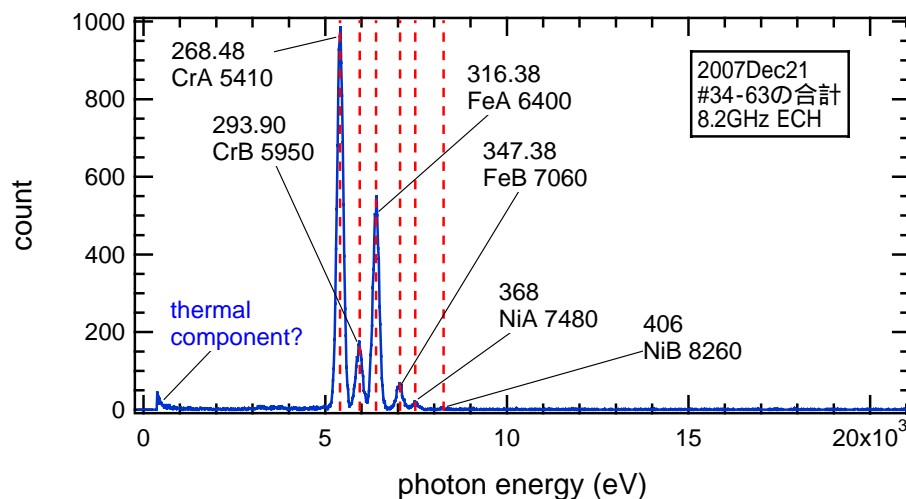
\*\* S. M. Mahajan, Z. Yoshida, PRL 81, 4863 (1998).  
Z. Yoshida, S. M. Mahajan, PRL 88, 095001 (2002).

RT-1ではセパトリクス内部にプラズマを生成しているが、特に高 $\beta$ 時、X線のスペクトルには主にステンレス由来のCr, Fe, Ni等の $K\alpha$ ,  $K\beta$ 線が観測される。

こうした金属不純物ラインは、コイルの完全磁気浮上により閉じ込め領域内の障害物を取り除いた状態でも顕著に観測されている。

(特に封入ガス圧力を $\sim 10^{-3}$ Pa以下まで低下した場合には、硬X線までの強いX線が発生し、反磁性信号も同時に低下する。)

放射障壁を越えるような高性能のプラズマ生成を目指す必要条件の一つとして、リミタによりプラズマと容器壁を分離し不純物を抑制する事が重要である。



プラズマが真空容器構造物と接する場合(左)には、金属ライン放射が支配的となる。

コイル完全浮上である事から，内部導体及び容器壁が経路として予想される．

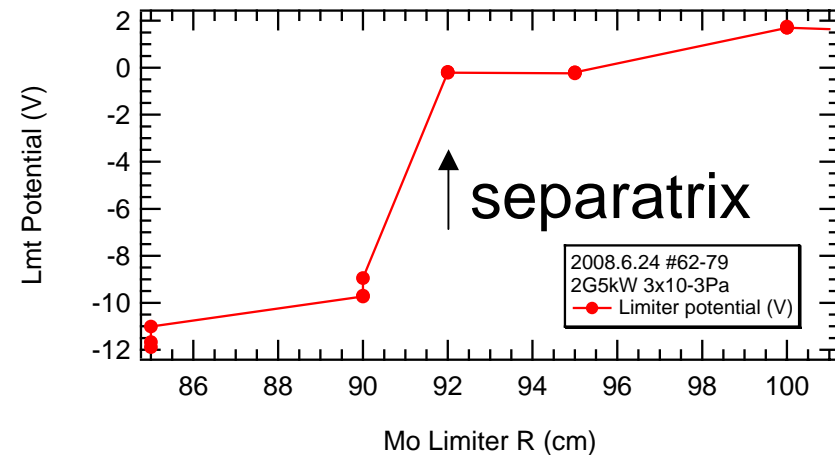
真空磁場の作るセパトリクスは $z=0$ 赤道面上で $r=92\text{cm}$ に位置している．磁気面の形状は電子ビームを用いた実験や空間電位の計測で確認され，容器壁とclosed surfacesは分離している．

反磁性信号の小さなパラメータ領域では， $r=92\text{cm}$ より内側にリミタを導入した時に負電位を感じており，プラズマの境界がセパトリクスに近い事を示している．

低 放電時には，金属のラインスペクトル強度は比較的小さい．



磁気浮上時の磁気面の可視化: 真空磁場の計算値と良い一致を見せる．



リミタの浮遊電位のリミタ先端位置依存性(低 プラズマ時)．



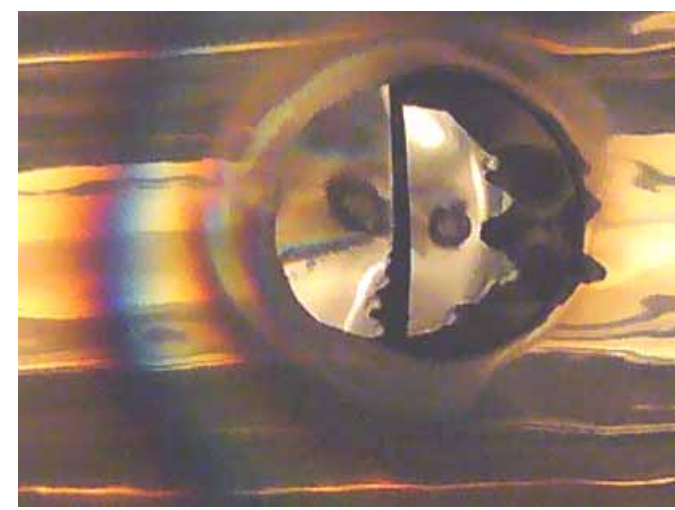
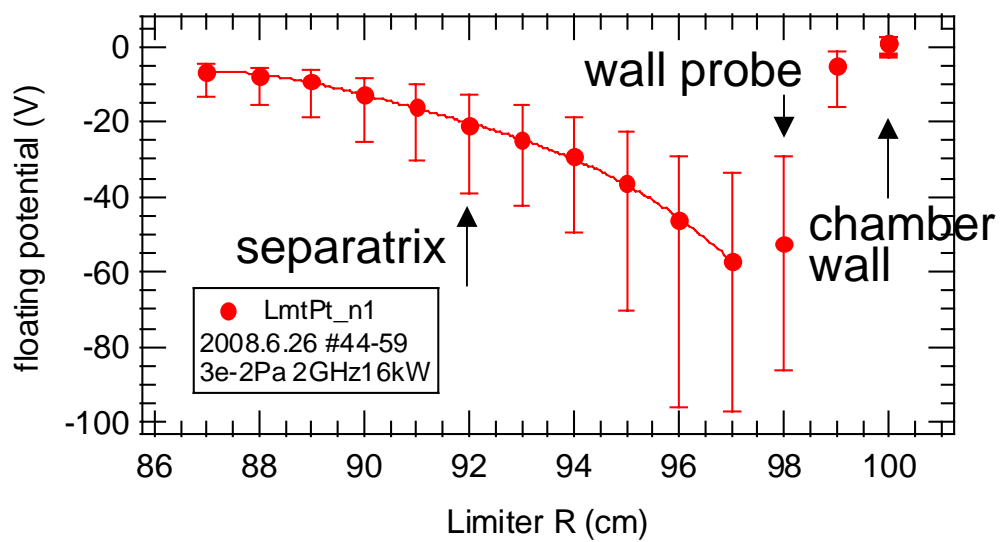
# 高 $\beta$ 放電 (local $\beta \sim 10\%$ 以上) 時の特性

プラズマの上昇時には、反磁性効果でセパトリクスが外側に押し出され、プラズマの境界は真空容器壁側に移動している事が予想される。

(矢野21pZH-11, 林22aZH-13)

実際、電子プラズマ用に設置されたwall probeは、真空磁場のセパトリクスよりも外部に置かれたにもかかわらず溶解し損傷した(損傷位置は、反磁性電流を担う電子流を受ける向きと一致している)。

Wall probeから2cmしか離れていないSUS304の真空容器壁も同様のスパッタリングを受け、プラズマへの不純物混入経路となっている可能性が高い。



リミタの浮遊電位のリミタ位置依存は、R=92cmで大きな変化を見せない。

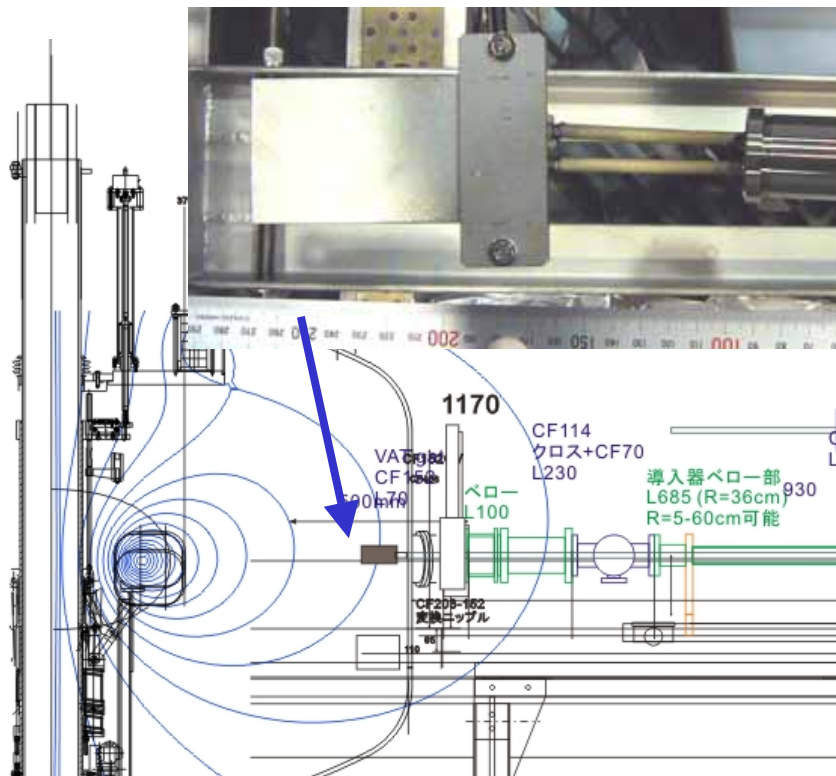
真空磁場のセパトリクス外部で損傷したwall probe (SUS t0.5mm)

# RT-1へのモリブデン製リミタ導入

モリブデン製リミタ (100mm × 50mm × 10mm) を z=0 の赤道面に導入。

径方向位置は r=850~1000mm (容器壁 r=1000mm) に可動。

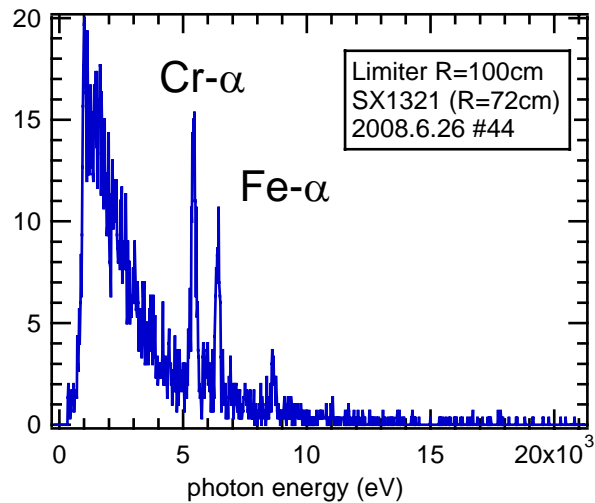
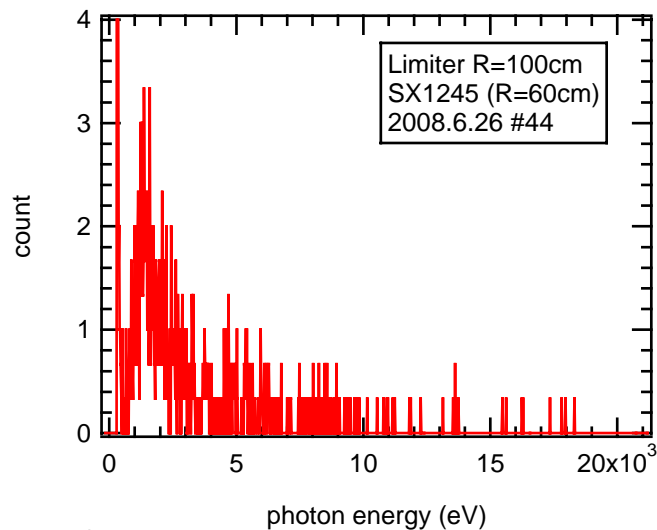
(リミタ材料として、放射損失の少ない低Zという観点からカーボンが優れるが、低温プラズマに対しては、むしろ融点が高く熱伝導性に優れたクロム族金属がスパッタリングを抑制しプラズマ純度を保つ効果が報告されており、またメンテナンス性の良さからモリブデンを選定した。)



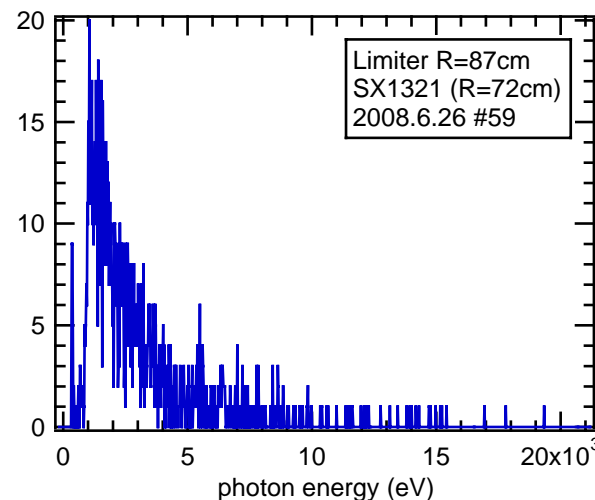
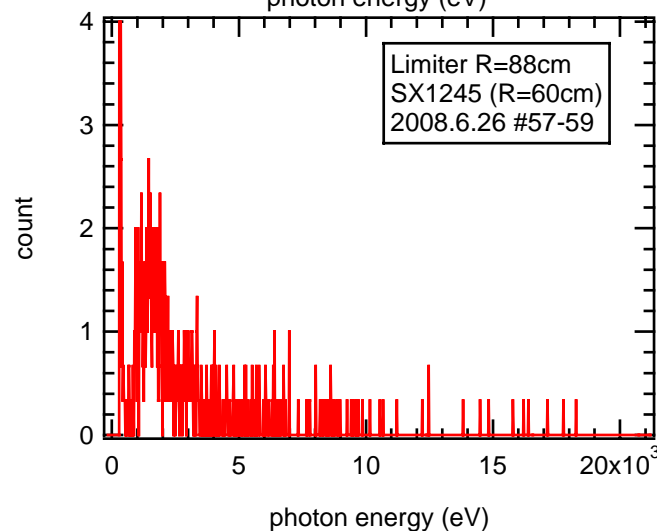
		C	Mo	W	SUS304
Z		6	42	74	Fe26 Cr24
質量密度	kg/m <sup>3</sup>	2267	10280	19250	7930
融点	K	3823	2896	3695	1670
沸点	K	5073	4912	5828	2900
比熱容量	J/kg K	710	250	130	590
リミタ質量	kg	0.1133	0.514	0.9625	0.3965
熱容量	J/K	80.47	128.5	125.1	233.9
20kJ-> T	K	250	155	159	85
熱伝導率	W/m K	129	138	174	16.7

# リミタ導入による金属輝線強度抑制

8/14



リミタ無し  
(リミタ位置R=100cm  
真空容器壁付近)



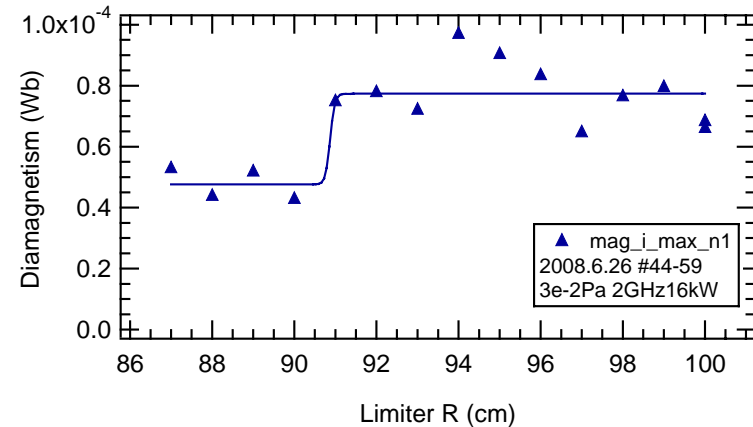
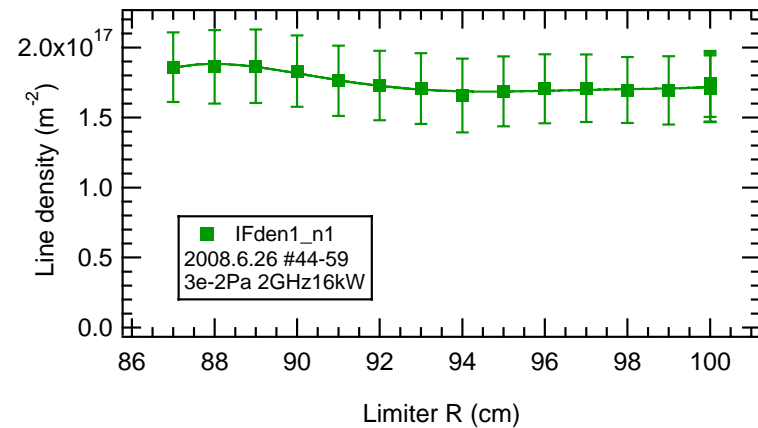
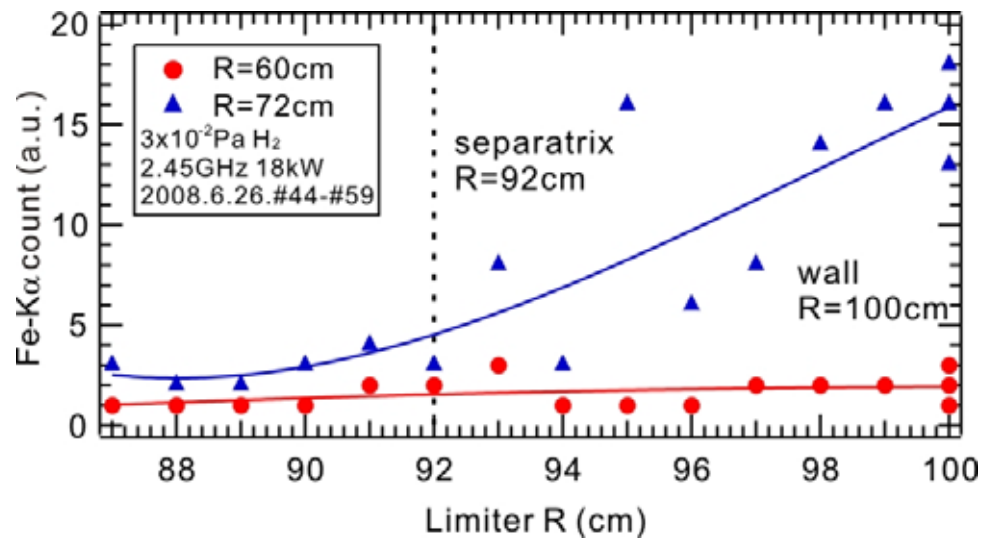
リミタ挿入時  
(リミタ位置R=87cm  
セパトリス付近)

Si(Li) 検出器位置R=60cm

Si(Li) 検出器位置R=72cm

容器壁に近い $r=72\text{cm}$ で観測される鉄とクロム(中程度の反磁性信号を持つ放電)ラインは,リミタをセパトリス付近まで導入する事で強度が減少する.





## リミタ導入時の鉄の輝線強度(光子数), 線密度, 反磁性信号の変化

リミタをプラズマのエッジまで挿入する事で,  
不純物ライン強度が1/10程度まで抑制された。

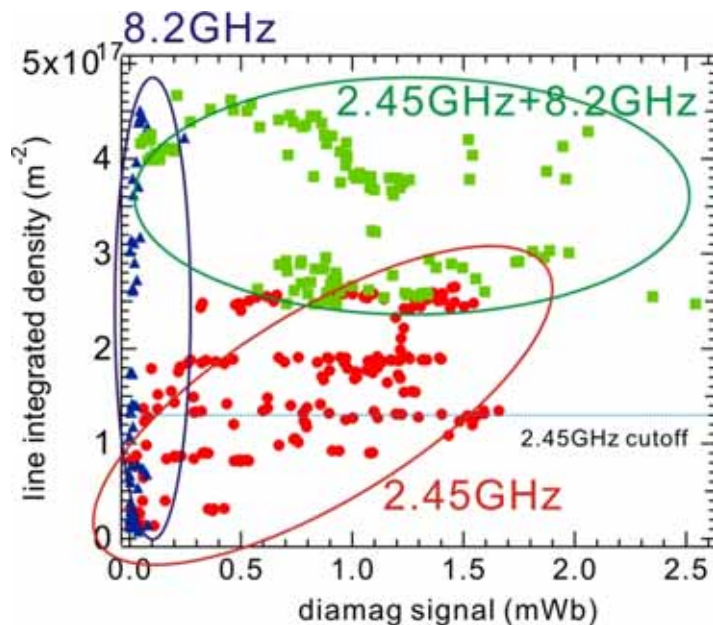
電子線密度に減少は見られず, リミタはバルク成分には影響を与えていない。

プラズマ内部に進入すると反磁性信号は30%程度減少するが, 周辺部の $r=91\text{cm}$ 程度までは, 高エネルギー成分の電子もリミタの悪影響を受けない。

RT-1では、地磁気補正とコイル磁気浮上運転を確立し、8.2GHz/2.45GHzの合計最大50kWまでのマイクロ波入射によりECHプラズマを生成している。

2.45GHzではover denseプラズマが生成されるが、より遮蔽密度の高い8.2GHzを入射する事で、より密度の高いプラズマが得られている。

一方、現状の磁場分布では、8.2GHzと比較して2.45GHzのECR層は内部導体を横切らない位置関係にあり、有効な加熱を行う上で有利である。



反磁性信号 - 線密度のプロット

実際、プラズマの反磁性信号は2.45GHzの  
パワー上昇により~2.5mWbまで増大しており、  
局所 には10%のオーダーに達している。  
(矢野、吉田他21pZH-11)。

RT-1のプラズマではECHにより生成される  
高エネルギー電子成分がプラズマ圧力の  
主成分を形成しているものと考えられる。

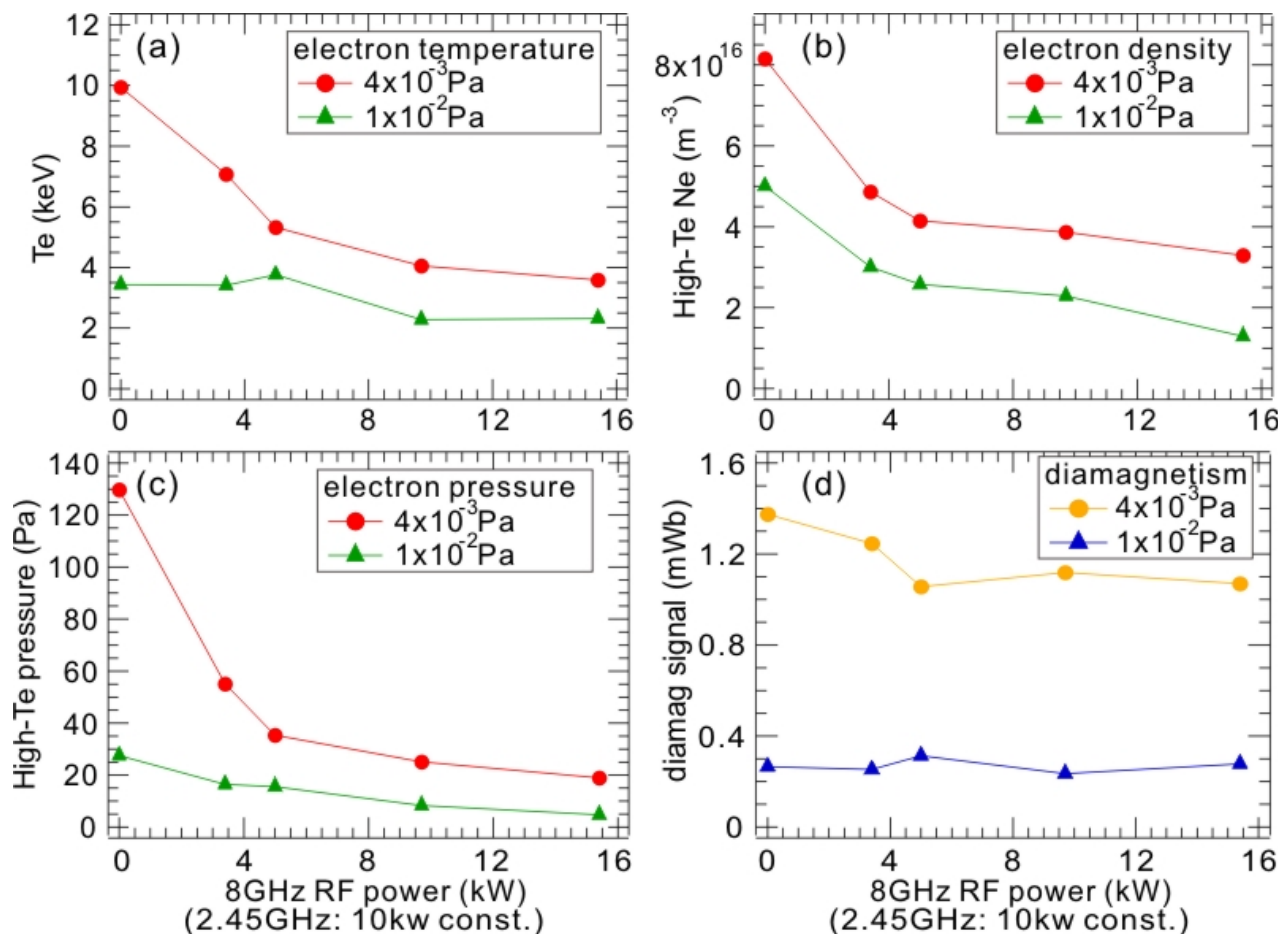
(2.45GHzの単独入射時には、反磁性信号と  
軟X線計測には矛盾は無い。)

# マイクロ波同時入射時の軟X線と反磁性計測

11/14

8.2GHzと2.45GHzの同時入射により、比較的高密度( $\sim 2 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$ )かつ大きな反磁性を持つプラズマが生成されている。

軟X線と反磁性信号を比較すると、8.2GHz追加時に、プラズマ密度の上昇に伴い高エネルギー電子成分が減少するが、反磁性信号はほぼ一定を保つ。



ECHにより初期に生成した高エネルギー電子が、より低温成分へと熱化している可能性。

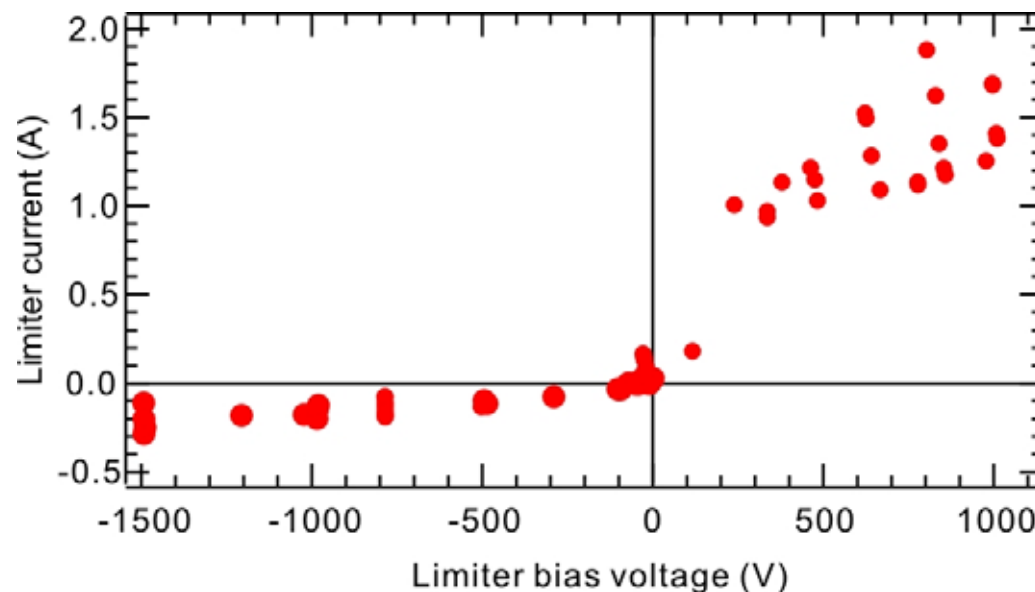
一方で、可視分光計測によれば水素イオン温度は10eV程度以下と放射障壁を超えておらず、バルク成分の加熱には至っていない。

2.45GHz一定で8.2GHz追加。軟X線計測による高エネルギー成分電子の(a)温度、(b)密度 ( $Z_{\text{eff}}=1$ とした)、(c)圧力と、(d)反磁性計測結果。

プラズマの周辺部の特性改善を目的として、リミタを電極として使用し真空容器に対して正負のバイアス実験を行った。

現在のリミタはr方向に長く磁力線をつなぐ構造であり、バイアス用に最適化されていないが、今回は予備実験として行った。

電流電圧特性は非対称であり、正バイアスの電子捕集時にイオン電流の数十倍の電流が流れる。



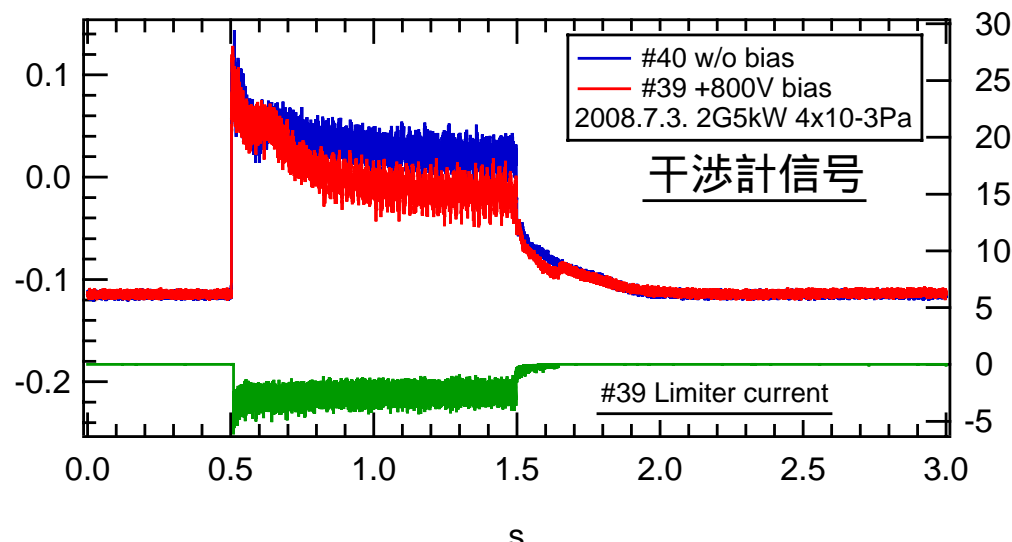
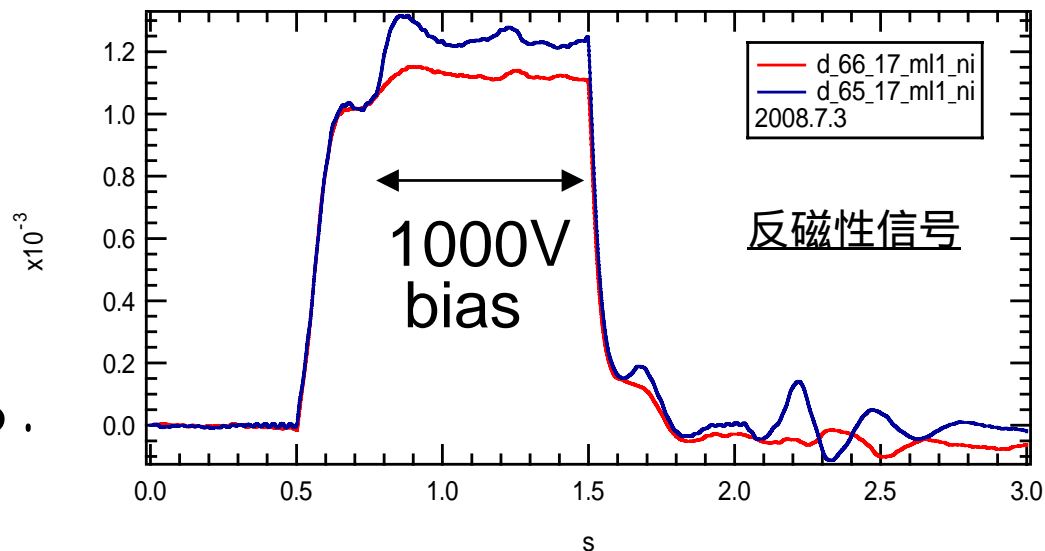
リミタを正負にバイアス時の電流電圧特性

正バイアスにより, 1~2割程度反磁性信号が増大する.

この時, 電子の線密度は15%低下しており, バルク成分のプラズマ密度減少を示している.

軟X線計測によれば, 高エネルギー電子成分の温度は12keV 15keVへと増加しており, 反磁性信号の増大に寄与している.

リミタは, バイアスを与える構造としては不完全であり, バイアス電極を今後の実験にて導入予定.



リミタを正(+1kV)にバイアス時の反磁性信号と, 電子の線密度の時間発展.



本研究では、磁気圏型装置RT-1にモリブデンリミタを導入してプラズマ計測実験を行った。実験結果は以下の通り:

- リミタをプラズマ周辺部に設置する事で、軟X線スペクトル中の金属線強度が1/10以下まで低減し、連続スペクトルが支配的となった。
- この時、電子密度や反磁性信号には大きな減少は見られず、不純物混入を抑制したプラズマ実験が可能となった。
- 2.45GHz/8.2GHz同時入射時の反磁性信号は~2.5mWbであり、10%オーダーのlocal  $\beta$ が安定に得られている(矢野21pZH-11, 林22aZH-13)。
- リミタを正バイアス時に反磁性信号の向上とtail成分の電子温度の上昇が観測されており、高エネルギー成分の閉じ込め向上が示唆されている。

今後の課題として:

- 不純物の定量的な評価(可視分光及び軟X線のライン強度より)。
- バルク成分、中間成分の電子温度と密度の測定。
- プラズマバイアス用電極の導入とさらなるプラズマ性能の向上。