

UTST球状トカマクプラズマ中の 高次高調速波空間分布測定

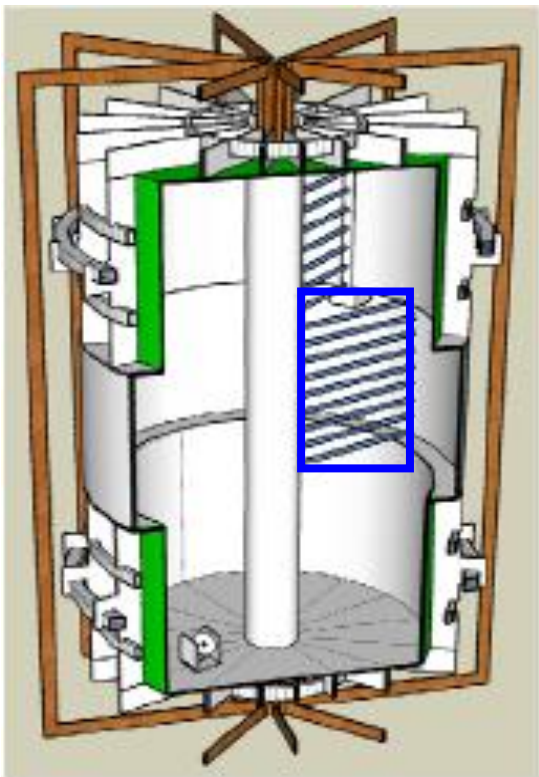
東大理, 東大新領域^A, 東大工^B

若月琢馬, 永島芳彦^A, 大迫琢也^A, 小林弘明^A, 安秉日, 角田英俊,
渡邊理^A, 山口隆史^A, 倉品博樹^A, 林裕之^A, 山田幸太郎^A,
坂本拓也^A, 花嶋賢太郎^A, 平塚淳一,
今澤良太^B, 神尾修治^A, 日原竜磨^A, 作村守央^A, 曹慶紅^A,
山田琢磨^A, 井通暁^A, 小野靖^A, 江尻晶^A, 高瀬雄一^A

イントロダクション

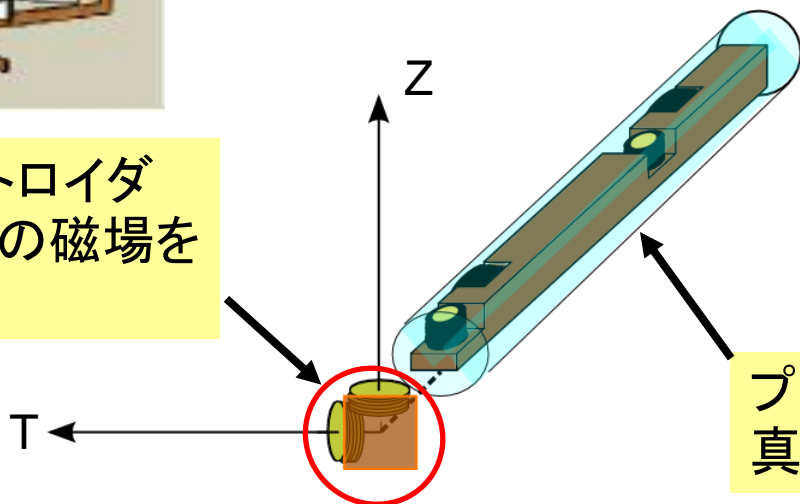
- 高次高調速波(High-Harmonic Fast Wave, HHFW, $f = 21$ MHz)実験がUTST球状トカマクで行われた。
- HHFWは特に高ベータプラズマでの吸収が大きい
ため、UTSTで生成される高ベータ合体プラズマの
加熱を目的として実験を行った。
- RF磁場をプラズマ中に挿入された 9×9 磁気プローブ
アレイによって直接計測し、HHFWの伝播、吸収
の空間分布に関する情報を得た。

磁気プローブアレイによる磁場計測



- RF磁場をプラズマ内部に挿入された 9×9 磁気プローブアレイによって直接計測した。
- 磁気プローブの信号はサンプリングレート1GHzの高速デジタルオシロスコープによって計測した。

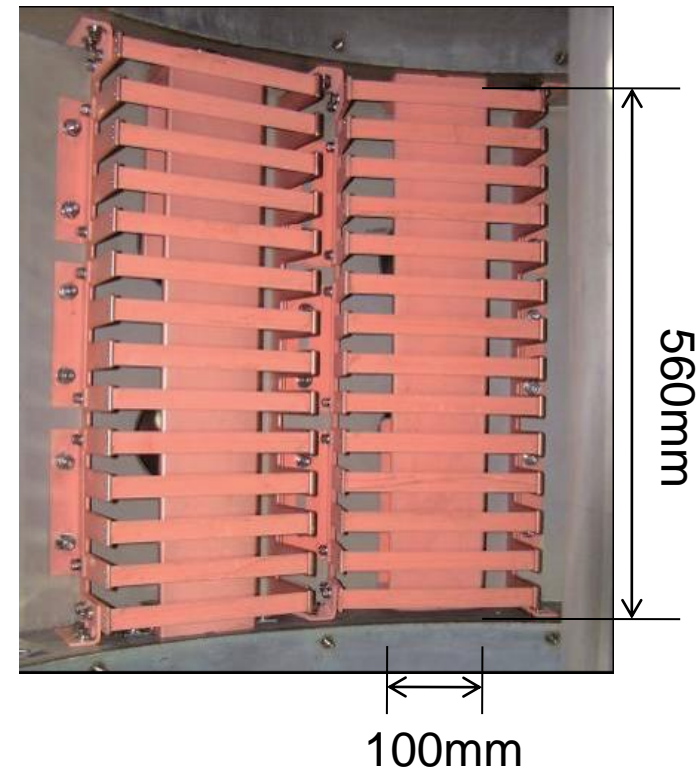
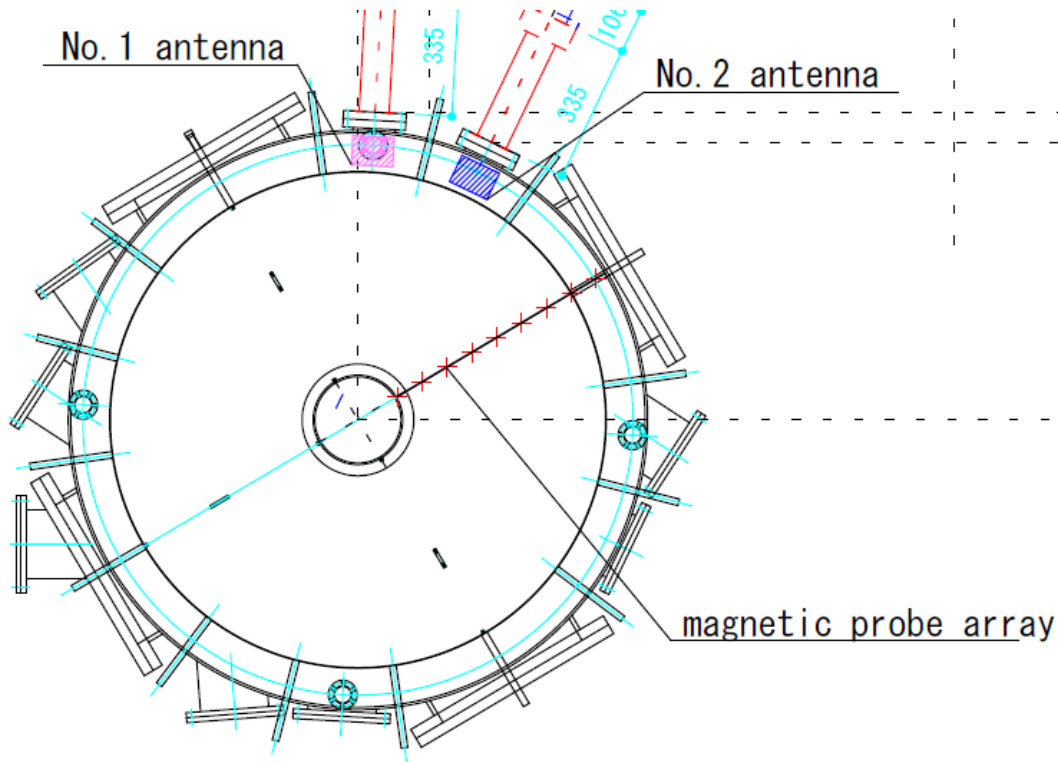
各点において、トロイダル、鉛直二方向の磁場を計測できる。



プローブ本体
ピックアップコイルを
ベークライト棒に掘られた
溝に設置。

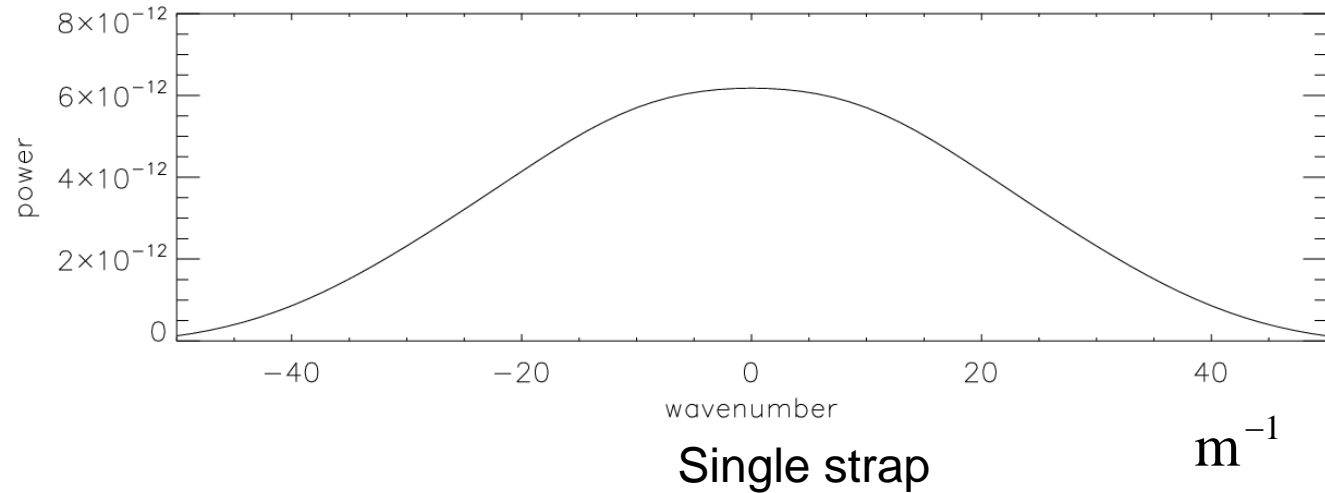
プローブをガラス管に挿入し、
真空容器内に設置。

HHFW励起用アンテナ

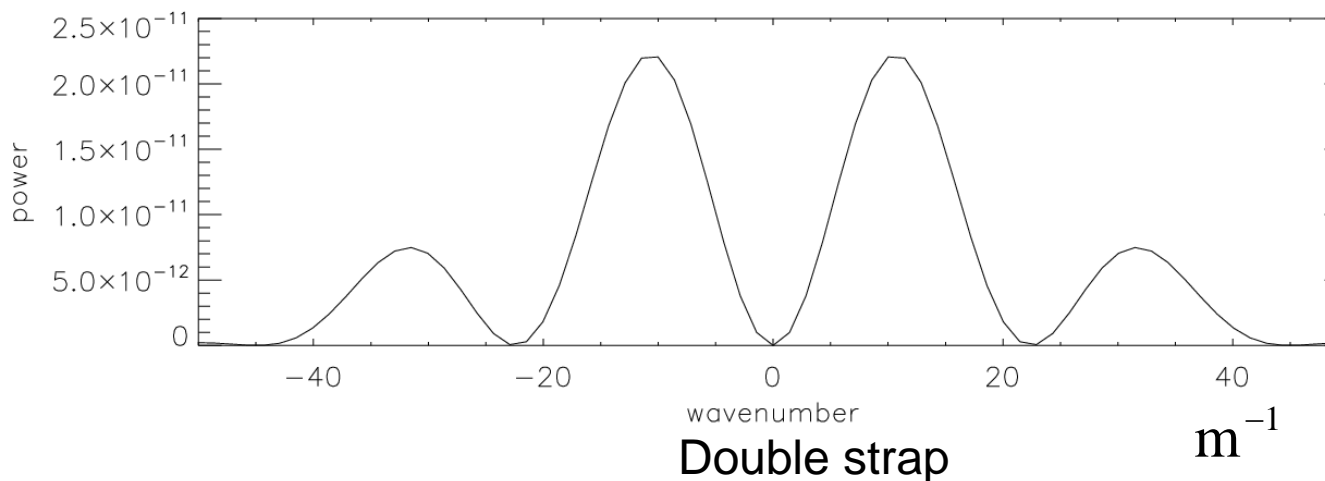


- HHFW励起用にはダブルストラップアンテナを用いた。アンテナ間の位相は $(0, \pi)$ (dipole)もしくは、シングルストラップのみを用いる励起を行った。
- 磁気プローブアレイはアンテナからトロイダル方向に 45° 離れている。

トロイダル波数スペクトルの推定

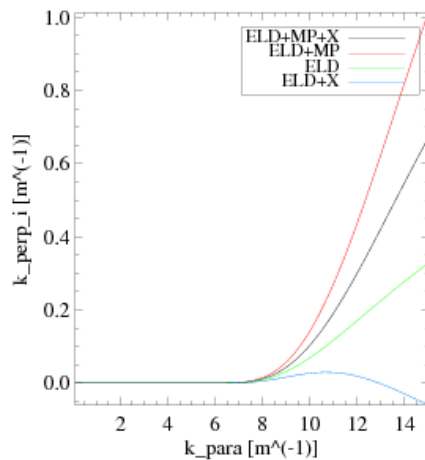
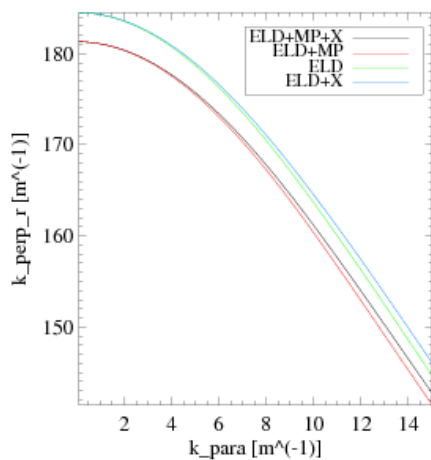


- シングルストラップを用いると、0にピークを持つ比較的広いトロイダル波数スペクトルをもつ波が励起される。



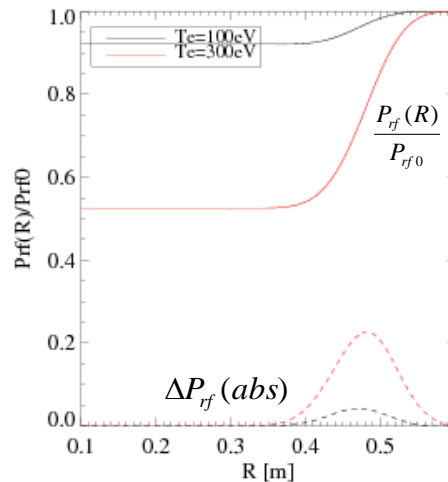
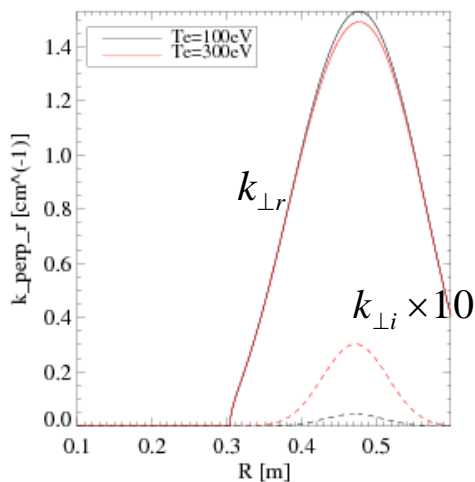
- ダブルストラップを用いると主に $n_{\phi} = \pm 8$ の波が励起される

Single-pass 吸収計算



k_{para} を変化させたときの k_{perp} の実部、虚部の変化。

$$B_t = 0.15\text{T}, n_e = 2.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}, T_e = 100\text{eV}$$



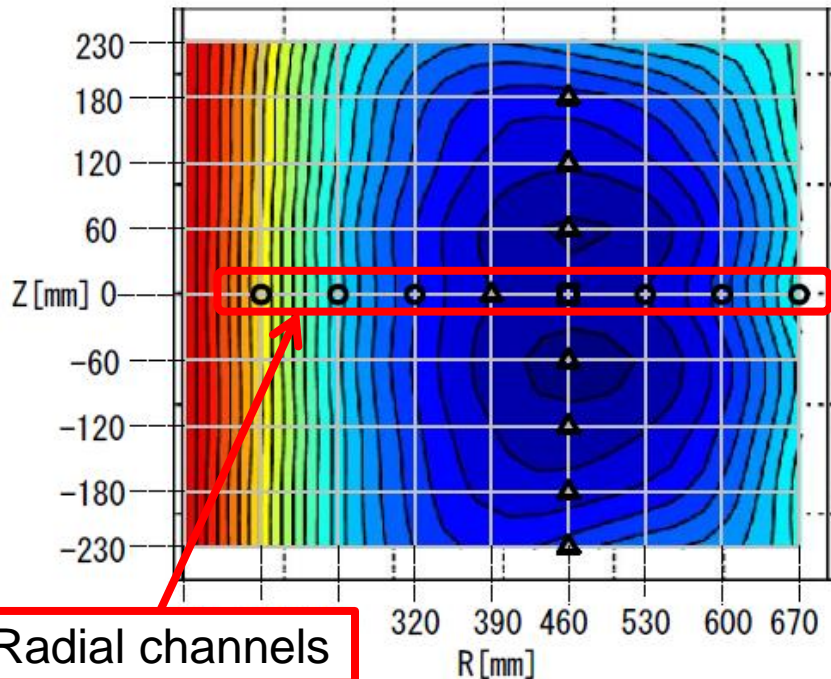
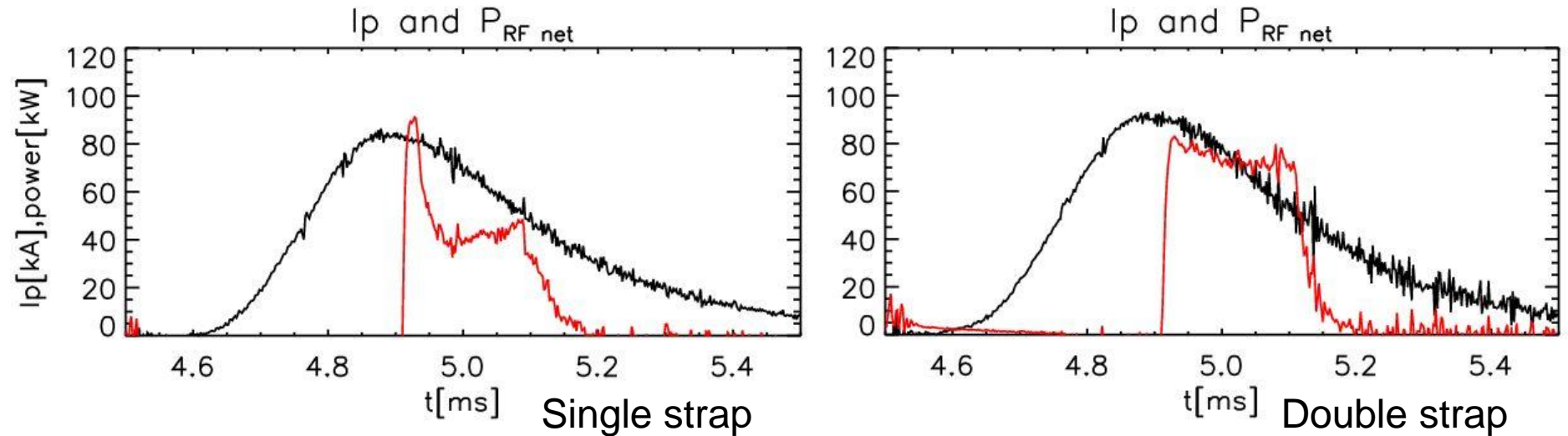
- 温度、密度にガウシアン分布を仮定したときのsingle-pass吸収計算。
- $n_{\phi} = 8$ のとき、吸収率は 0.18
- 高ベータ化 (T_e, n_e の増加、もしくは B_t の減少) によって吸収が改善することが分かる。
- 吸収はプラズマ中心 ($R = 0.48\text{m}$) に局在していることがわかる。

Single-pass 吸収

$$1 - e^{-2 \int \text{Im}(k_{\perp}) dx}$$

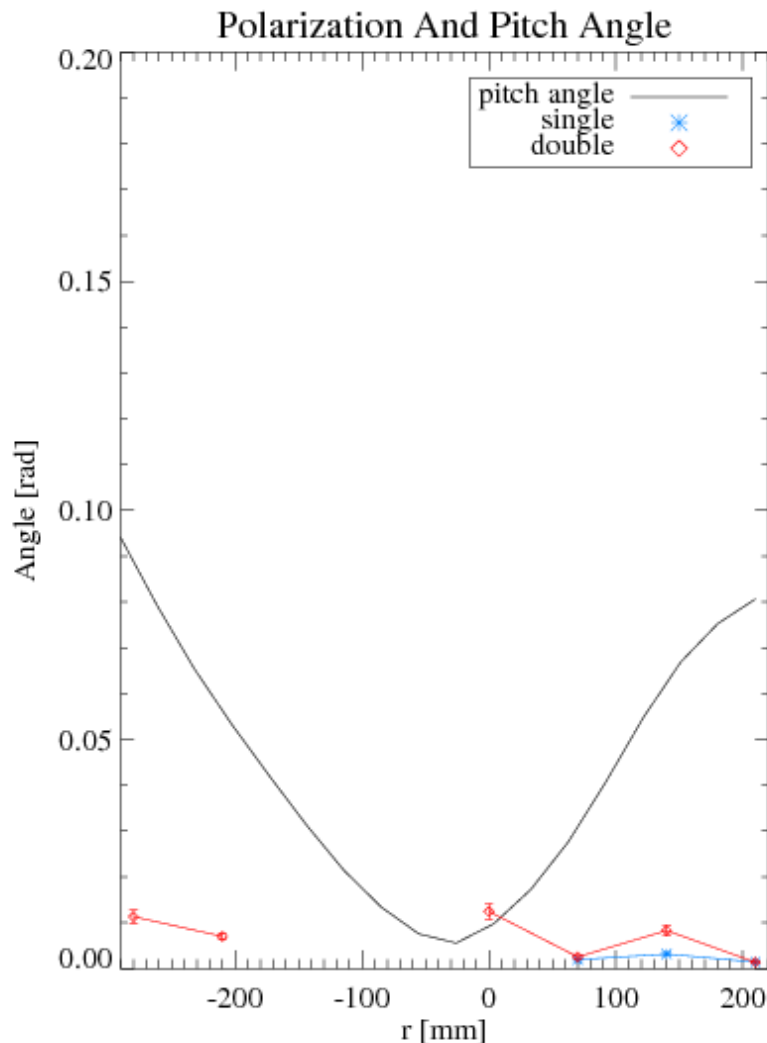
T_e の増加によりsingle-pass吸収が改善。

実験状況



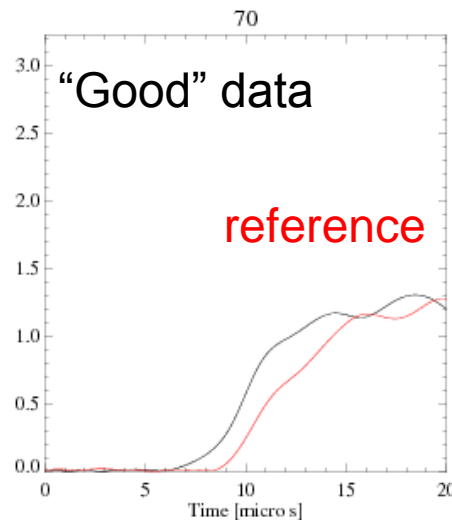
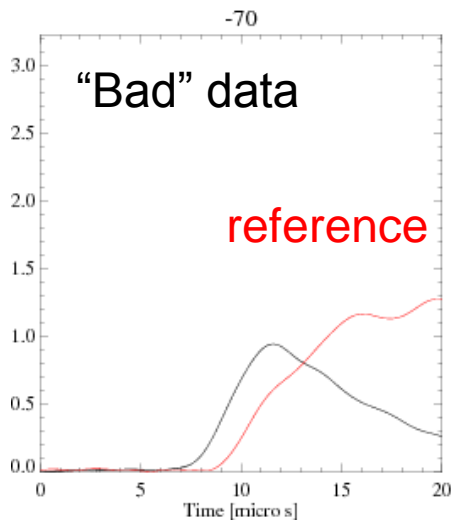
- プラズマ電流と入射RFパワー、そして磁気面と計測に用いた磁気プローブの配置を図示した。
- シングルストラップ入射において入射50 μ s後からの急激なマッチングの悪化が観測されているが、原因は特定されていない。

偏光測定

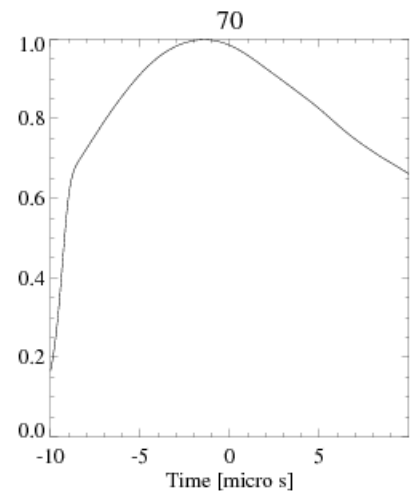
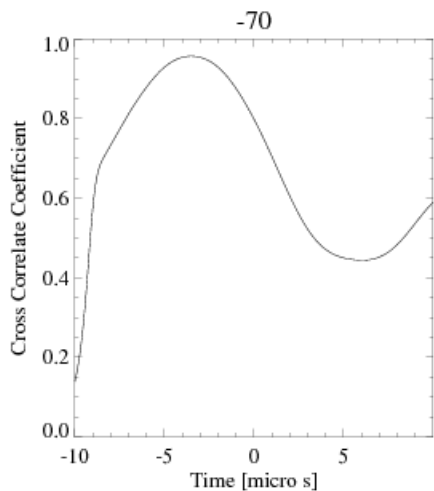


- 磁場のピッチ角とトロイダル磁場振幅と鉛直磁場振幅の比から求めた磁場の偏光方向をプロットした。
- いずれの測定点においてもRF磁場は強くトロイダル方向に偏光していることが分かる。
- これはプラズマ中にRFが速波であるHHFWとして伝播していることを示唆している。

信号遅れ解析



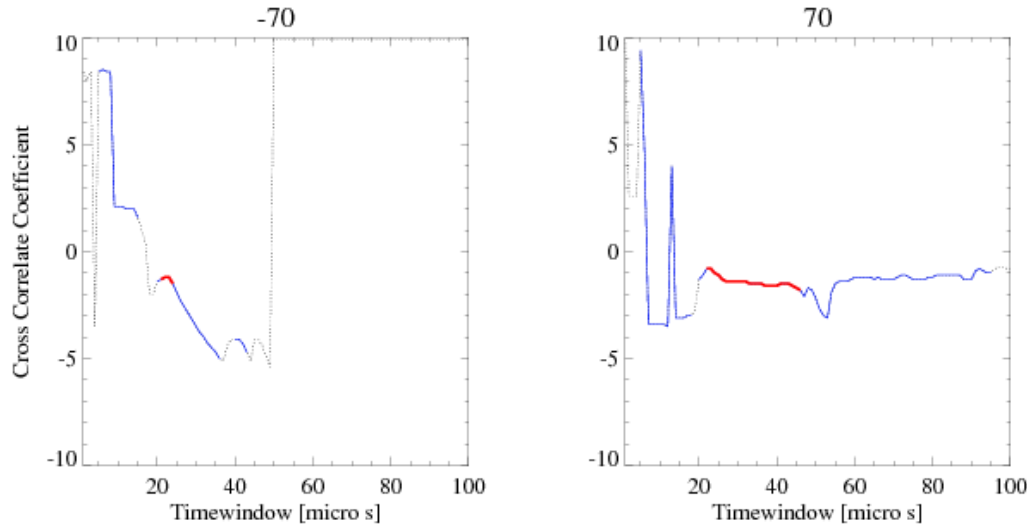
入射直後におけるRF磁場振幅の時間変化



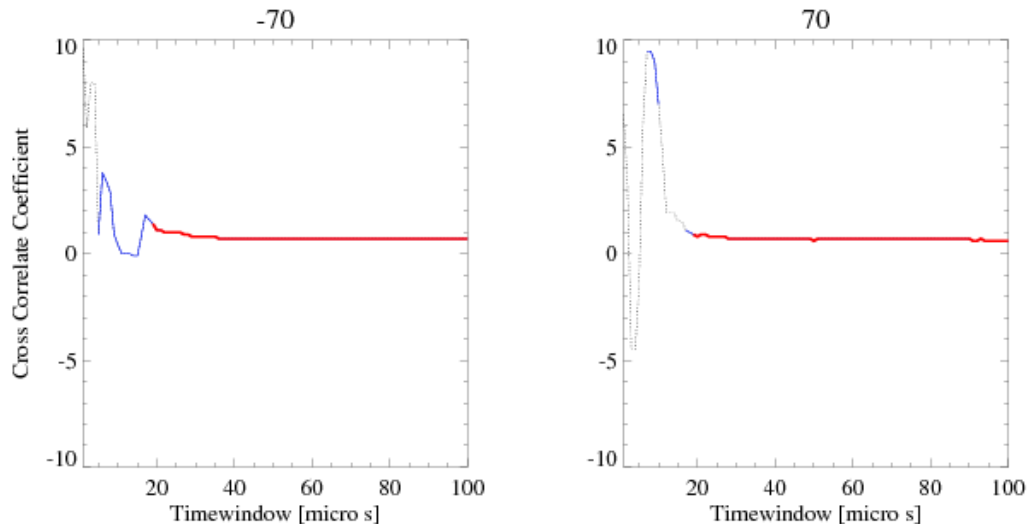
時間窓のずれと相互相関関数の関係

- 包絡線解析により得られたRF磁場振幅の時間変化に対し、入射タイミングを抜き出す時間窓をずらしながら、referenceプローブのデータとの相互相関係数を計算し、そのピークから入射タイミングのずれを解析した。
- このうち、相互相関係数のピークが0.99を超えるピークのみを有効データとして解析した。
- このデータは30 μ sの幅の時間窓を用いて解析したもの。

信号遅れ解析 その2



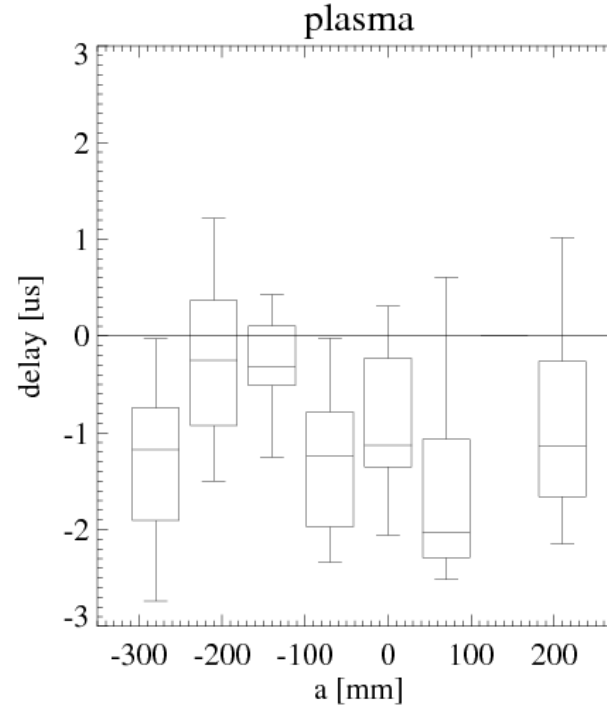
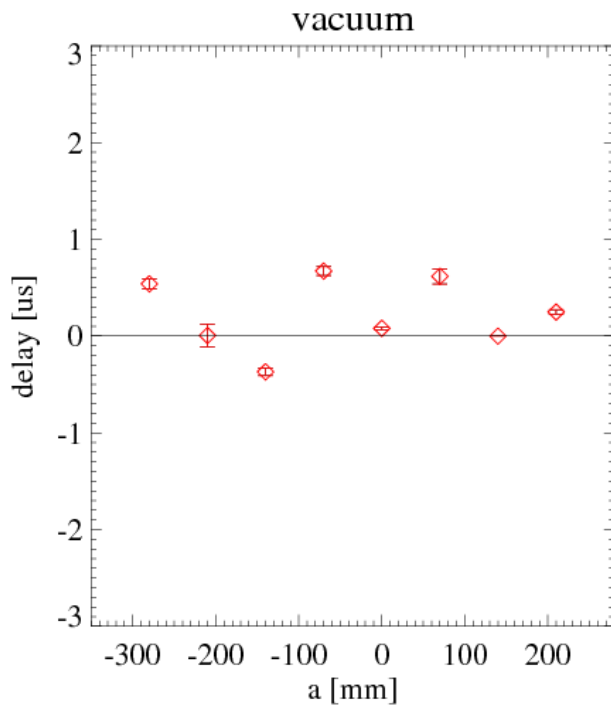
プラズマ入射時の信号遅れと時間窓の幅の関係



真空における信号遅れと時間窓の幅の関係

- 信号の立ち上がりを捉える時間窓の幅には自由度が存在する。
- そこで、時間窓の幅を変えながら相互相関係数のピークをプロットしたのが左図。
- 青は相互相関係数が0.9以上、赤は0.99以上の点を表す。
- 真空入射については信号入射のずれが時間窓の取り方によらない。

信号遅れ解析 その3

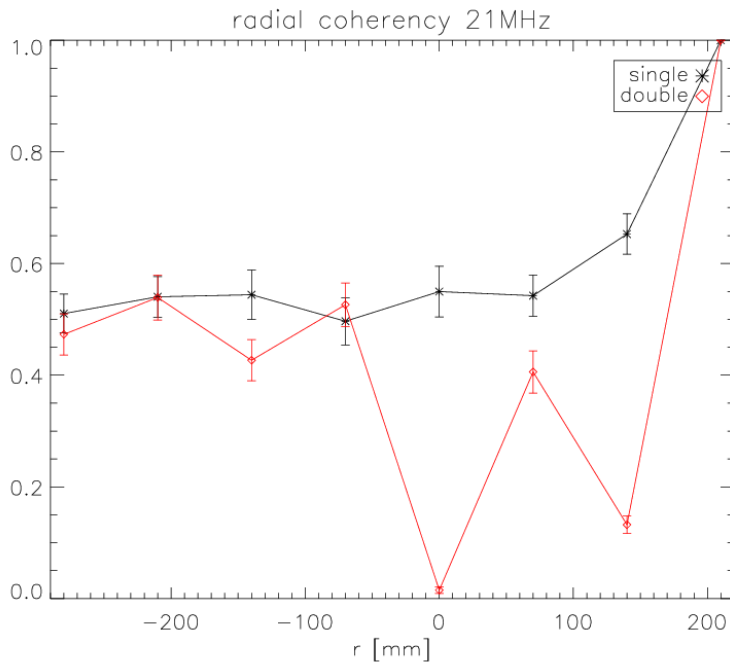


真空における信号遅れと、それをオフセットとして引いた時の、プラズマ入射における各チャンネルの信号遅れの解析結果。プラズマショットは箱髭図によってデータのばらつきをもに示している。

- プラズマショットで数 μs ほどの時間進みが観測された。
- これはプラズマの存在によってRFの伝播経路、伝播速度が影響を受けていることを示す。
- しかし、ショットごとにプラズマが大きく異なるため、全体としての傾向ははっきりしない。

コヒーレンス解析

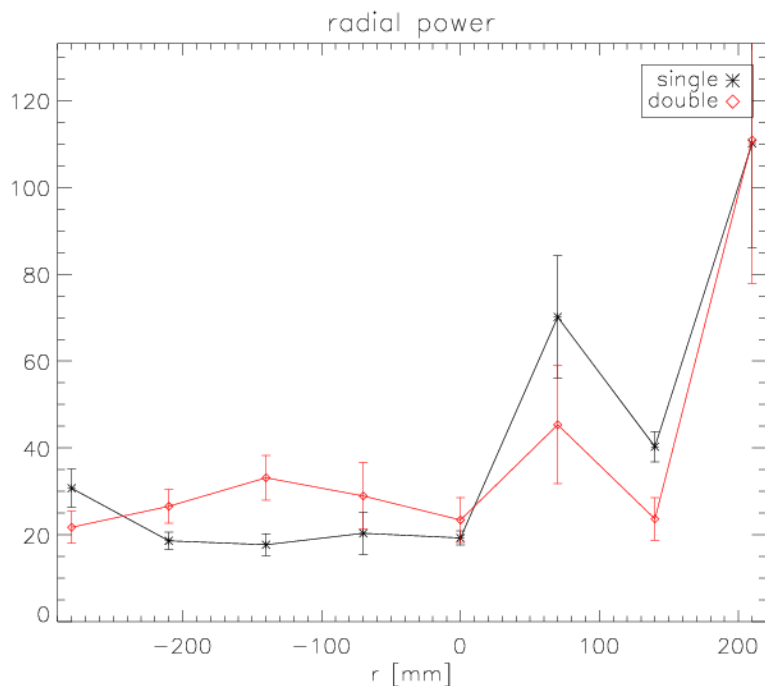
- 最も外側のプローブをreferenceとしてコヒーレンスを解析した結果。
- ダブルストラップ入射で磁気軸付近のコヒーレンスが落ちているのは、ショットごとのプラズマの変化を反映しているため。
- シングルストラップ入射ではダブルストラップ入射と比較してコヒーレンスがプラズマの変化の影響を受けていない可能性がある。



コヒーレンス解析データ

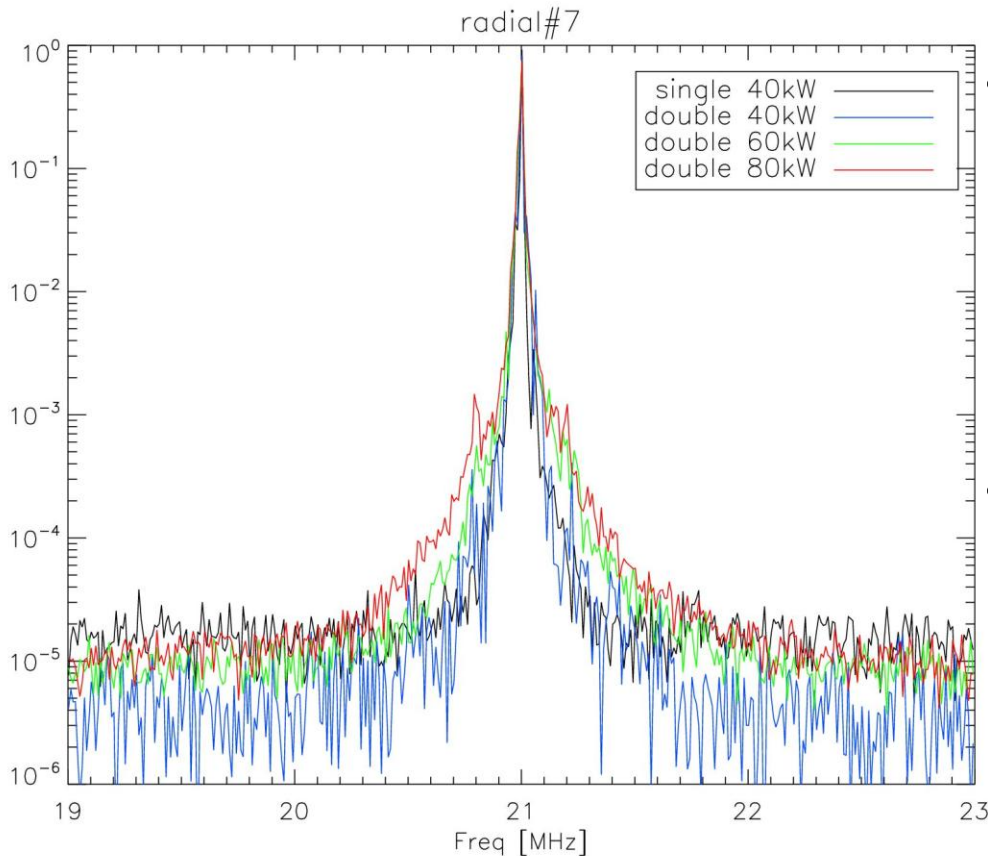
平均磁場振幅解析

- 磁気軸付近でダブルストラップ入射での振幅が小さくなっているが、決定的な差異ではない。
- Single-passでの計算結果と異なり、トーラス中心部でダブルストラップのほうが磁場振幅が大きい。
- 現在のパラメータでは吸収率が小さいため、single-pass計算のみでは十分な予測ができていない可能性がある。



平均磁場振幅を総入射RFパワーによって規格化したものをシングルストラップ入射と、ダブルストラップ入射で比較した。

周波数スペクトル解析



- TST-2やNSTXにおけるHHFW実験ではパラメトリック崩壊不安定性(PDI)による加熱効果の悪化が報告されている。
 - 一方、UTSTでは現在の入射パワー(<80kW)ではPDIが発生しないことがわかっている。
-
- 周波数スペクトルはダブルストラップ励起においてパワーが大きくなるほどに広がる傾向がある。
 - 40kWの入射において、シングルストラップ励起、ダブルストラップ励起の間に違いは見られない。

まとめ

- トロイダル方向、垂直方向の磁場の同時計測により、磁場振動は強くトロイダル方向に偏光していることが分かった。そのため、RFは速波としてプラズマ中を伝播していると考えられる。
。
- RFがある2地点間へ伝播するタイミングに、プラズマの影響によるずれが出ることをプラズマ中で直接観測することに成功した。
- コヒーレンス解析によりプラズマの変化の影響でコヒーレンスが悪化するという結果を得た。
- 平均磁場振幅はsingle-pass計算の結果と必ずしも一致するわけではない。
- 現在の所、UTSTにおけるHHFW入射実験ではPDIは観測されていない。

今後の実験指針

- 現在UTSTに設置されている磁気プローブはプローブ間距離が70mmとなっており、 k_{perp} を直接計測することができない。
- そこで、プローブ間隔の短いアレイを用意してプラズマ中に挿入することにより、 k_{perp} の直接計測を目指す。
- さらに、十分短い距離でコヒーレンス解析を行い、波の相関長を調べることにより、伝播経路に関する情報を得る。
- Referenceプローブとしてカレントプローブの設置。
- Ray traceないしはTORIC等の全波解析コードを用いた計算により、波のプラズマ中への伝播をより詳細に予測する。