

TST-2における高次高調速波による パラメトリック崩壊不安定性

第11回若手科学者によるプラズマ研究会

Mar 17th – 19th, 2008

Yuuki Adachi, Takuya Oosako


A. Ejiri, Y. Takase, O. Watanabe

S. Kainaga, T. Masuda, M. Sasaki, J.
Sugiyama

H. Tojo, T. Yamaguchi

The University of Tokyo

目的、動機

- 球状トカマク装置では高次高調速波(HHFW)を用いた電子加熱はプラズマ加熱の有効な手段の一つである。
- しかし近年、HHFW入射中にパラメトリック崩壊不安定性(PDI)現象によるサイドバンドの波が観測されており、加熱効率の低下が示唆される。
- 発生条件を定量的に評価、理解  重要である。
- 今回は、以前には見られなかった新しいサイドバンドが確認されたので、その定性的評価について発表する。
- また、高速光計測によるポンプ波の計測に成功したのでそれについても発表する。

球状トカマク装置TST-2



大半径 $R_0 \sim 0.38\text{m}$

小半径 $a \sim 0.25\text{m}$

アスペクト比 $R_0/a \sim 1.5$

トロイダル磁場 $B_t \sim 0.2\text{T}$

電子密度 $n_e \sim 10^{19}\text{m}^{-3}$

プラズマ電流 $I_p \sim 120\text{kA}$

HHFW:

$f_0 = 21\text{MHz}$

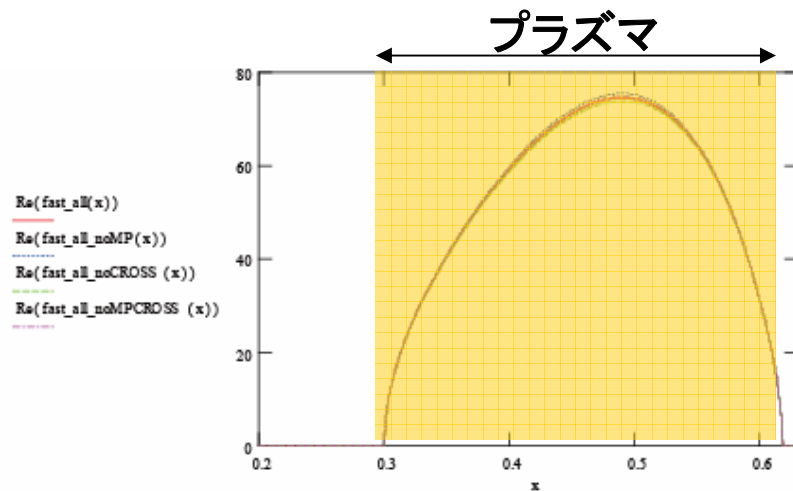
$N_{\text{toroidal}} \sim 10$

$P < 200\text{kW} \times 2$

HHFWの伝播と減衰

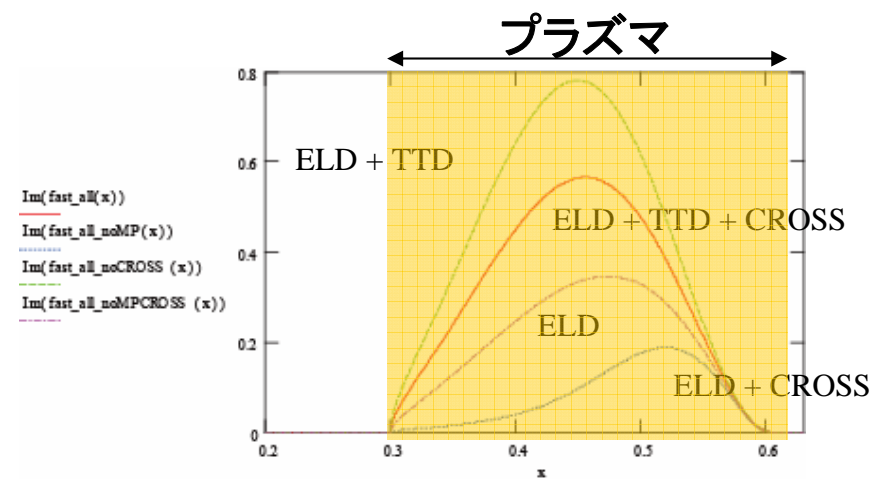
Real (k_{\perp}), Imag (k_{\perp}) の空間分布

Real (k_{\perp}) (伝播)



Real (k_{\perp}) > 0 なのでHHFWは
プラズマ中を伝播することができる

Imag (k_{\perp}) (減衰)



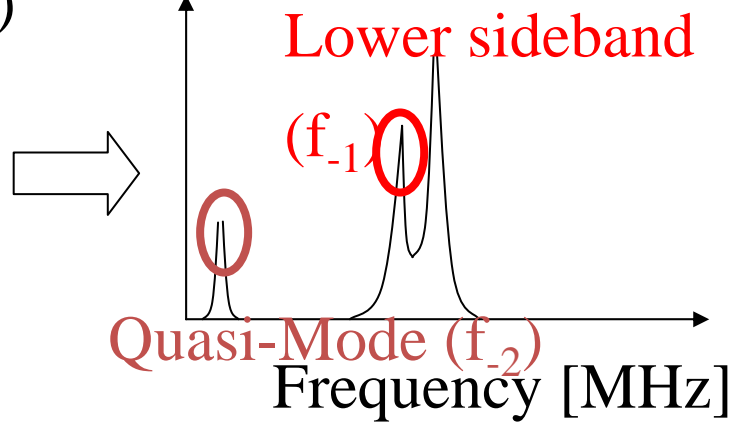
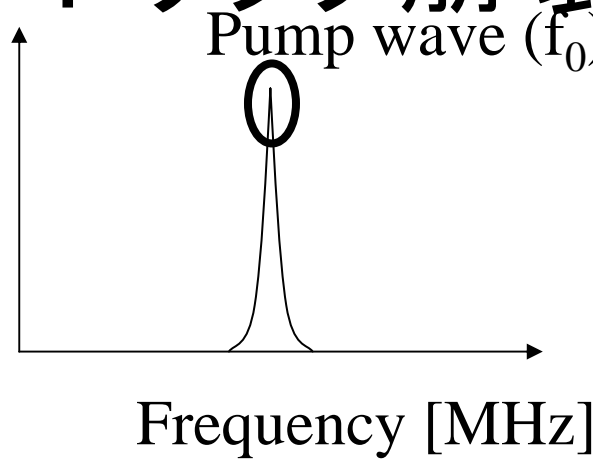
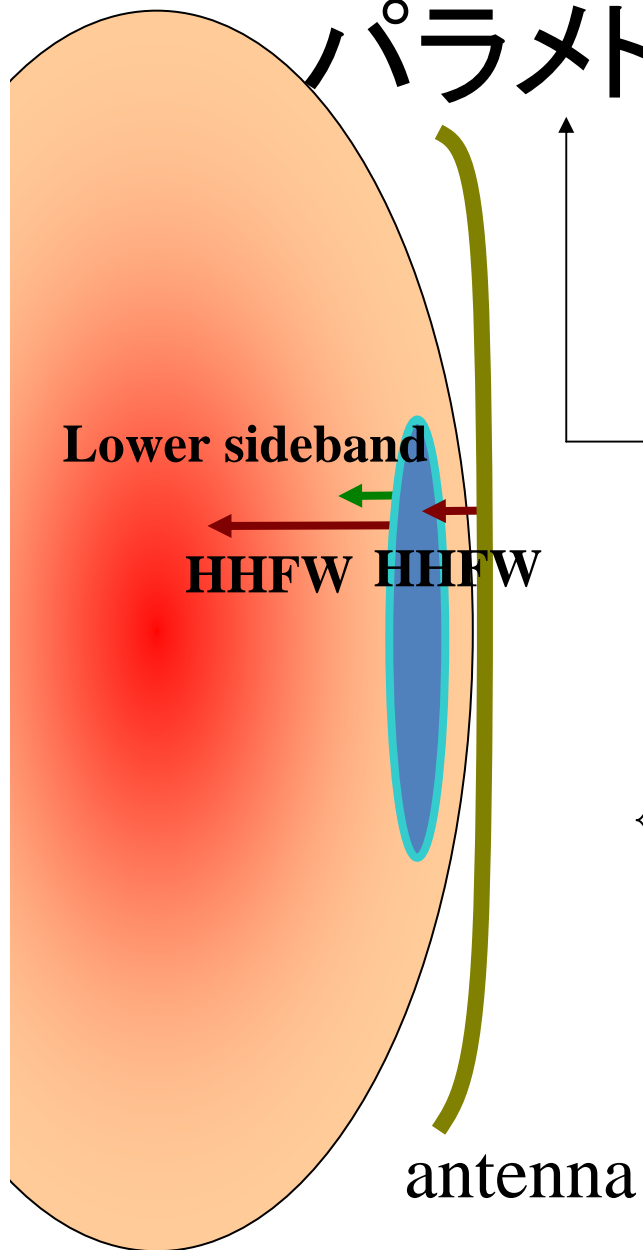
Imag (k_{\perp})が大きければそれだけ
HHFWはプラズマに吸収される
TTDの寄与が非常に大きい

Single-pass での吸収率は

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

$$= 0.18$$

パラメトリック崩壊不安定性



Pump wave : original wave (HHFW)

Lower sideband : FW or IBW

damp at plasma edge

Quasi-Mode : just density fluctuation

don't propagate

matching

$$\omega_0 = \omega_{-1} + \omega_{-2} \quad k_0 = k_{-1} + k_{-2}$$

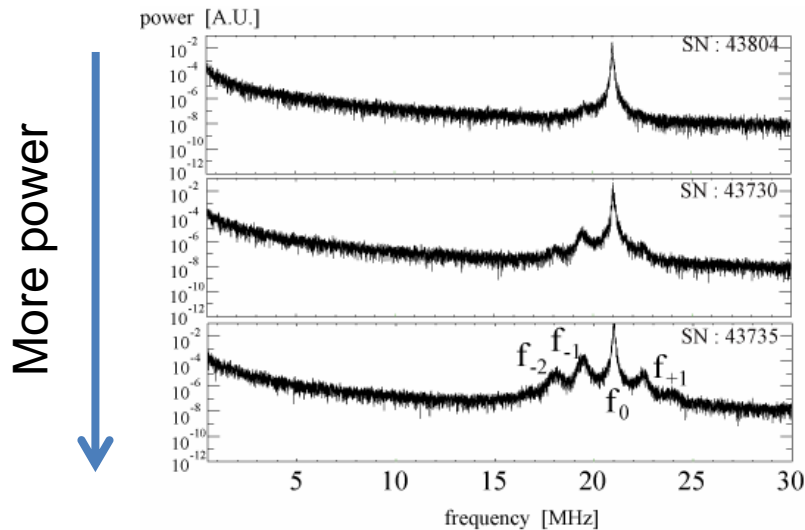
PDIの測定

パラメトリック崩壊不安定性(PDI)とは

媒質を介した波動の非線形相互作用

$$\omega_0 = \omega_1 + \omega_2 \dots$$

過去にTST-2で観測された例

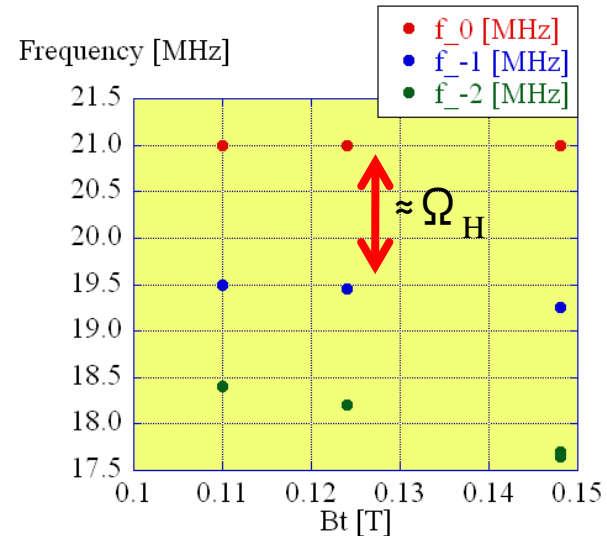


Ω_H = Ion cyclotron frequency (Hydrogen)

$f_0 \approx 21$ MHz (ポンプ波)

$f_{1,-1} \approx f_0 \pm \Omega_H$ (サイドバンド)

$f_{2,-2} \approx f_0 \pm 2\Omega_H$ (サイドバンド)



T. Oosako Master thesis (2006)

新たに検出されたPDIピーク

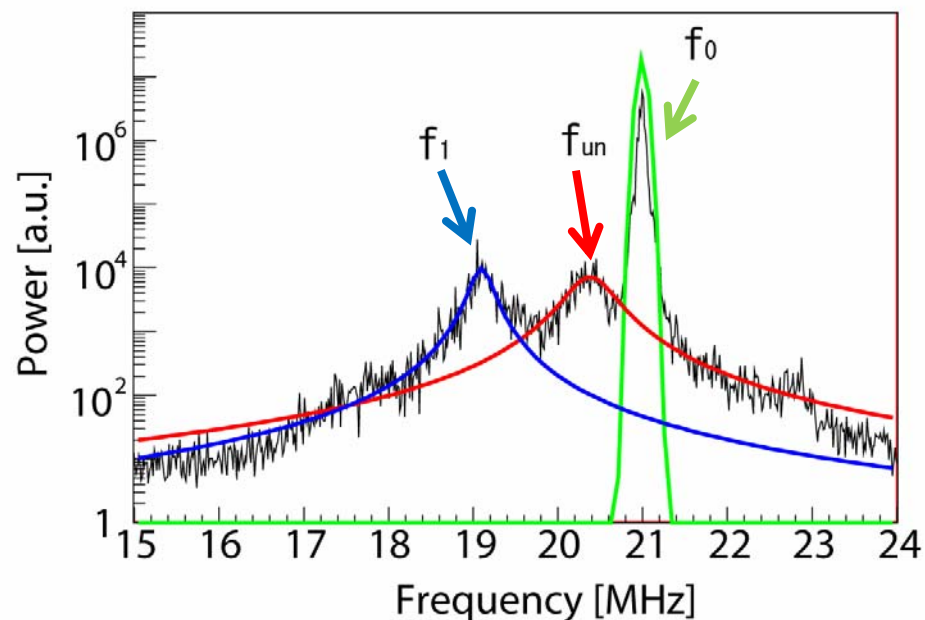


図2 RF磁気プローブによるPDIの測定

- 水素プラズマ
- $f_0 \approx 21\text{MHz}$
- $f_1 \approx f_0 - \Omega_H$
- f_0 と f_1 の間に新たなピーク(f_{un})
- 発生条件は電子密度

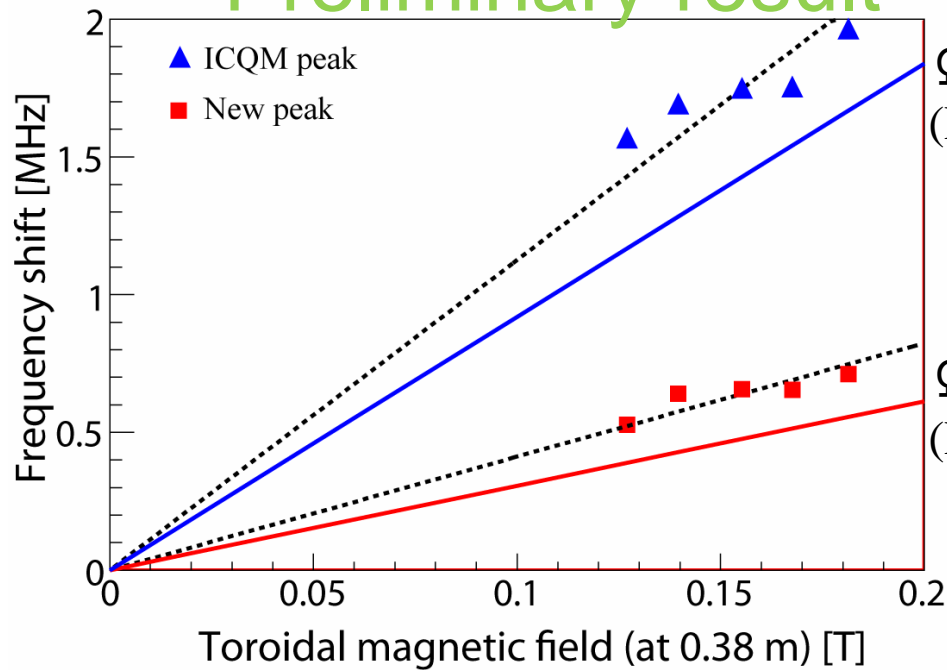
放電条件:

Shot	48796
Bt	0.16T
I _p	75kA
t(discharge)	10ms
t(HHFW)	2ms

トロイダル磁場依存性

ポンプ周波数に対するサイドバンド周波数のずれ

Preliminary result



Blue points: Ω_H に対応
 $f_{\text{shift}} = (11 \pm 2.9)Bt$ (dashed line)
 Ω_H (R=0.63m)

Blue line
 Ω_H (at 0.63m) に対応

Red points: new peak に対応
 $f_{\text{shift}} = (4.1 \pm 2.9)Bt$ (dashed line)
 $\Omega_H/3$ (R=0.63m)

Red line
 $\Omega_H/3$ (at 0.63m) に対応

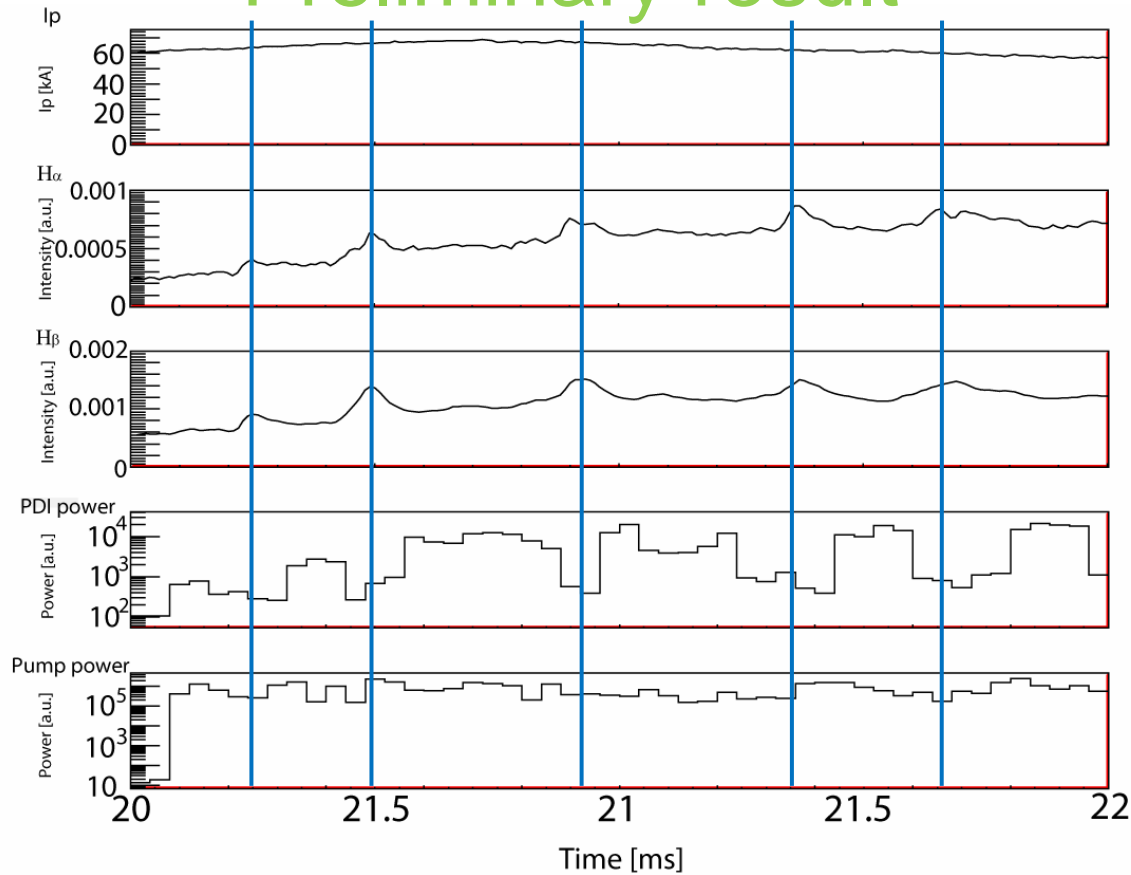
➡ TF磁場に比例する

➡ H⁺以外のサイクロトロン周波数に対応する？

H²⁺, H³⁺, C²⁺, Alfvén mode

ライン発光強度との関係

Preliminary result



— 発光量変化の計測された時間

RF入射中の $H_{\alpha,\beta}$ の発光量変動



PDIの強度変動と対応してる

H_β 発光	検出したPDIのパワー
増加	減少
減少	増加



周辺プラズマの状態に左右
されていると考えられる



H^+ イオン以外のイオンによる
PDI現象が示唆される証拠

光計測を用いた静電波の測定

- ポンプ波の伝搬
静電波として伝搬



静電波の電場変化による密度揺動を観測できる



反射計を用いて等密度面の揺動計測が行われている

- 高速光計測を用いた計測
(径方向の位置同定に用いることが可能)

プラズマの発光過程:

1. 熱制動放射

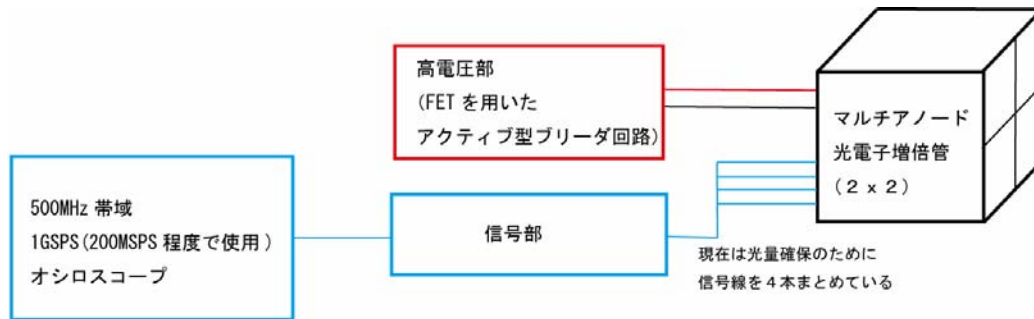
$$\frac{dW(T)}{dVdt} = \left(\frac{2\pi k}{3m}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{2^5 \pi e^6}{3hmc^3} Z^2 n_e n_i T^{\frac{1}{2}} g_B$$

2. 脱励起
(CIII, OV, ...)

$$\frac{dW(T)}{dVdt} = n_i n_e \frac{h^3 \nu \Omega(T) B}{4\omega} \left[\frac{2}{\pi^3 mkT} \right]^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

発光変動量は第1近似で密度揺動に比例すると考えられる。

高速光計測装置



信号部 :

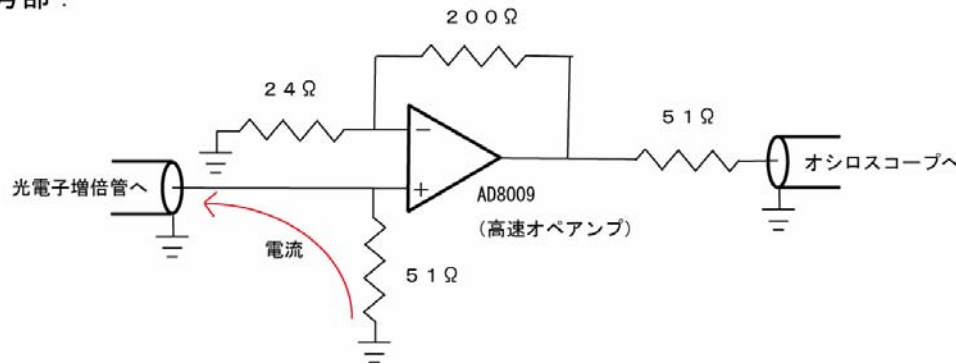
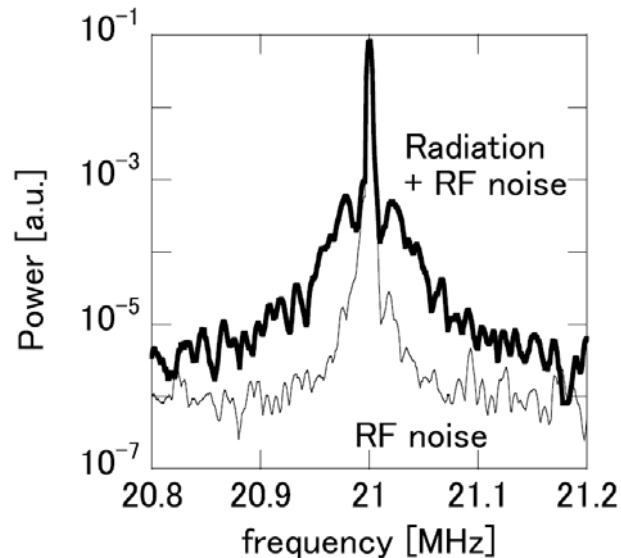


Photo-diodeと比べた場合

- PMTの利点
 - 信号増幅効果
 - SN比の向上
 - 応答性(立ち上がり5ns)
- PMTの欠点
 - Dynamic rangeの低下
 - 平均飽和電流

高速光計測装置による測定

Photo-diodeを用いたシステム



光電子増倍管を用いたシステム

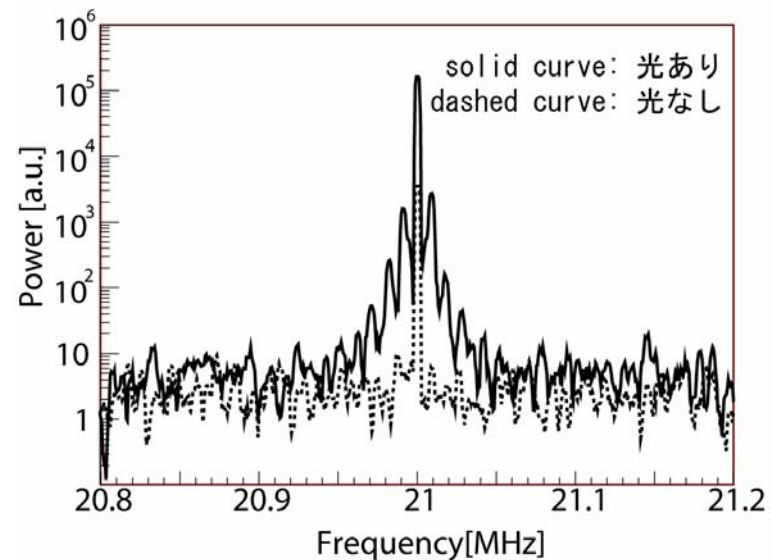
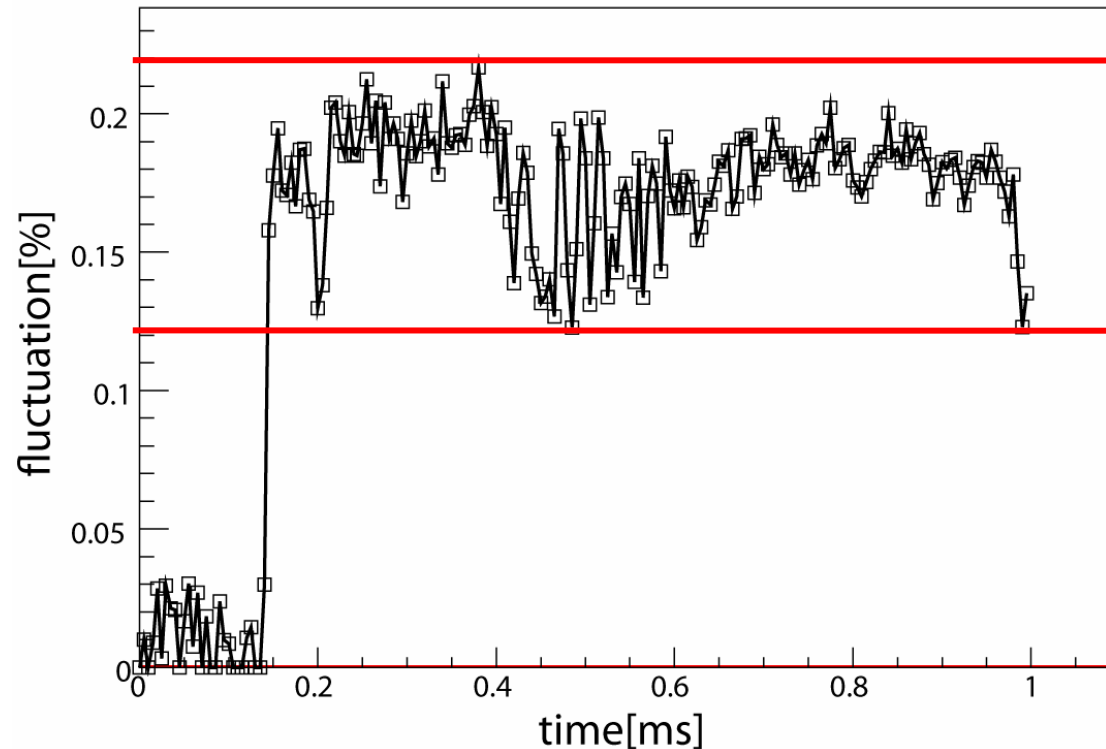


図1 高速光計測によるポンプ波の周波数スペクトル

- ポンプ波の測定に成功した
- 密度揺動によるポンプ波の広がりが見える

電子密度揺動量の見積もり

Preliminary result



仮定:

n_e = DC光成分

Δn_e = 21MHz成分

$$\frac{\Delta n_e}{n_e} \approx \frac{\text{AC light}}{\text{DC light}}$$

$$= 0.12\% \sim 0.22\%$$

反射計による見積もりは0.3%程度

← オーダーで一致



高速光計測を用いてポンプ波の伝搬を評価できる

まとめ

- PDIに関して分かったこと

- HHFW入射時にH⁺以外のイオンによる相互作用が示唆される
- H_β線の強度と負相関がある
- 周辺プラズマの温度、密度、イオン種に影響されると考えられる
- しかし、Alfven modeの可能性も否定できない

- 高速光計測による測定

ポンプ波を測定することができ、電子密度の揺動量を推定できた



周辺プラズマ中に存在するイオン種の同定

周辺部での圧力変化を測定

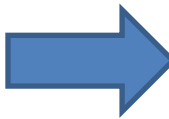
高速光計測を用いたPDI成分による電子密度揺動を測定する可能性の追求

backup

光量の見積もり

過去の分光器による測定から予想される光量

lines	波長 [nm]	強度 [W/mm ²]	光量 [photon/mm ² /s]	Total [photon/s]
H α	654.6	1.73E-06	5.70E+12	4.14E+19
H β	484.453	2.59E-07	6.31E+11	4.58E+18
H γ	432.906	1.90E-07	4.14E+11	3.01E+18
OIII	372.517	5.32E-07	9.98E+11	7.24E+18
OV	276.324	7.23E-07	1.01E+12	7.30E+18
CIII	463.182	9.39E-07	2.19E+12	1.59E+19
CIII'	227.462	1.13E-06	1.30E+12	9.42E+18
CV	225.095	1.46E-06	1.65E+12	1.20E+19

ピックアッププローブによる測定から  光量はポンプ波の強度に対して

1/30

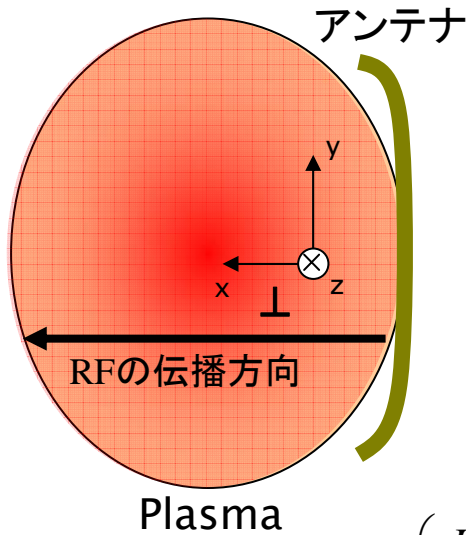
密度変化に対し光量変化が1:1であれば
PDIの測定も可能

光計測の利点と欠点

- 利点:
- ラインスペクトルに限ること
プラズマのエッジ部分、コア部分など大まかな
温度分布を反映した測定が可能
 - 真空容器の外で測定できる
システムを組みやすく視線を自由に変更される
 - RFピックアッププローブと比べ
プラズマの内部情報を捉えている
 - 高速測定が可能である

- 欠点:
- 視線積分した情報
 - DC成分が存在する
 - 高精度測定が必要となる

Single-pass計算によるHHFWの有効性



波 $e^{i(\vec{k}\cdot\vec{r}-\omega t)} = e^{-i\omega t} e^{ik_r r - k_i r}$

kr : 伝播
ki : 減衰(プラズマに吸収)

波動方程式 $\nabla^2 \vec{E} - \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) + \frac{\omega^2}{c^2} \vec{\epsilon} \cdot \vec{E} = 0$

$$\det \begin{pmatrix} K_{xx} - n_{\parallel}^2 & -iK_{xy} & K_{xz} + n_{\perp} n_{\parallel} \\ iK_{xy} & K_{yy} - n_{\perp}^2 & -iK_{yz} \\ K_{xz} + n_{\perp} n_{\parallel} & iK_{yz} & K_{zz} - n_{\perp}^2 \end{pmatrix} = 0$$

n: Refractive index (=ck/ω)
ω=2πf, f: wave frequency
c: velocity of light
k: wave number

$$\det \begin{pmatrix} K_{xxc} - n_{\parallel}^2 & -iK_{xyc} & n_{\perp} n_{\parallel} (1 + \delta) \\ iK_{xyc} & K_{xxc} - n_{\parallel}^2 - n_{\perp}^2 (1 - \delta_m) & -in_{\perp} \delta_x K_{zz} \\ n_{\perp} n_{\parallel} (1 + \delta) & in_{\perp} \delta_y K_{zz} & K_{zz} - n_{\perp}^2 \end{pmatrix} = 0$$

Labels in diagram:
- TTMP term: points to $n_{\perp} n_{\parallel} (1 + \delta)$
- Cross terms: points to $-in_{\perp} \delta_x K_{zz}$ and $in_{\perp} \delta_y K_{zz}$
- ELD term: points to $K_{zz} - n_{\perp}^2$

パラメータ

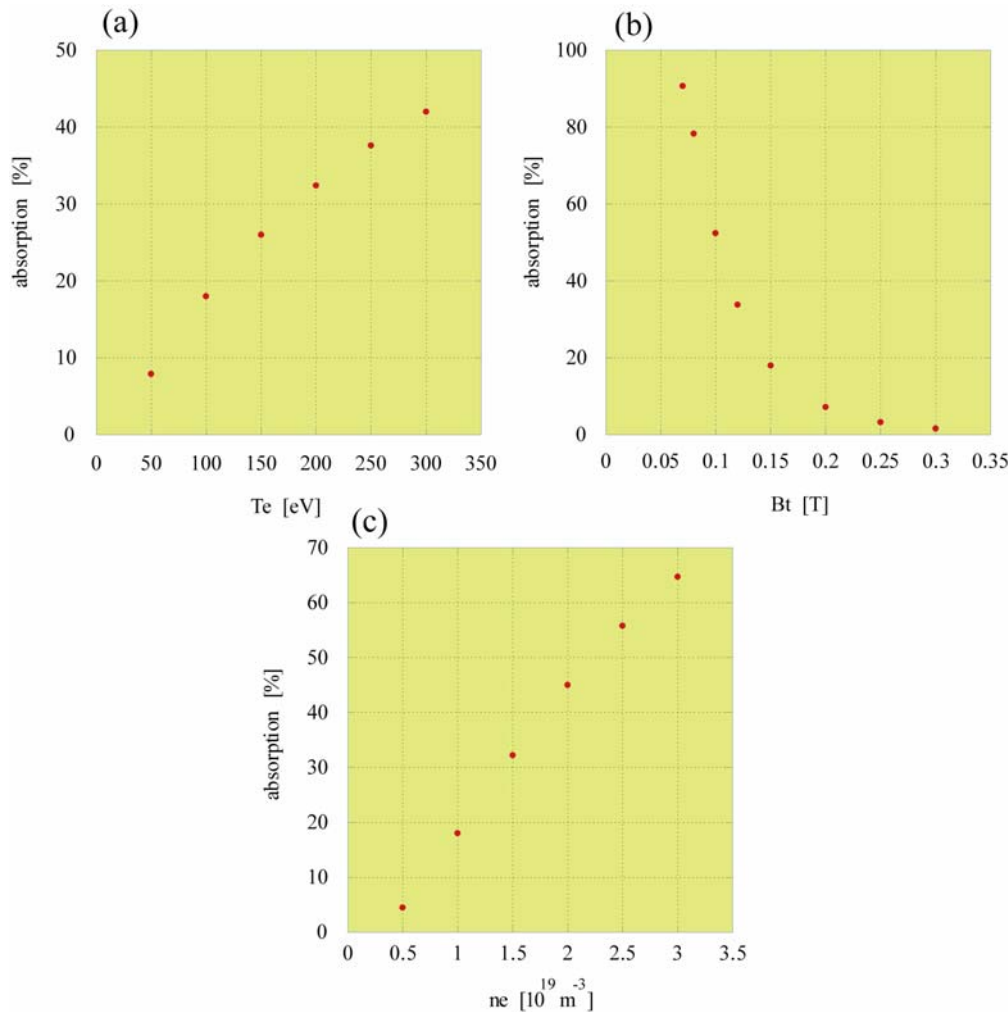
$B_T = 0.15\text{T}$
 $n_e = 1.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$
 $T_e = 100\text{eV}$
 $N = 10$

at R=0.38m

→ $k_{\perp r}, k_{\perp i}$ を求めることで
HHFWの伝播、減衰が
分かる

Single-pass計算によるパラメータ依存性

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

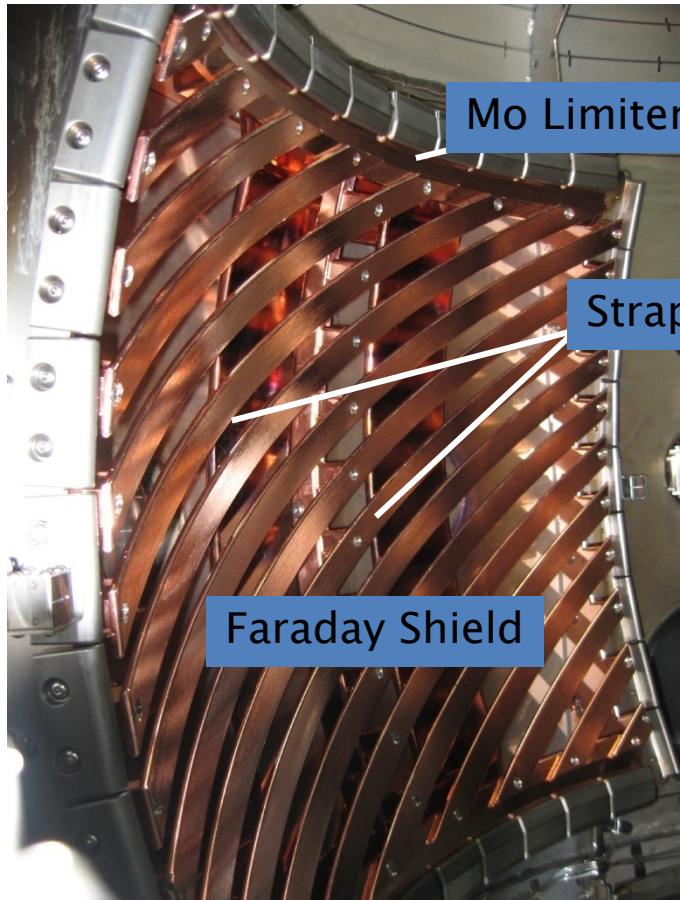


吸収のよい条件は

- ・高密度
- ・高電子温度
- ・低磁場



高 β プラズマに有効

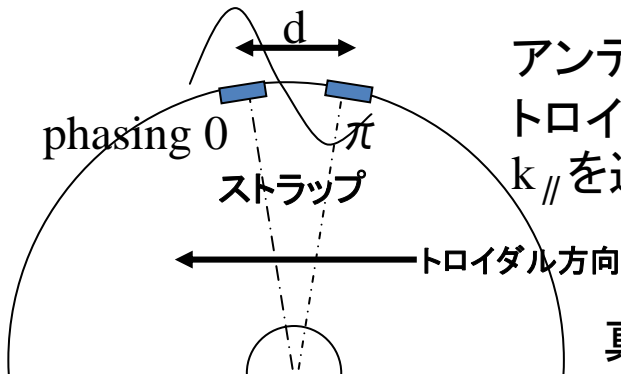
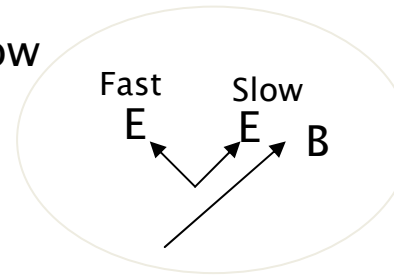


アンテナ

アンテナからHHFWを励起する
 frequency: 21 MHz
 ($\omega/\Omega_H \sim 7$ at $B_T=0.2T$)

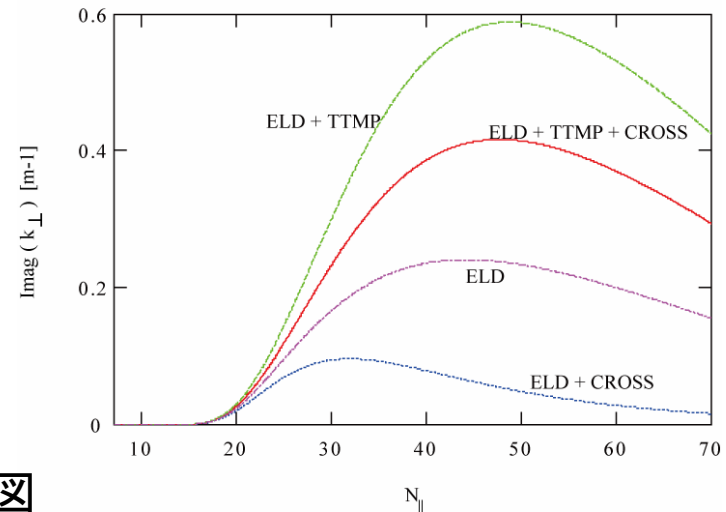
$k_{||} = 11, 16, 26 \text{ m}^{-1}$ (at R_0)
 Faraday shield angle $\sim 30^\circ$

ω/k : Fast > Slow

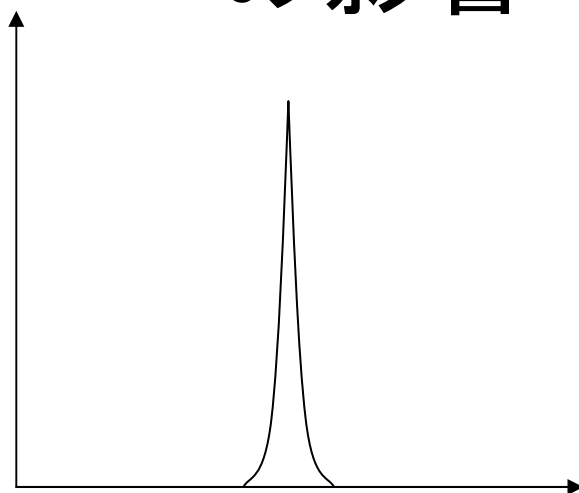
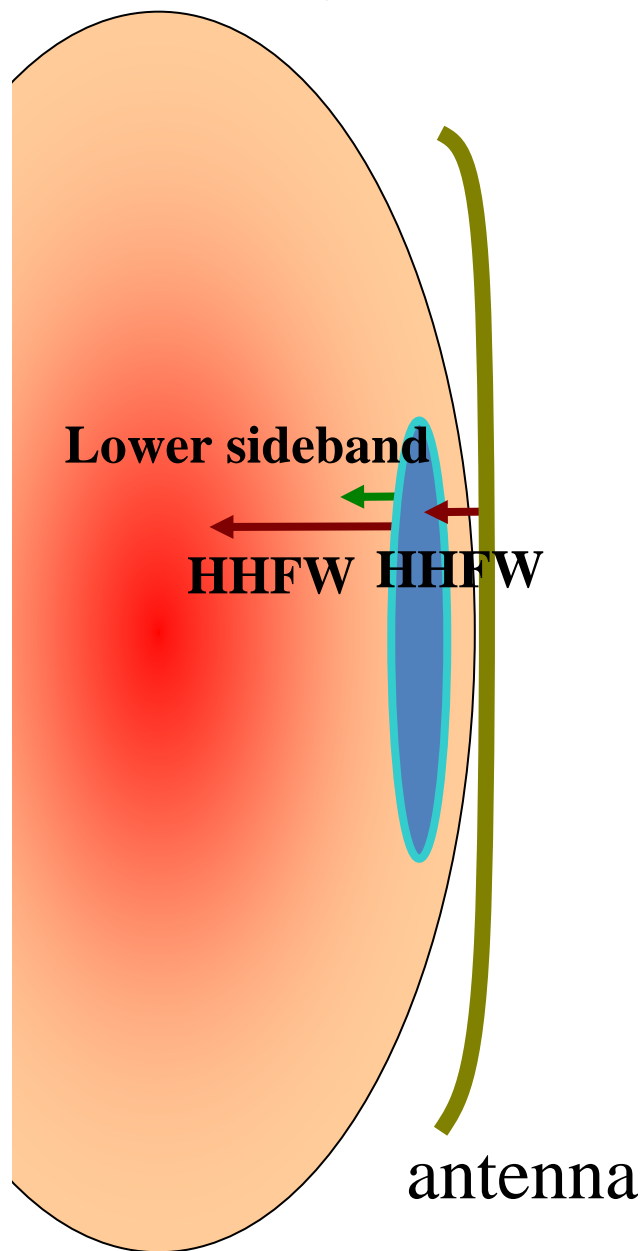


アンテナの距離dにより
 トロイダル方向の波数
 $k_{||}$ を選択することができる

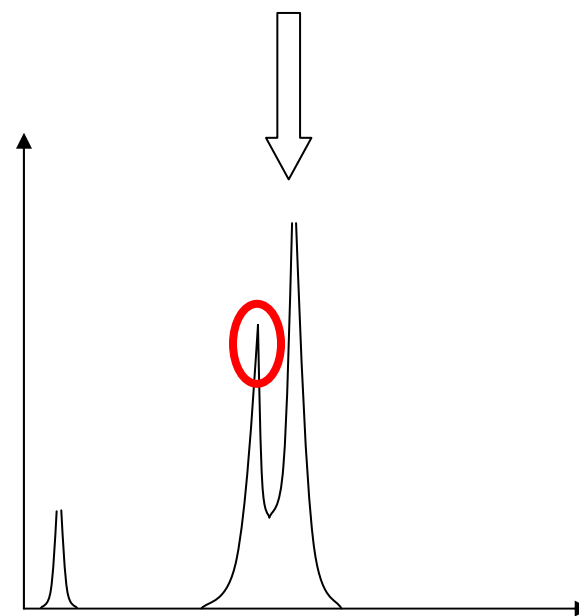
真空容器を上から見た図



パラメトリック崩壊不安定性のHHFW への影響



PDIが起きる位置で
モード変換された波が生成
↓
この波は周辺部でプラズマに
吸収される

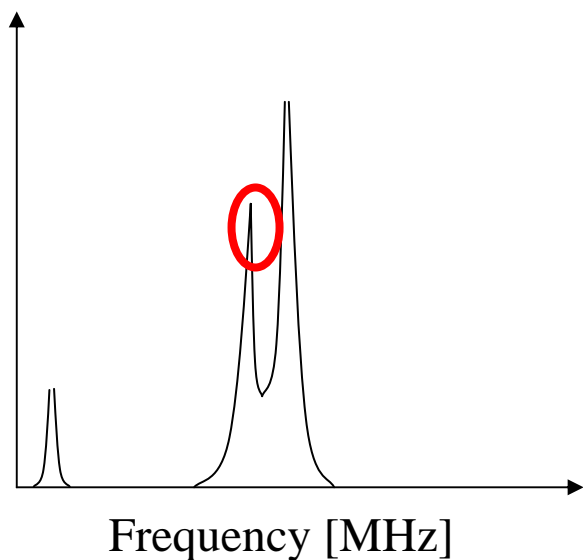


↓
周辺加熱を起こす
↓
周辺部は閉じ込めが悪い
ので加速された電子は
プラズマの外へ逃げる
↓
加熱効率の悪化

Frequency [MHz]

Lower sidebandの伝播、減衰

Lower sidebandとしてIBWの場合を考える



周辺部で100%プラズマに吸収されてしまう！

