

平成25年度合同会合：
第1回プラズマ物理クラスター・スクレープオフ層とダイバータサブクラスター
第3回炉工学クラスター・ブランケットサブクラスター
第1回炉工学クラスター・ダイバータサブクラスター
筑波大学プラズマ研究センターシンポジウム
双方向型共同研究「磁化プラズマ中の壁不純物粒子挙動とプラズマ特性への影響」
平成25年8月29日(木) -30日(金) @つくばサイエンスインフォメーションセンター

先進マイクロ波計測器の開発と高温プラズマ実験への適用に関する研究

徳沢季彦、小波蔵純子¹、吉川正志¹、嶋頼子¹、
長山好夫、川端一男、間瀬淳²



National Institute for Fusion Science



¹ *University of Tsukuba*



² *Kyushu University*



本研究課題における「先進」の意味

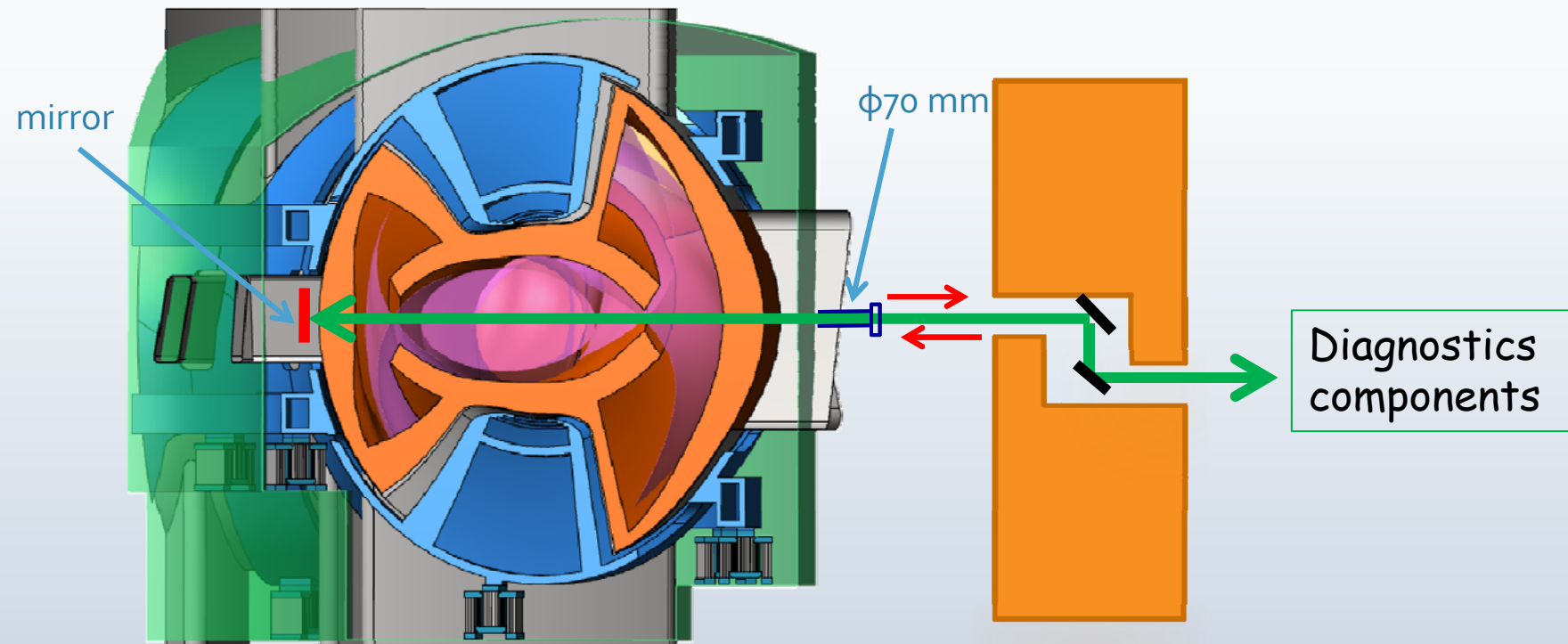
- 技術的「先進」性のみを意図するものではなく、むしろ
- 将来の装置においてマイクロ波計測適用を行うために必要となる要素を「先進」としている。（「先取？」）



- 「素」でかつ「堅牢」な計測手法の原理実証
 - マイクロ波パルス計測手法の適用
 - 周波数領域の拡大：「マイクロ波からテラヘルツ波へ」
 - シミュレーションの高精度化
 - ドップラー反射計の適用
- ➔ 原理実証をGAMMA10プラズマを用いて行う。

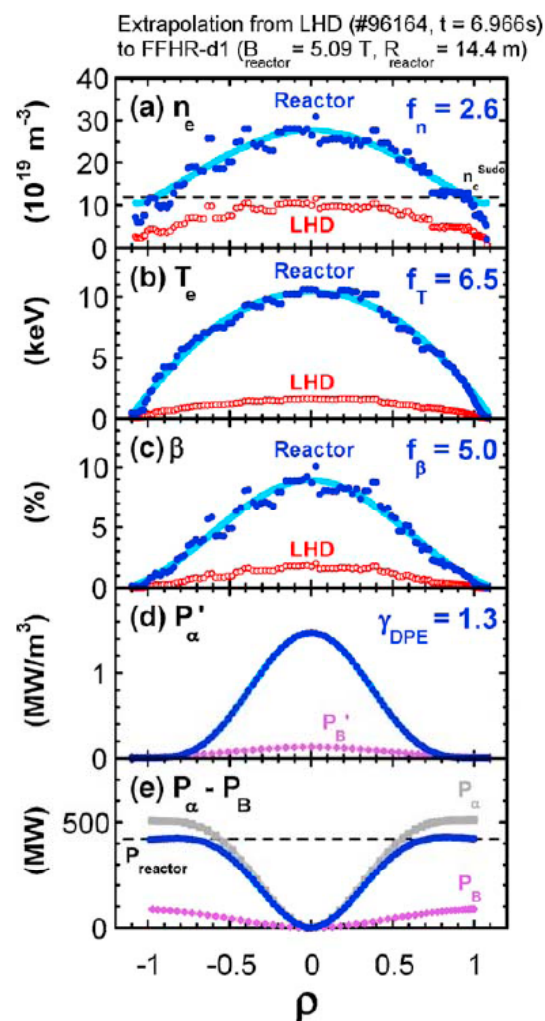


Microwave Diagnostics

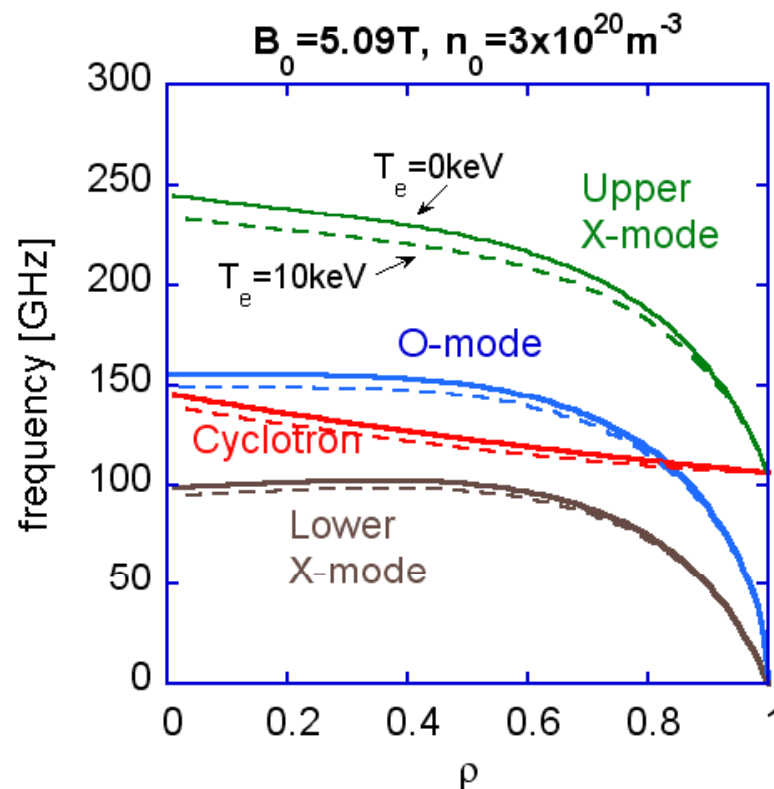


✓ All components are located outside neutron /radiation protection (similar to ITER: → We will be able to study and use the experience in ITER)

マイクロ波-テラヘルツ波計測



FFHR-d1炉心プラズマにおける想定される特性周波数の半径方向分布。正常波カットオフ(O-mode)、異常波カットオフ(X-mode)およびサイクロトロン周波数を示している。また想定される電子温度(10keV)における相対論効果による周波数変化を点線で示している。

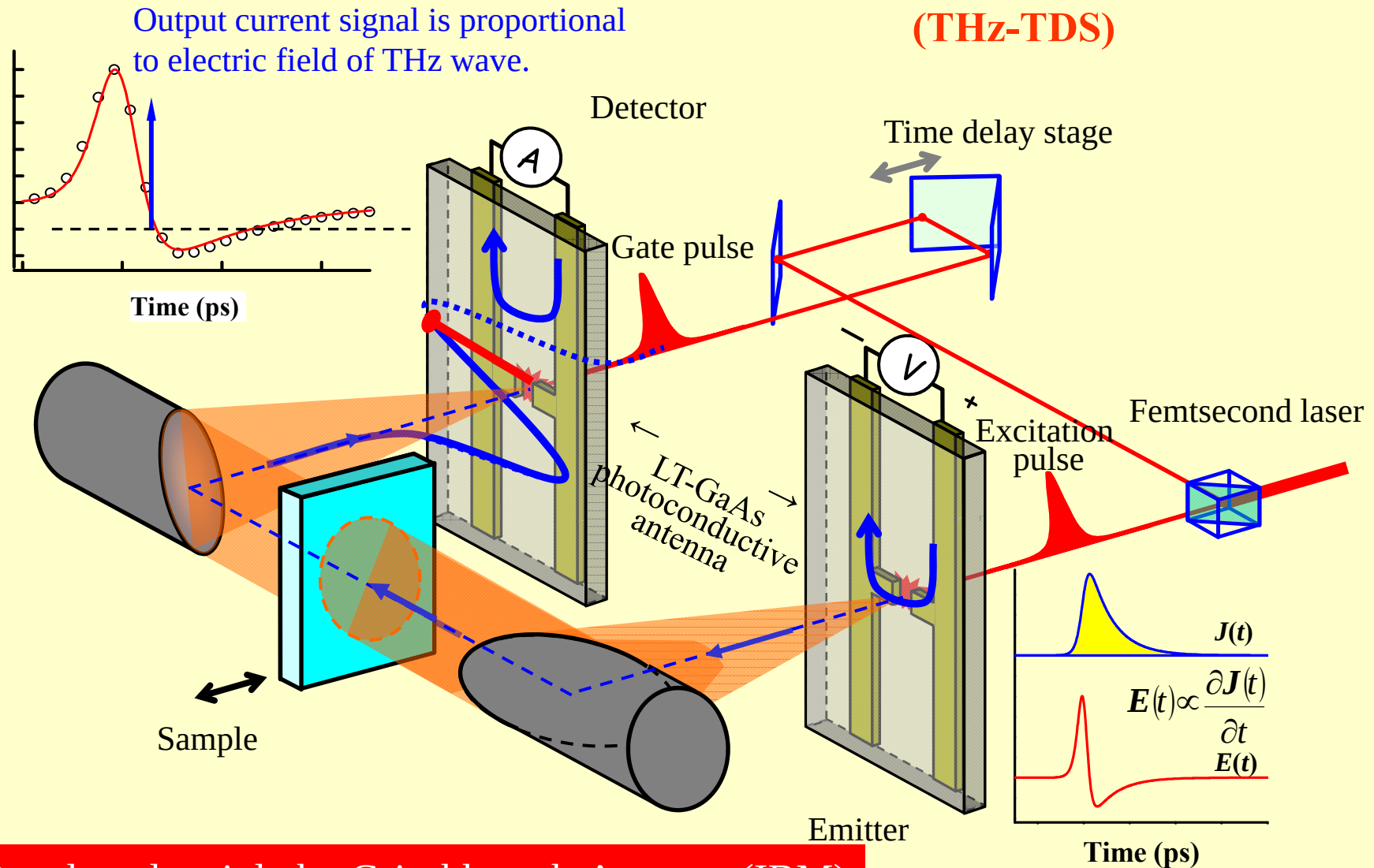


Ref: A. Sagara *et al.*, Rev. Fusion Eng.
Des. **87** (2012) 594.

相対論効果は(トカマクで懸念されているより)小さい

Emission and Detection of THz Waves

Terahertz Time-Domain Spectroscopic System (THz-TDS)

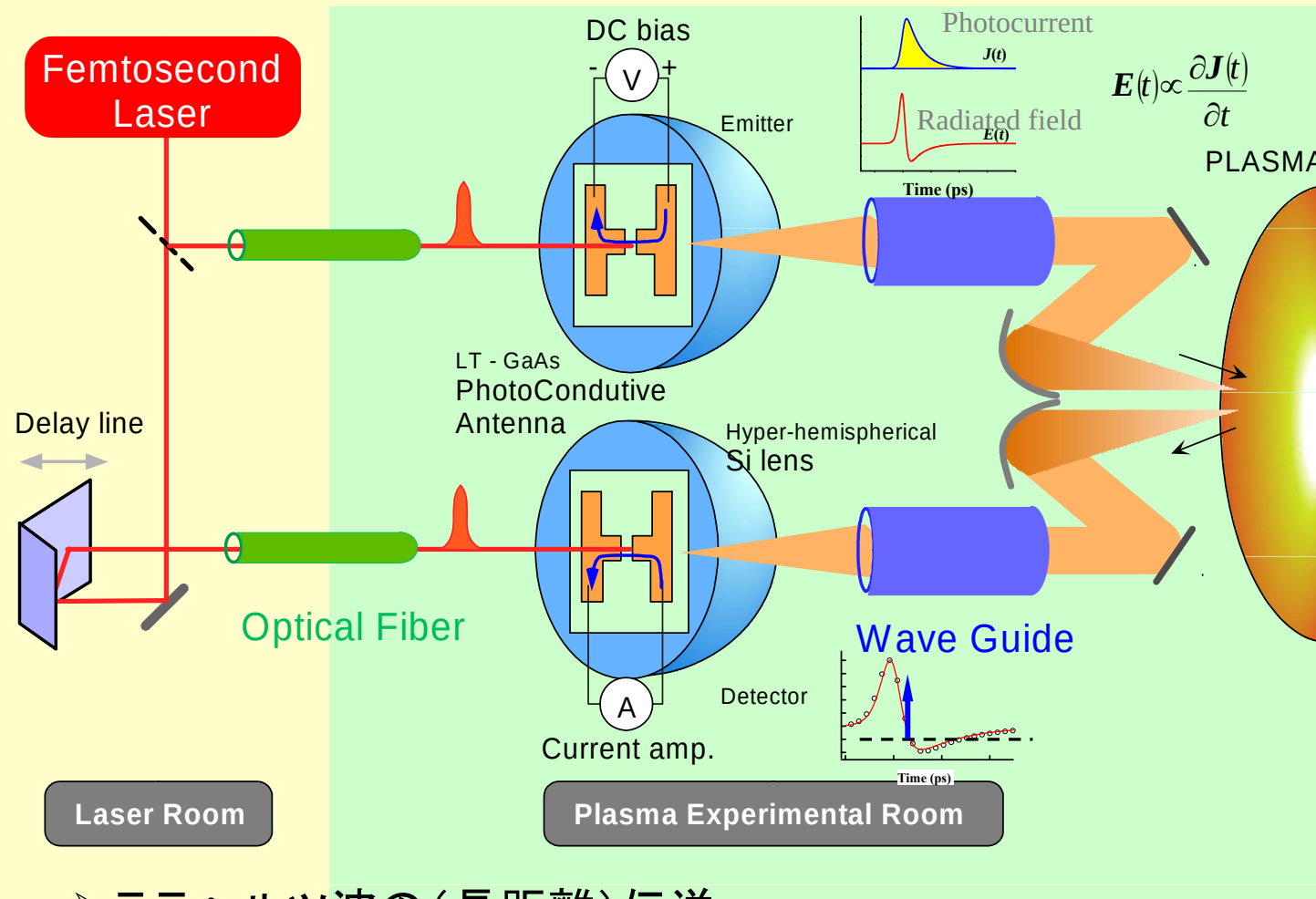


Developed mainly by Grischkowsky's group (IBM)

M. Hangyo (ILE, Osaka Univ.)

Plan of THz pulsed radar reflectometer

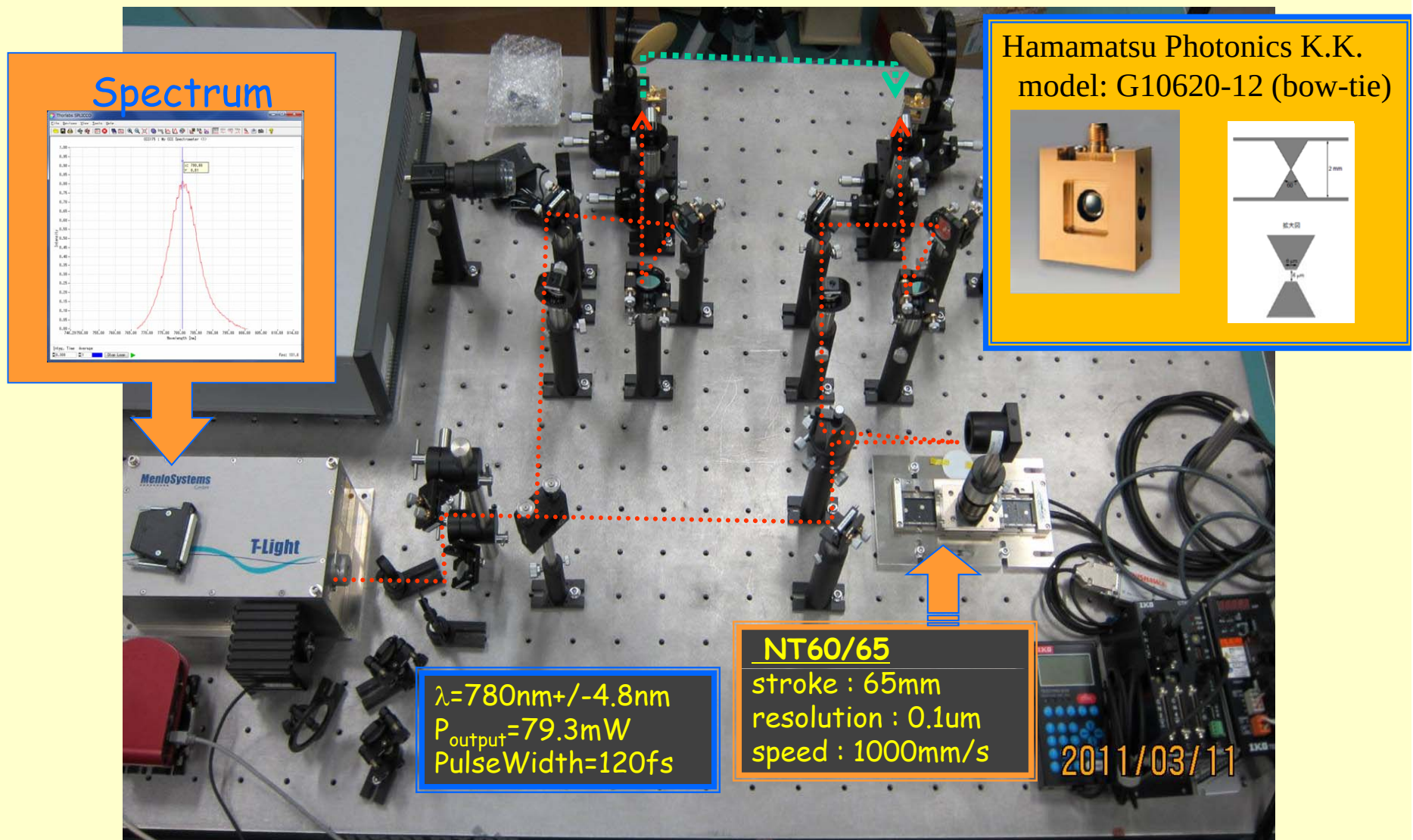
➤ テラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)のプラズマ計測への適用



- テラヘルツ波の(長距離)伝送
- 励起レーザー光のファイバー伝送

step1

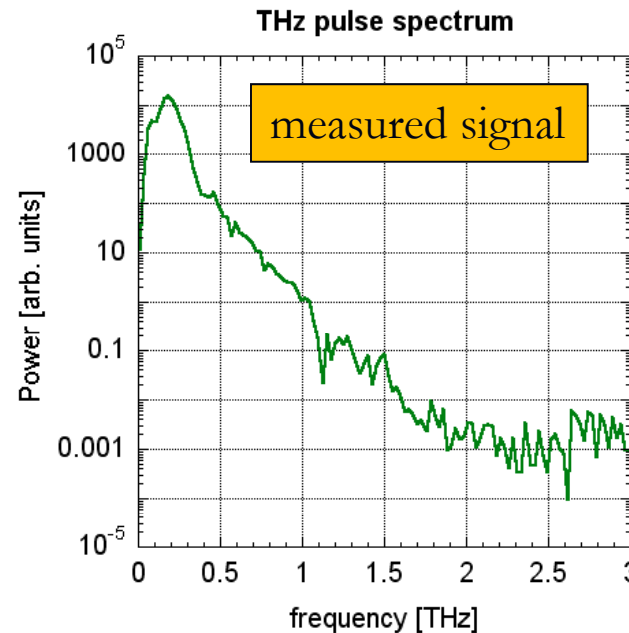
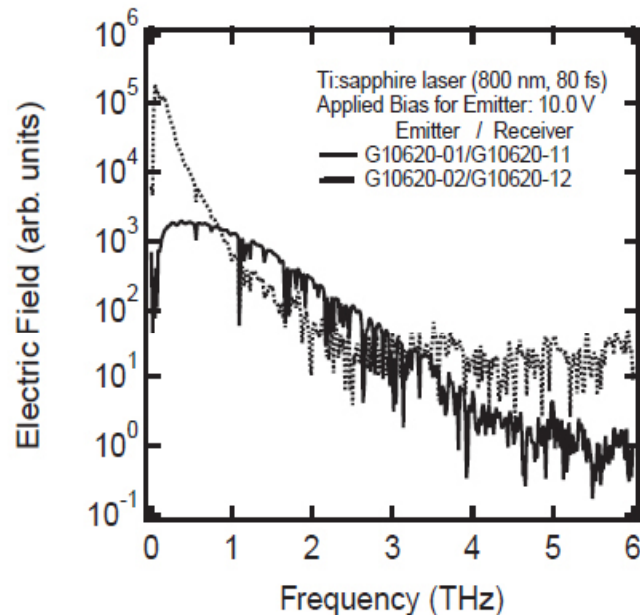
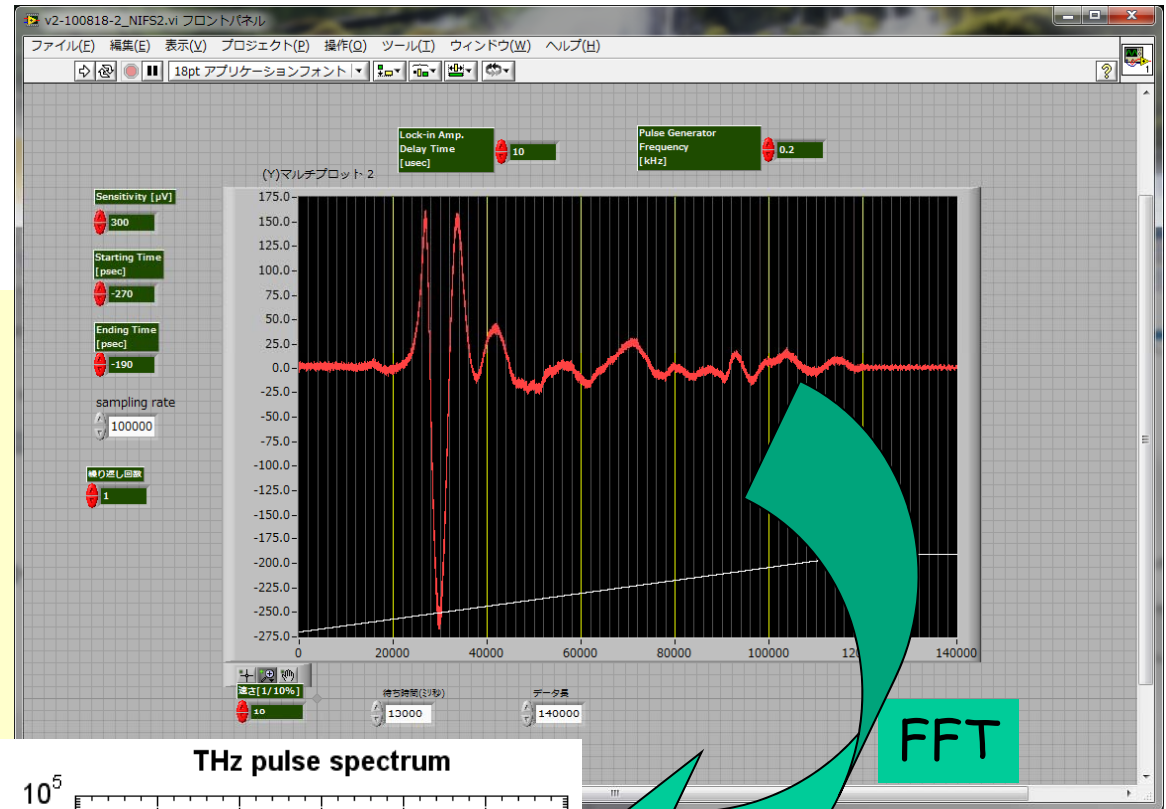
THz TDS system layout



Test system of THz-TDS on the optical bench

Example of THz-TDS signal

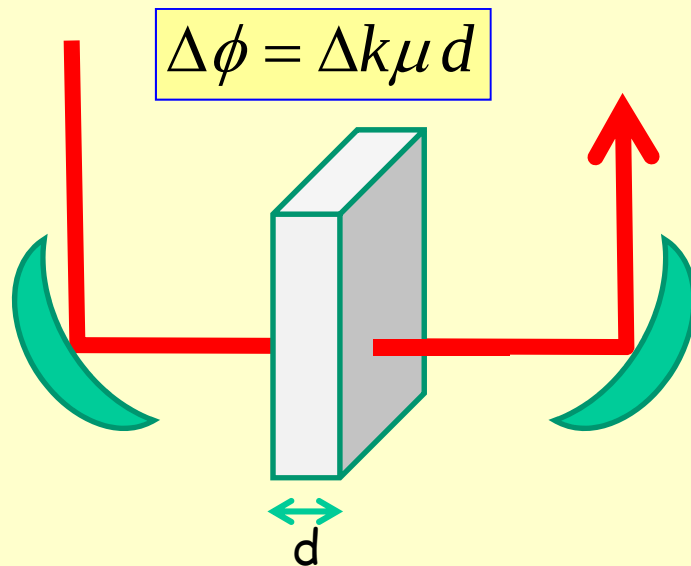
- Lock-in : 10mV, 10ms
- Current amp: 10^6
- Chopper : 3.193kHz
- Stage speed: 20m/s
- Sampling : 0.2kHz



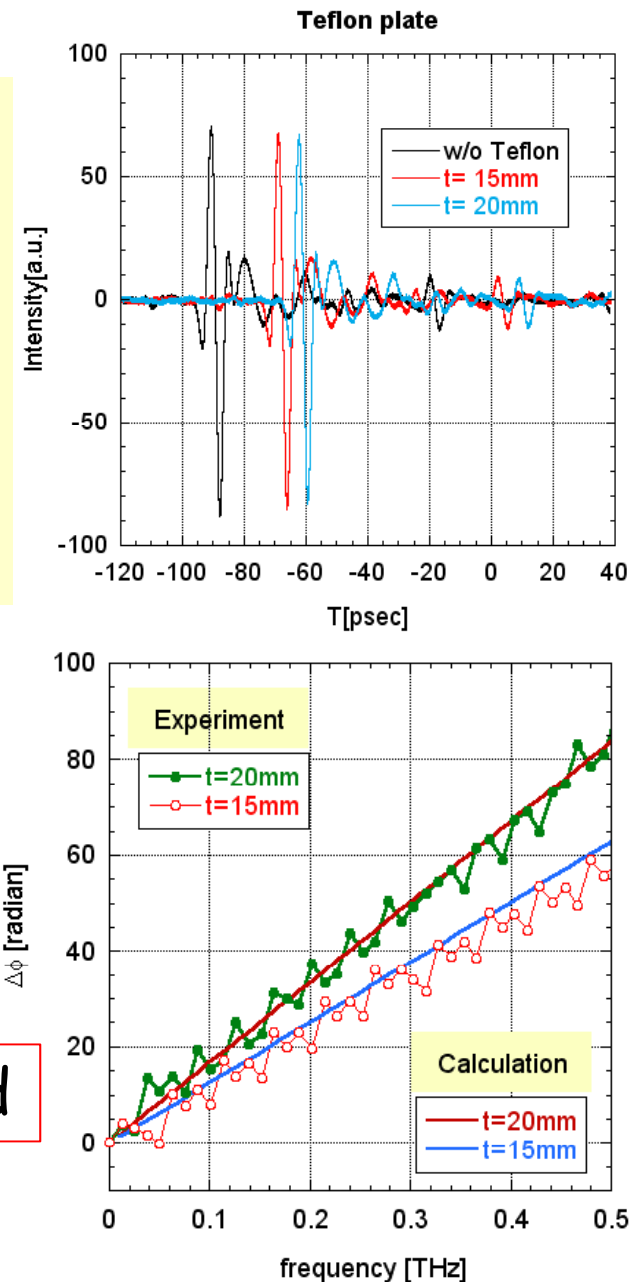
Generation of THz wave (0.1~2THz) can be obtained

Test of Teflon

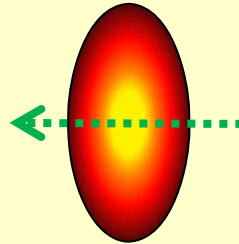
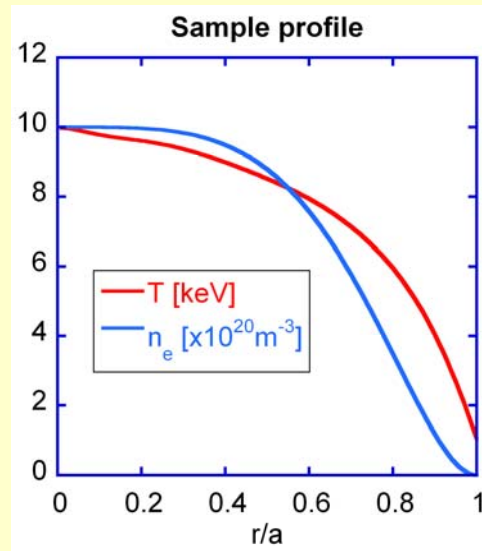
Example of TDS measurement by teflon



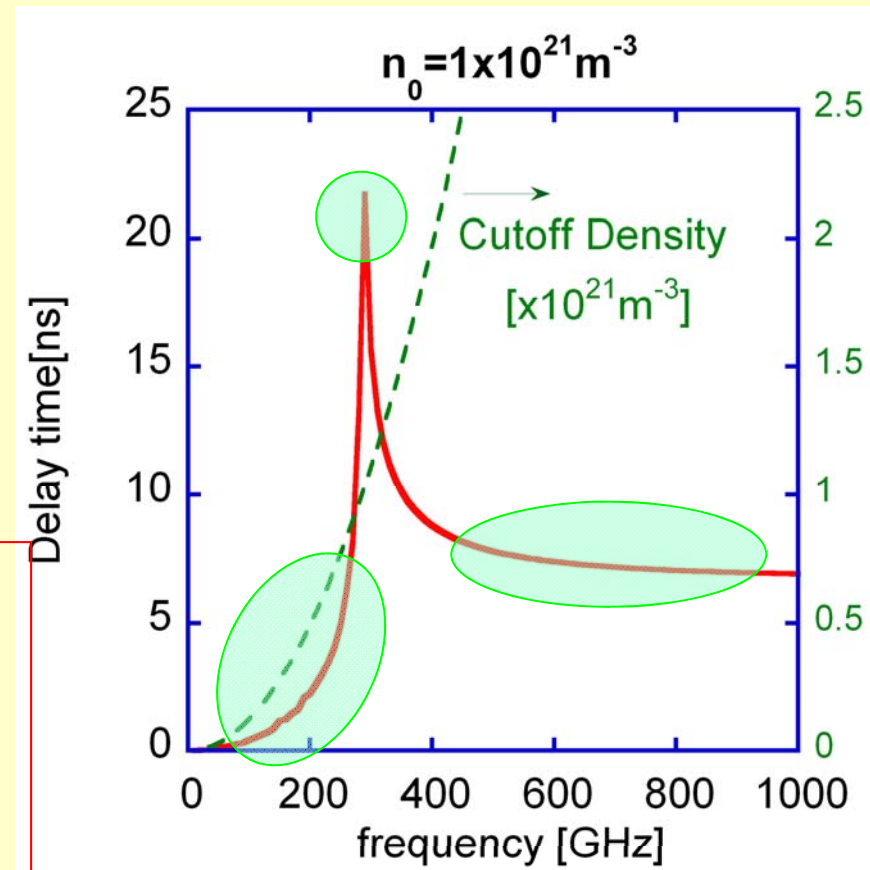
Width of Teflon can be estimated



Estimation of DEMO-like plasma

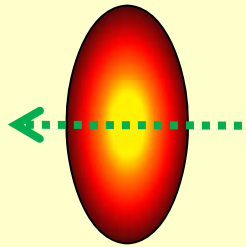


- カットオフ周波数よりも高いプローブ周波数を用いたDelayometry計測から
 → 線平均密度 $\bar{n}_e$
- 広帯域周波数をプローブすることで、Delay timeが最大となる周波数から
 → ピーク密度 n_{e_max}
- 最大カットオフ周波数以下の信号による反射計測から
 → 密度分布 $n_e(\rho)$



Delayometry (Refractometry)

プラズマを透過したことによる遅れ時間は、



$$\tau_{pe} = \frac{2}{c} \int_{-a}^a \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2(x)}{\omega_0^2}}} - 1 dx$$

となり、カットオフ周波数よりも高いプローブ光の場合、線平均密度は次式のように記述できる。

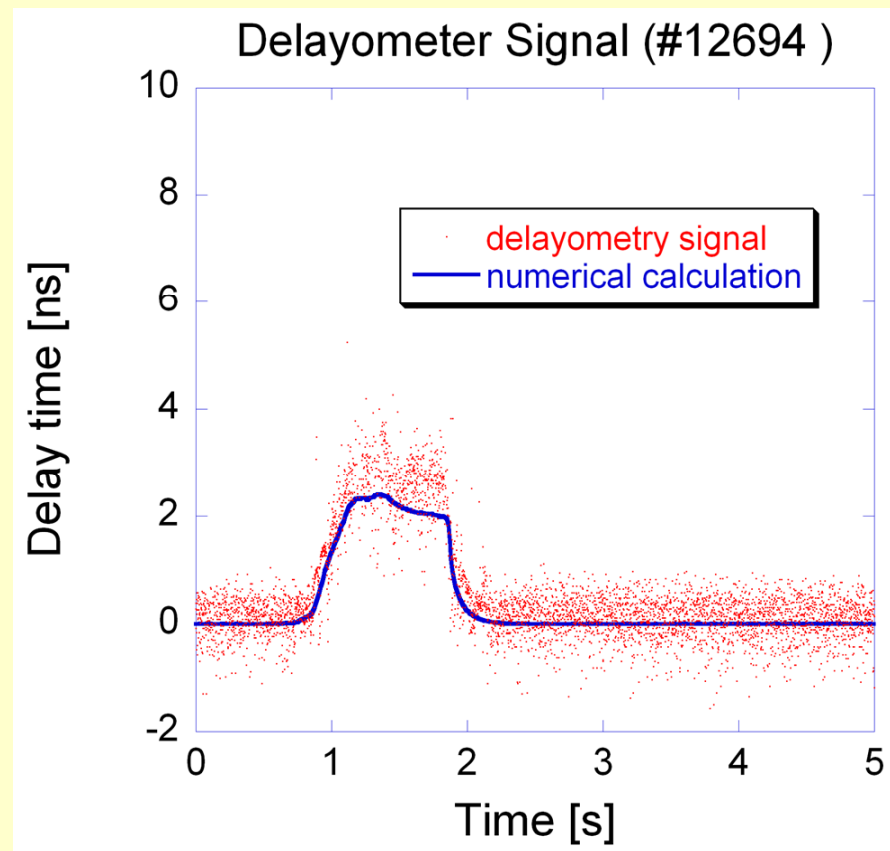
$$\bar{n}_e \cong \frac{\tau_{pe} c n_c}{2a}$$

メリット:

- ・原理的に位相トビがない。
- ・計測値の履歴が不要。

マイクロ波を用いたパルスレーダ方式によるLHDプラズマ計測での実証例

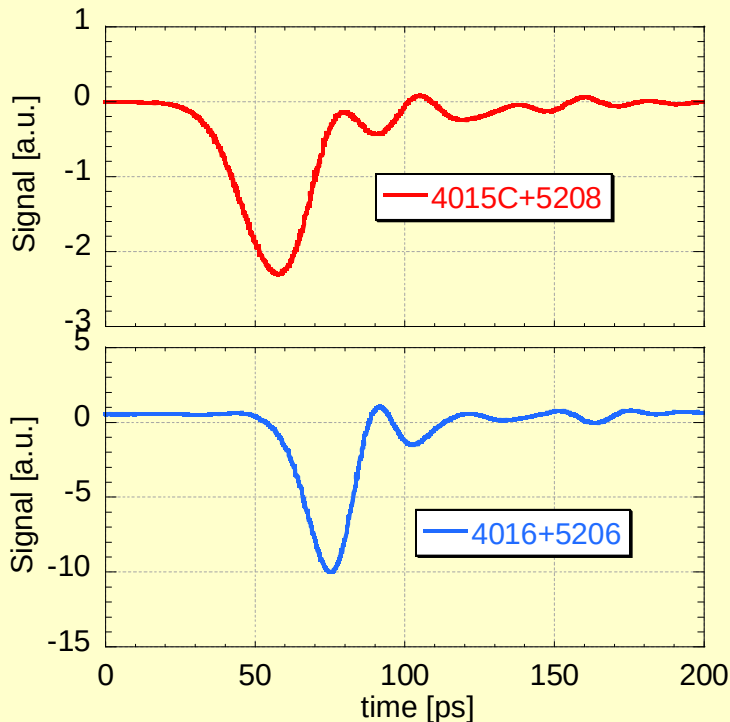
T. Tokuzawa *et al.*, RSI 72, 328 (2001)



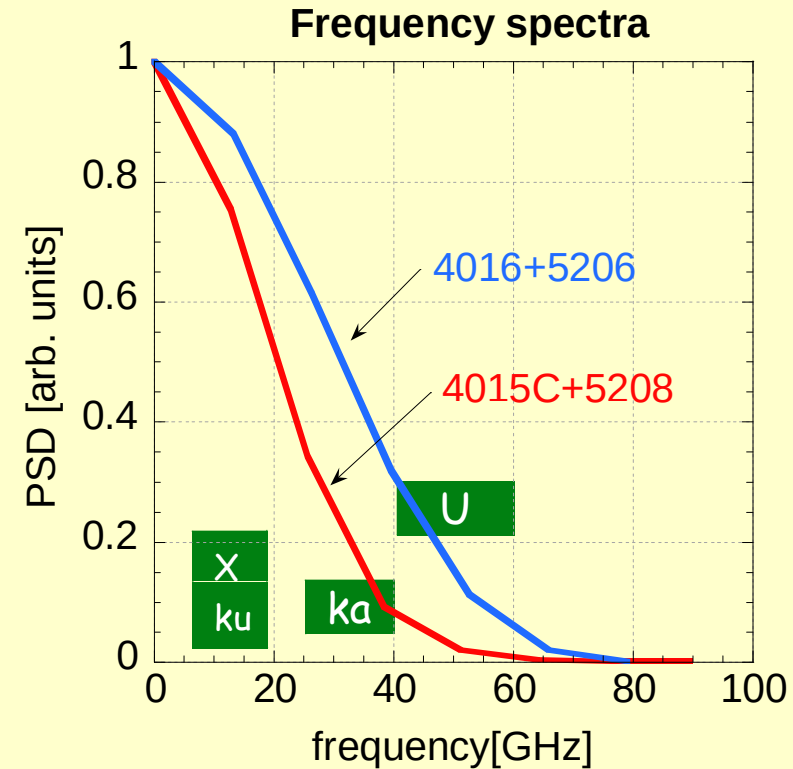
Impulse & Frequency spectrum

Microwave range

23ps

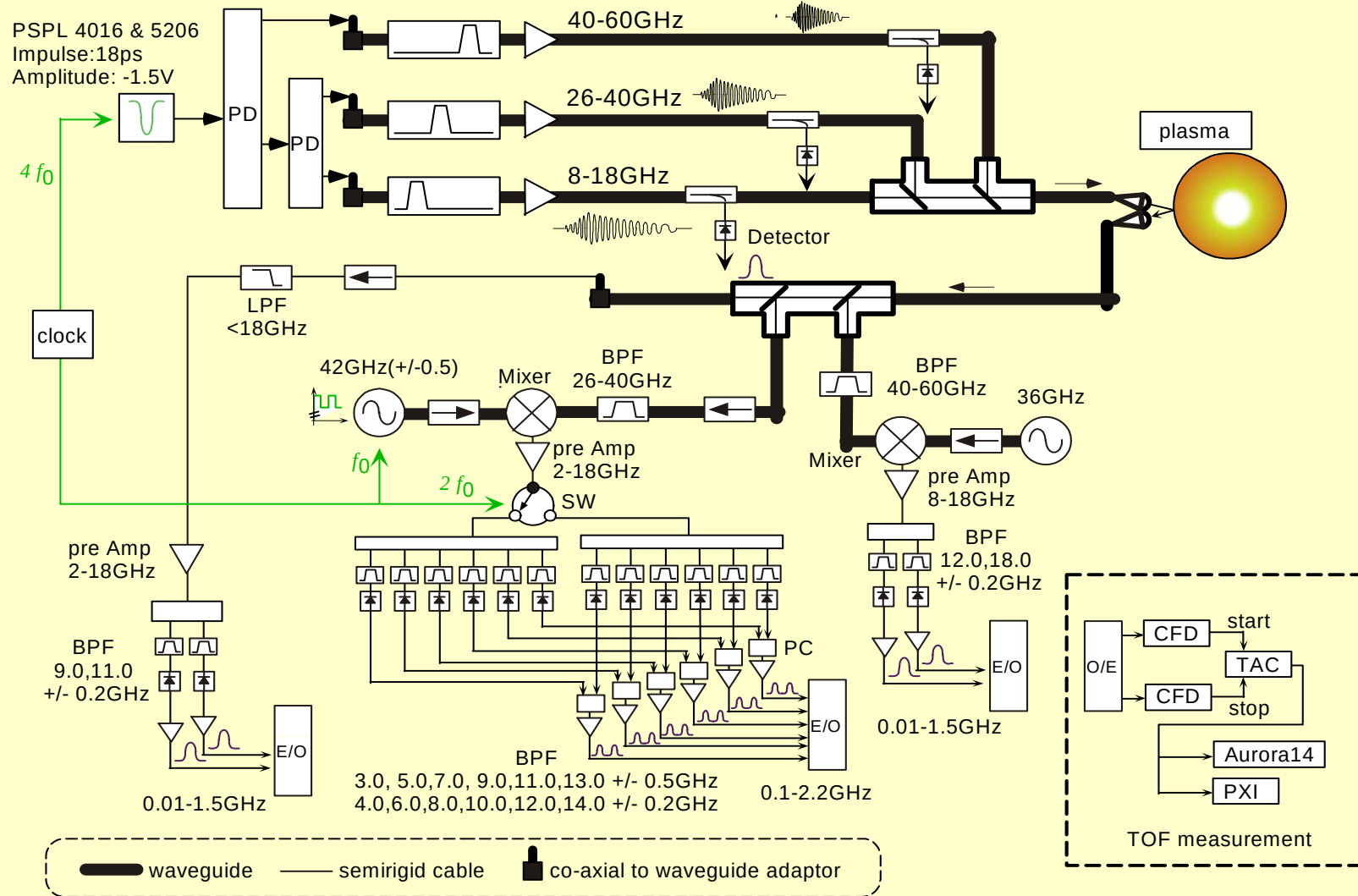


18ps



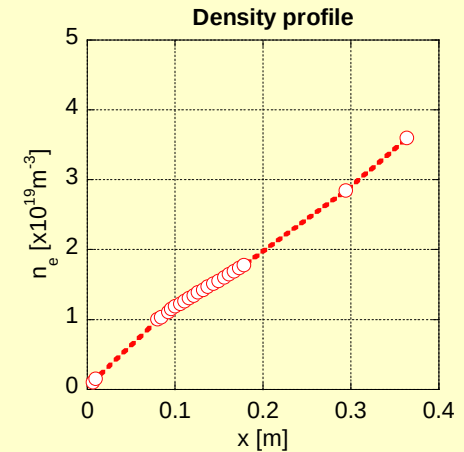
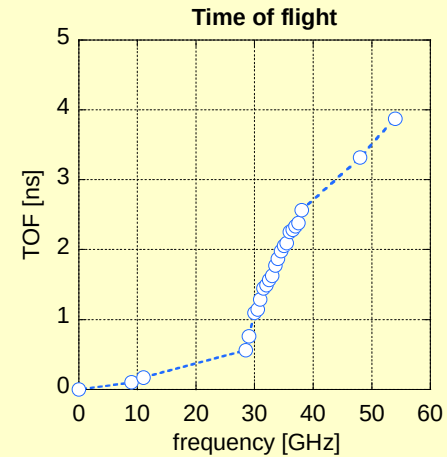
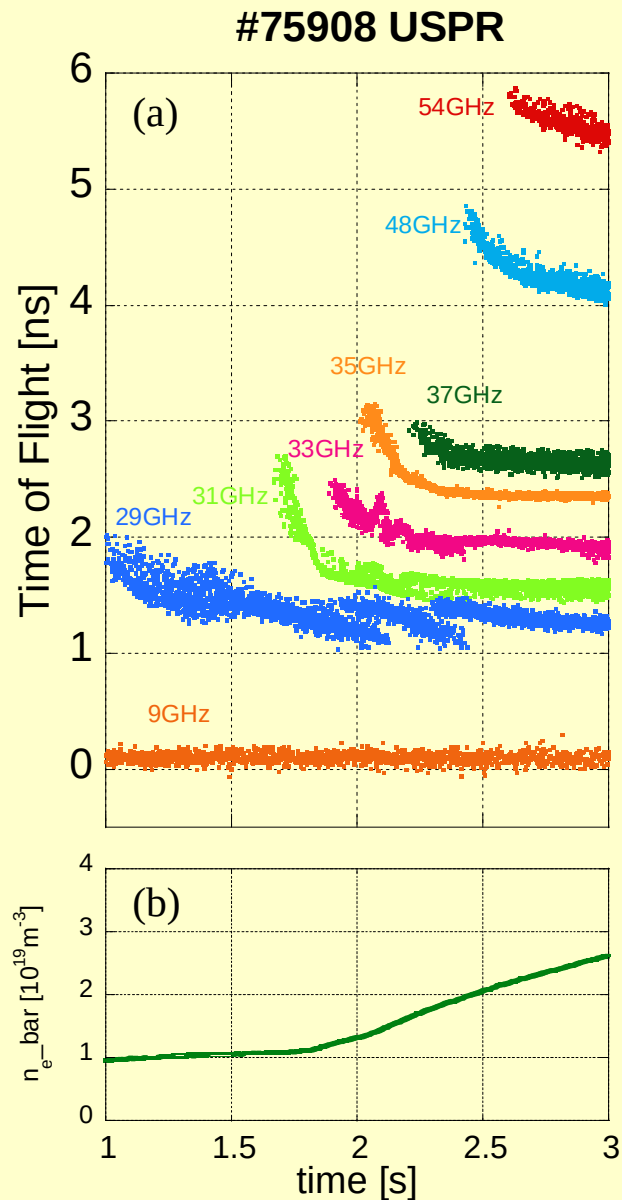
$$s(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \xleftrightarrow{F.T.} S(\omega) = \exp\left(-\frac{\omega^2\sigma^2}{2}\right)$$

8-60GHz Ultra-short Pulsed Radar Reflectometer



- ・インパルス電圧を光源としたパルスレーダシステム
- ・マイクロ波スイッチを利用して、空間28点を100kS/sで計測。

Density Profile Measurement

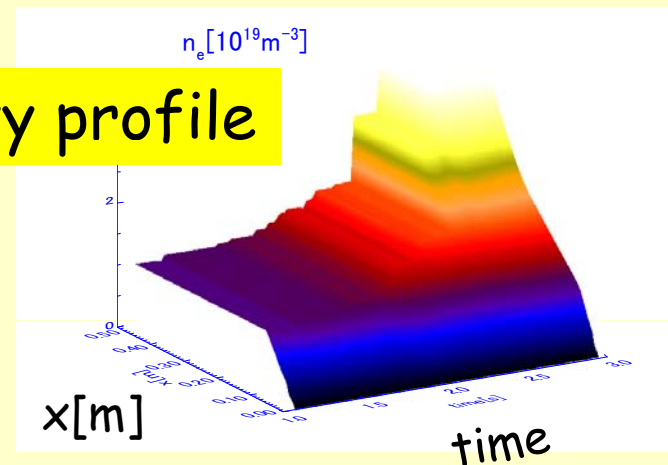


$$\tau_p(\omega_0) = \frac{2}{c} \int_{r_a}^{r_c(\omega_0)} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega_{pe}^2(x)}{\omega_0^2}}} dx$$

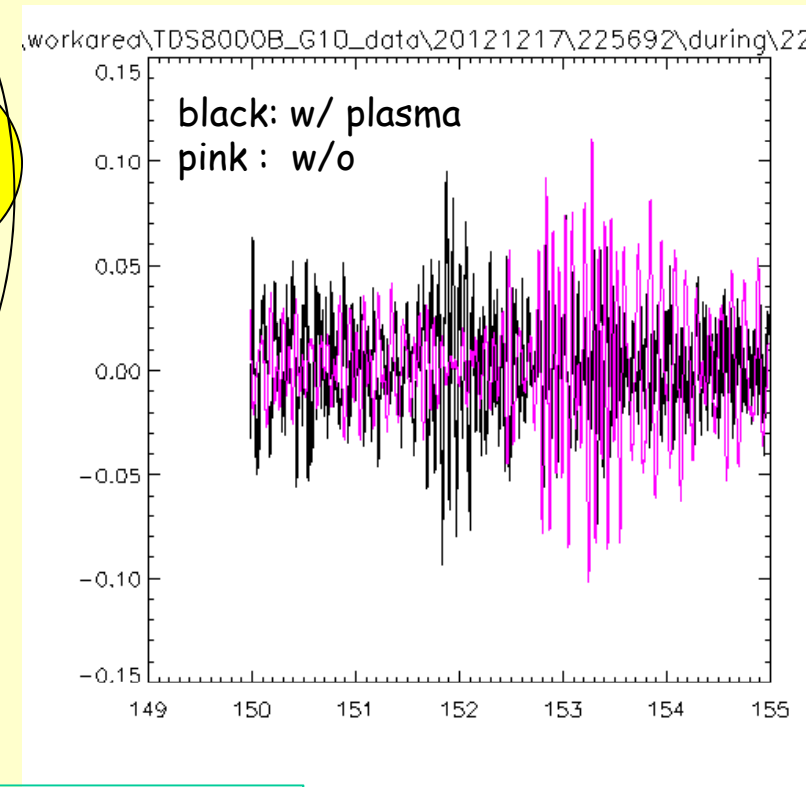
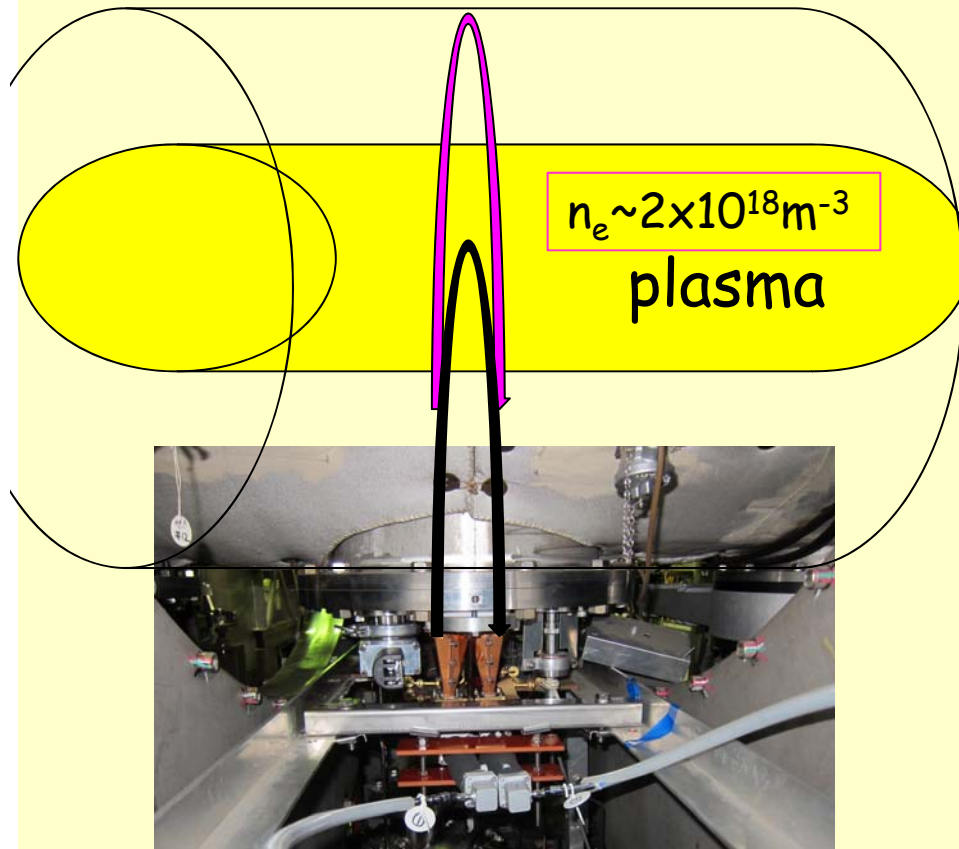
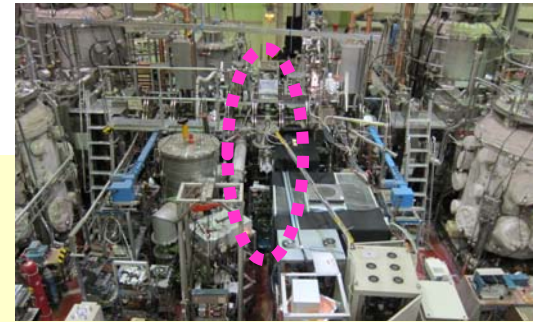
$$r_c(\omega_0) = \frac{c}{\pi} \int_0^{\omega_0} \frac{\tau(\omega)}{\sqrt{\omega_0^2 - \omega^2}} d\omega$$

Abel Inversion

Density profile



ToF measurement trial in GAMMA-10



23ps impulse + 30dB amp(6-18GHz)

ToF measurements was tested in GAMMA10 plasma

ToF measurement

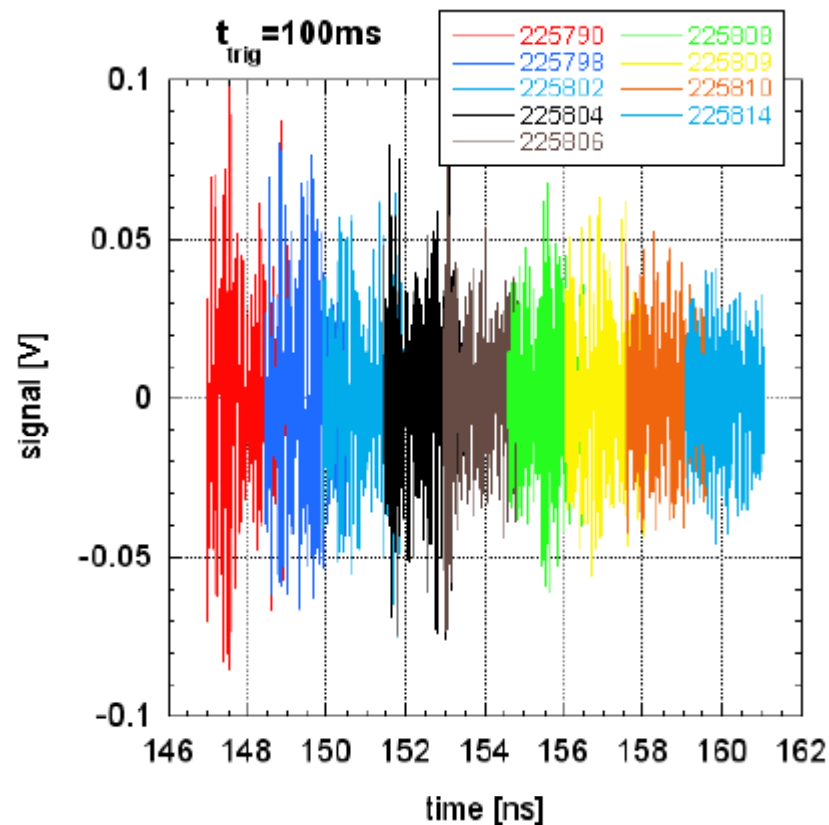


図3：複数放電ショットを用いて計測した反射信号の時間変化。各放電で500psずつオーバーラップさせながら、2nsを収集した。

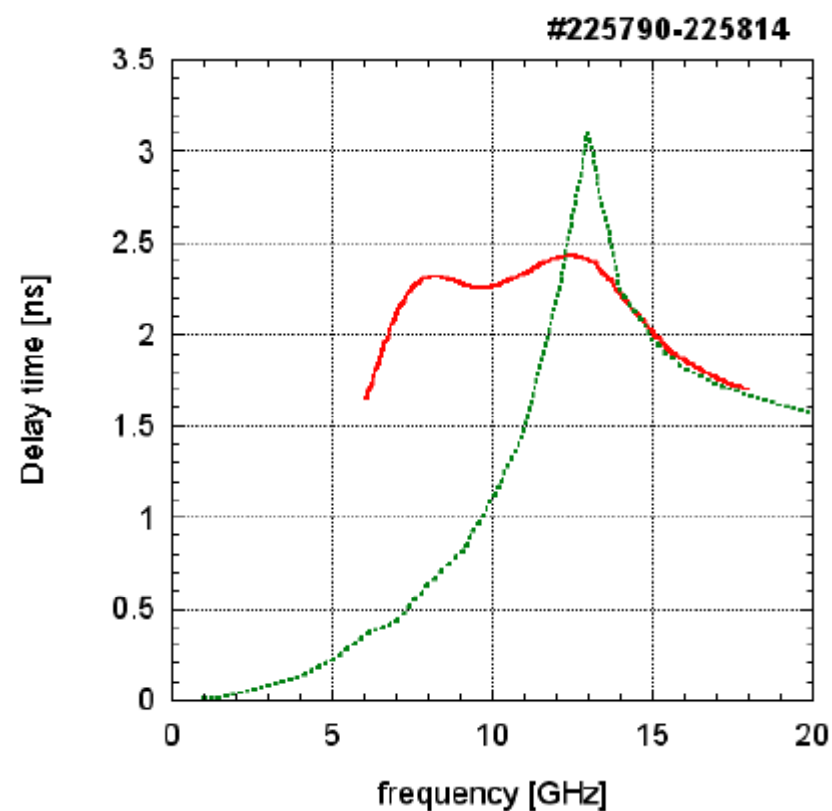


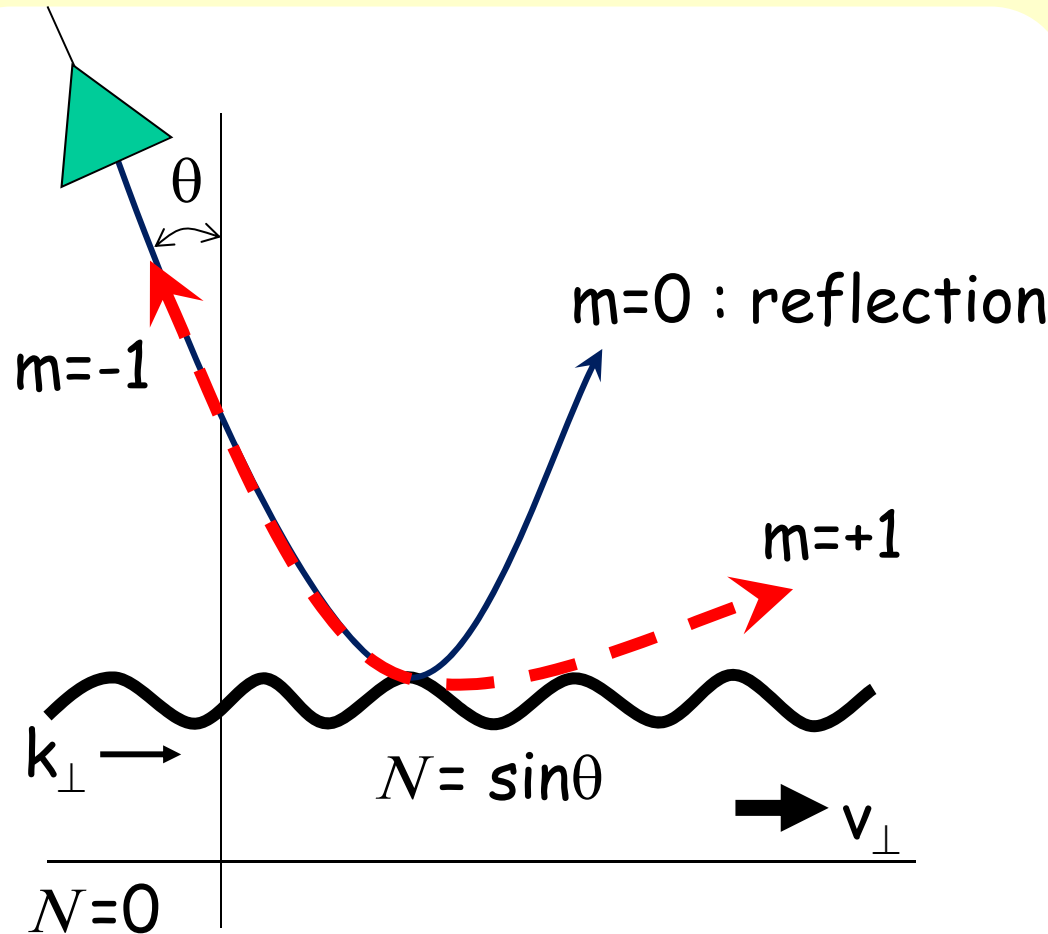
図4：飛行時間の入射周波数依存性。赤実線がプラズマ計測値。緑点線は電子密度分布を仮定した予想計算値。

Doppler Back Scattering (DBS)の目的

- ITG領域乱流密度揺動の周方向回転速度 および
- 径電場(E_r)の半径方向分布の計測
 - 他の計測(BP,分光)との比較による計測手法の適用領域の理解
 - 回転速度のイオン種依存性
 - 径電場形成物理機構
- マイクロ波計測シミュレーションコードの高精度化のための比較実験
 - 時間変動する密度揺動を与えたプラズマ場におけるFDTDシミュレーション
 - セントラルセル部のモデル化が(比較的容易な)円形プラズマを対象とした実験

Principle of Doppler Reflectometer

for poloidal velocity / density fluctuation measurements



- wave number is decided by Bragg condition:

$$k_{\perp} = 2 \cdot k_0 \sin(\theta)$$

- Wave number resolution is decided by a beam width:

$$\Delta k_{\perp} = \frac{2\sqrt{2}}{w} \sqrt{1 + \left(\frac{w^2 k_0}{\rho_{eff}} \right)^2}$$

- Doppler shifted frequency:

$$\omega_D = -\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}$$

$$\approx -k_{\perp} v_{\perp}$$

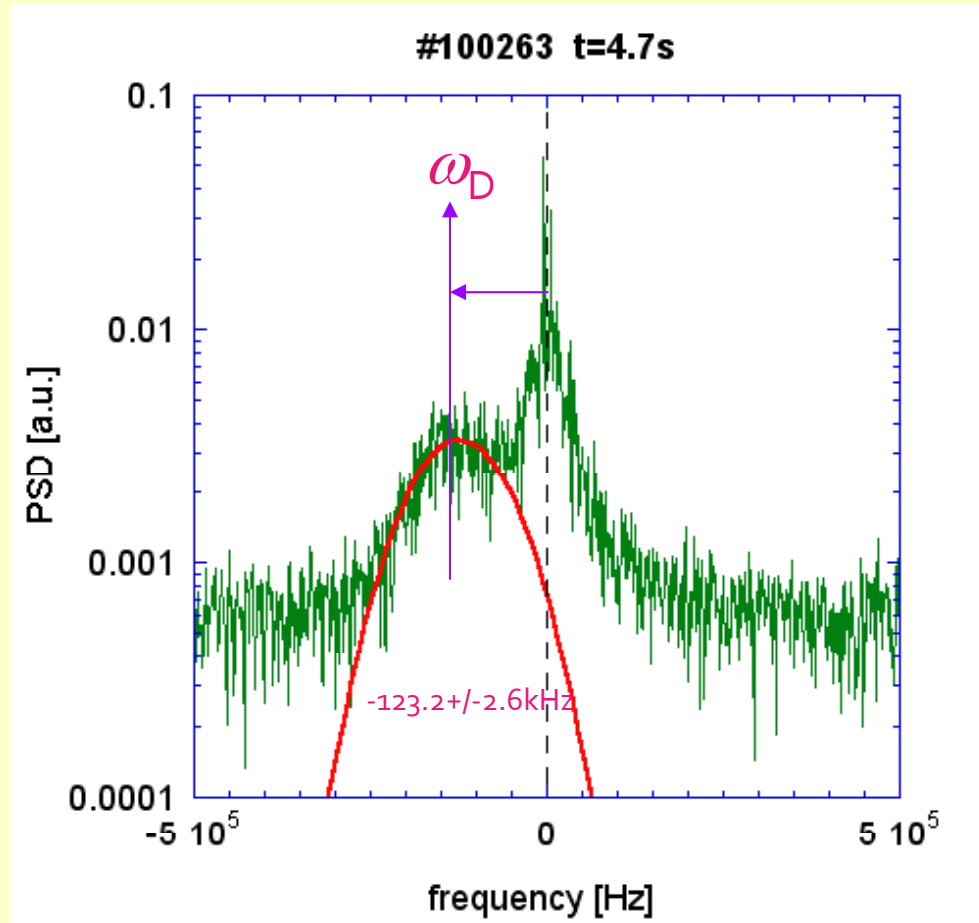
$$v_{\perp} = v_{phase} + v_{E \times B}$$

Strong points:

- ✓ Wave number is selectable in the ITG/TEM range

Principle of Doppler Reflectometer

for poloidal velocity / density fluctuation measurements



Strong points:

- ✓ Wave number is selectable in the ITG/TEM range

- wave number is decided by Bragg condition:

$$k_{\perp} = 2 \cdot k_0 \sin(\theta)$$

- Wave number resolution is decided by a beam width:

$$\Delta k_{\perp} = \frac{2\sqrt{2}}{w} \sqrt{1 + \left(\frac{w^2 k_0}{\rho_{eff}} \right)^2}$$

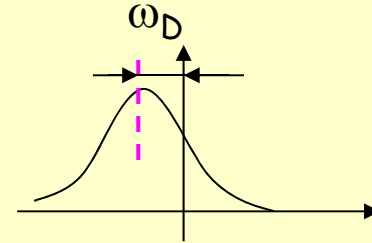
- Doppler shifted frequency:

$$\begin{aligned} \omega_D &= -\mathbf{k} \cdot \mathbf{v} \\ &\approx -k_{\perp} v_{\perp} \end{aligned}$$

$$v_{\perp} = v_{phase} + v_{E \times B}$$

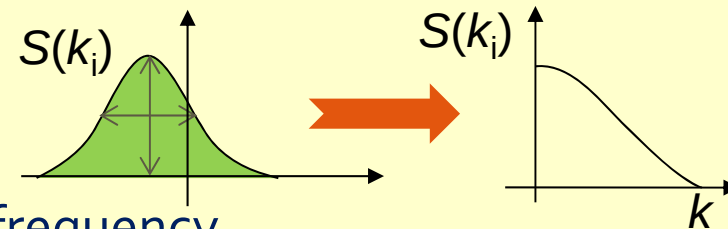
Target parameters of Doppler RM

- ① Doppler shifted frequency
→ poloidal velocity

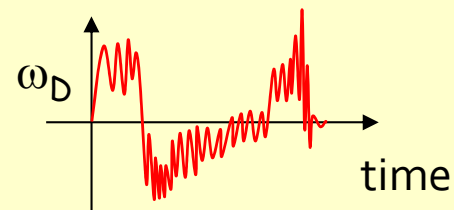


$$\omega_D = -\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}$$
$$\approx -k_{\perp} v_{\perp}$$

- ② Integration in frequency domain
→ wave number spectrum



- ③ Temporal behavior of Doppler shift frequency
→ velocity / frequency of background plasma (zonal flow, GAM, etc.)



Radial Electric Field Force Balance

$$E_r = \frac{\nabla P_i}{qn_i} - v_{\phi i} B_{\theta} + v_{\theta i} B_{\phi}$$

main ion
↕
impurity

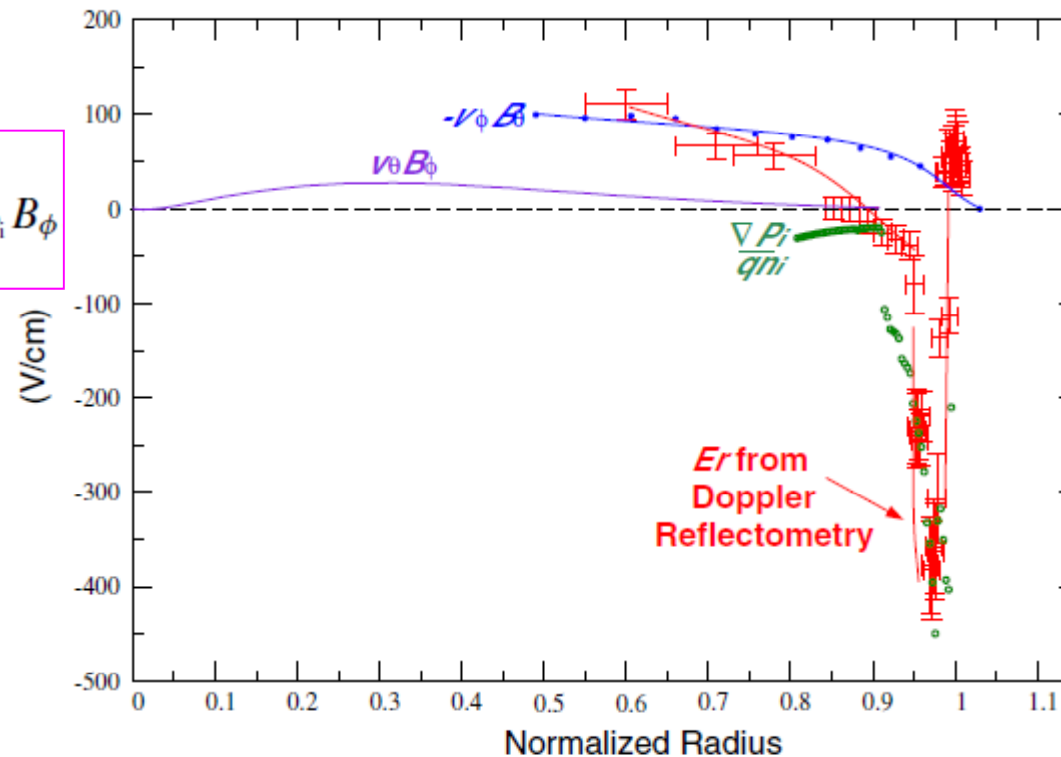
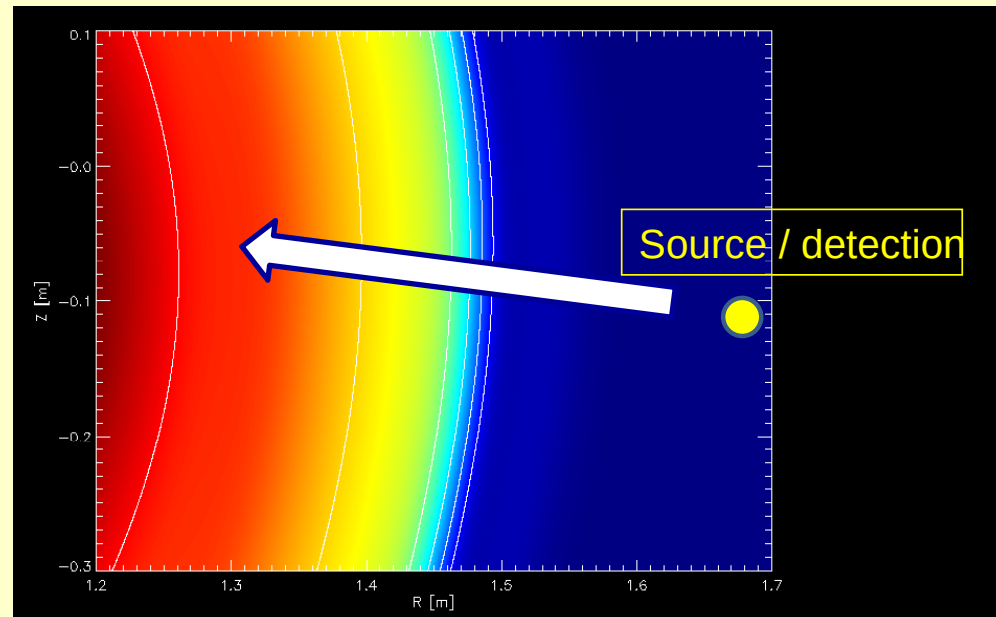


Figure 5. The radial electric field components measured during an H-mode phase (2.2 s) in discharge #17439. E_r is determined from the Doppler reflectometer diagnostic while the toroidal velocity term is from CXRS, the poloidal velocity term from neoclassical calculations and the pressure gradient term from density and temperature measurements.

AUG : J.Schirmer, NF(2006) S780

2D FDTD (Finite-difference time-domain) simulation

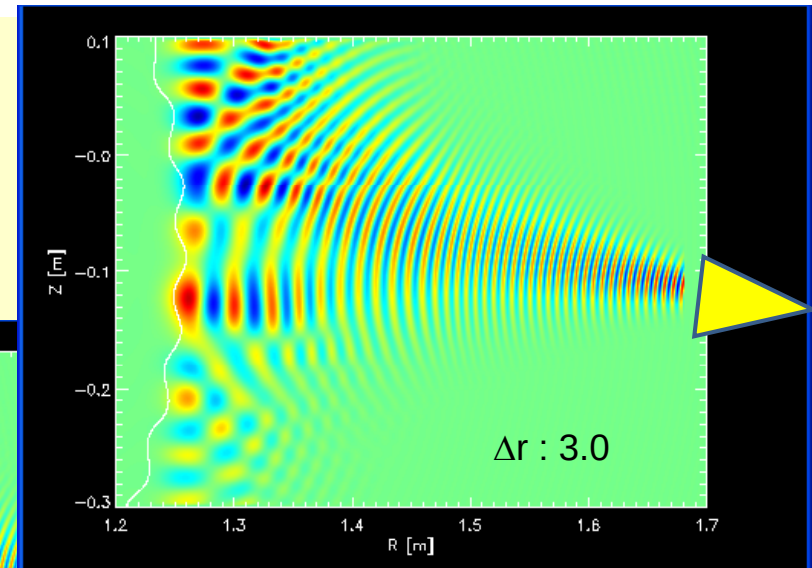
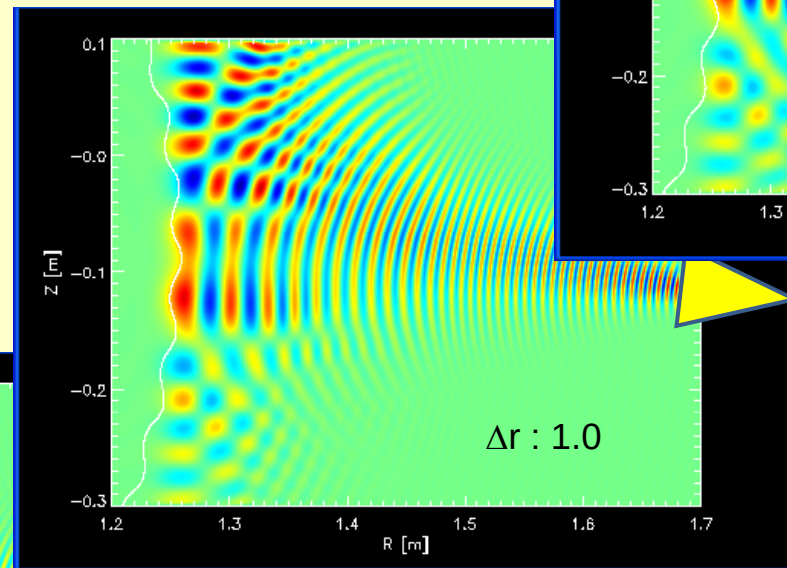
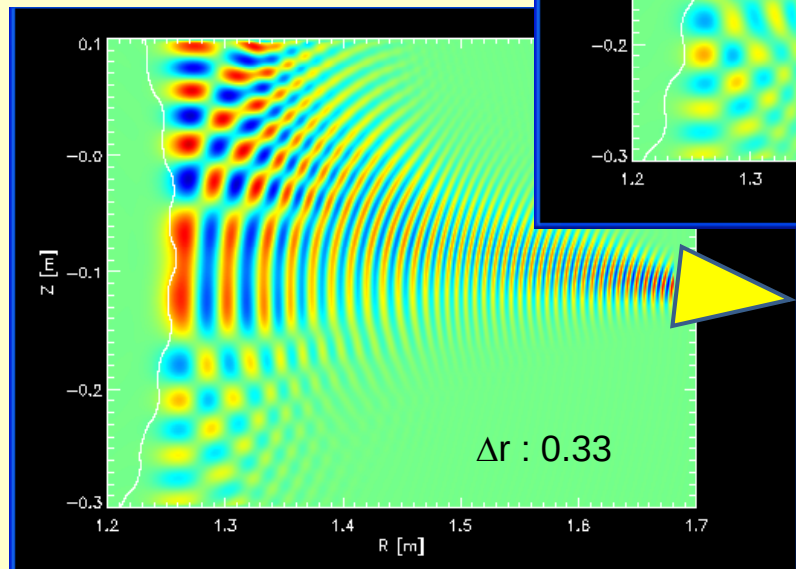
- プラズマ周辺部領域での2次元計算空間
- プラズマ放電で観測された電子密度分布を用いた計算
- マイクロ波光源からガウスビームを斜め入射し、プラズマ中を伝搬する電磁波成分をMaxwellの方程式から求める。(FDTD法)
- カットオフ層に密度揺動成分を与え、これによる散乱波成分について調べる。
- 密度揺動成分は、振幅・空間変動・波数・位相をパラメータとして与え、これらの依存性を見た。



FDTDシミュレーション空間(R-z空間)の電子密度分布のコンター図。左端の線が40GHz O-modeのカットオフ層。

FDTD simulation results

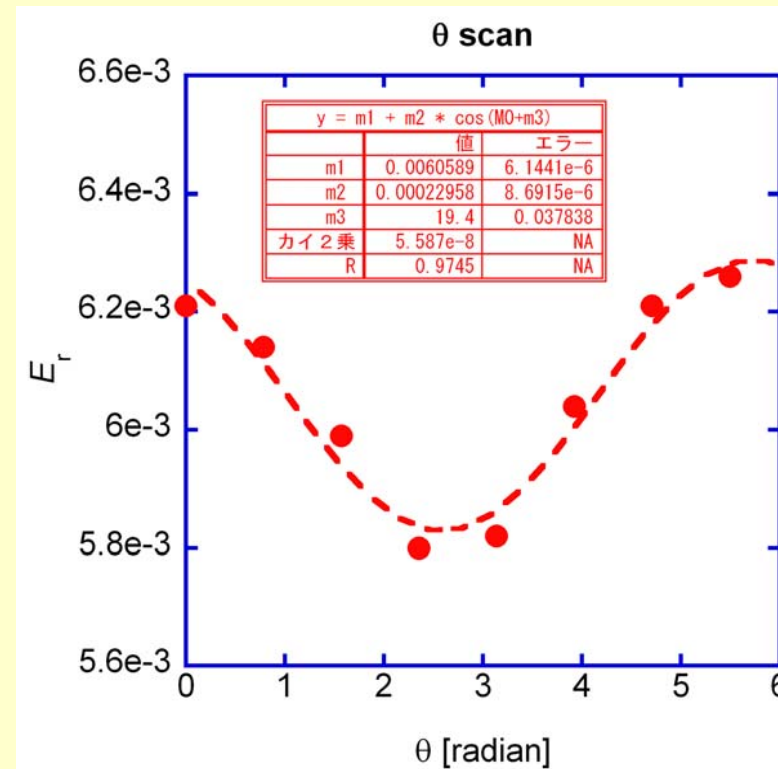
- ・ 揺動成分の空間変動を $1/3 \sim 1 \sim 3$ と変化させた例。



- 密度変動の増大に伴い、合成散乱波への影響も大きくなる様子が見える。

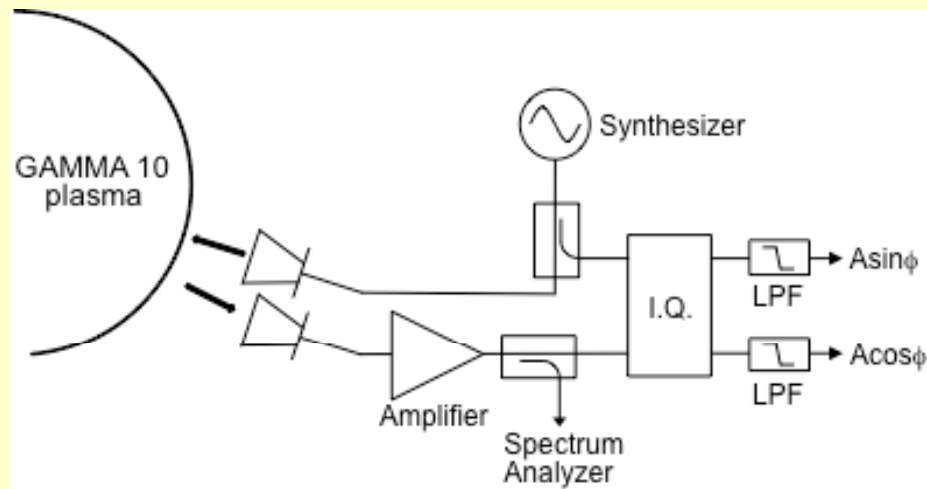
Flow simulation

- 流速を持つ乱流成分の伝搬をシミュレート
- 密度揺動の位相の変化に伴う散乱波信号を逐次計算
- $\pi/4$ 毎の位相変化に伴う、マイクロ波検出器に戻った散乱波電界強度
- ポロイダルフローにしたがって、散乱波信号の位相変化を確認
- 今後、より複雑な乱流モデルを用いて、実在プラズマを模擬しうる計算を行う。



密度揺動の位相伝搬に伴う、検出器信号位置における散乱波電界強度の変化

GAMMA10 Homodyne DBS system



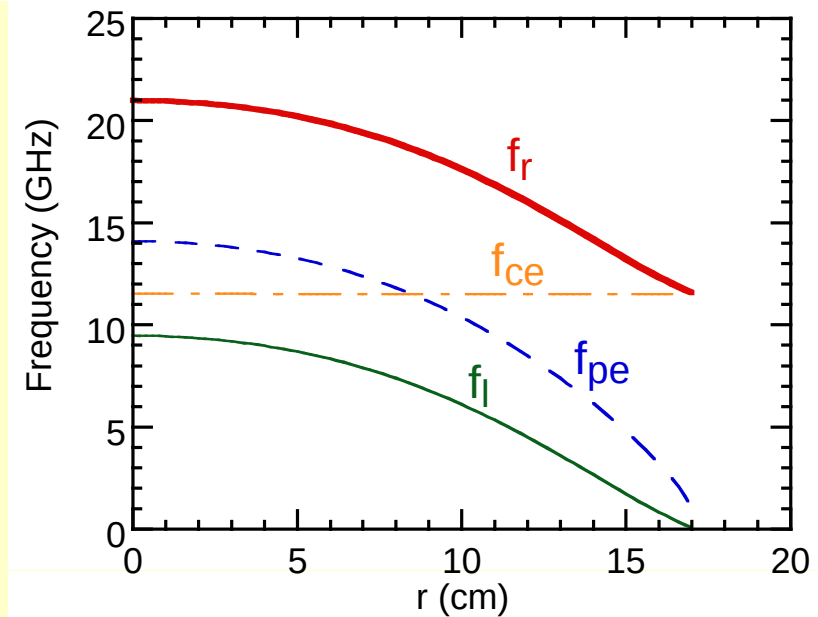
加熱条件: 高周波 (RF3) 印加による西アンカー部の加熱

電子線密度 $\sim 5 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$

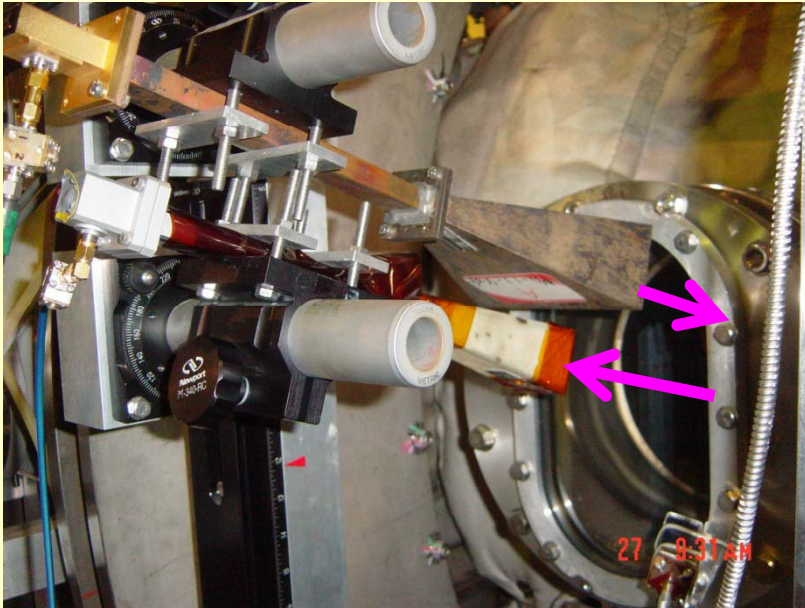
Source : synthesizer
11.5 - 18 GHz

polarization : X-mode

DAC : Oscilloscope (5MS/s)

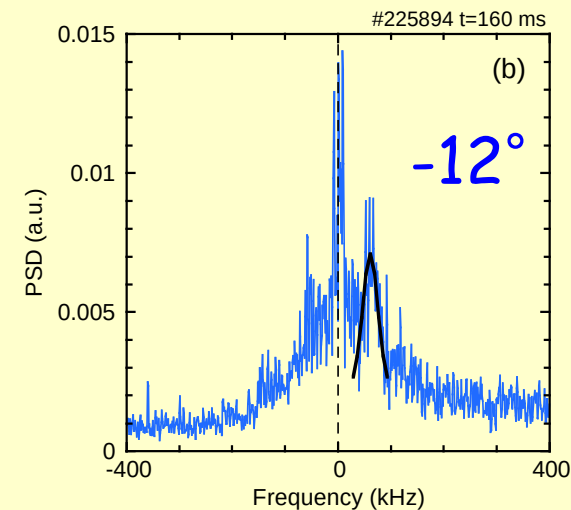
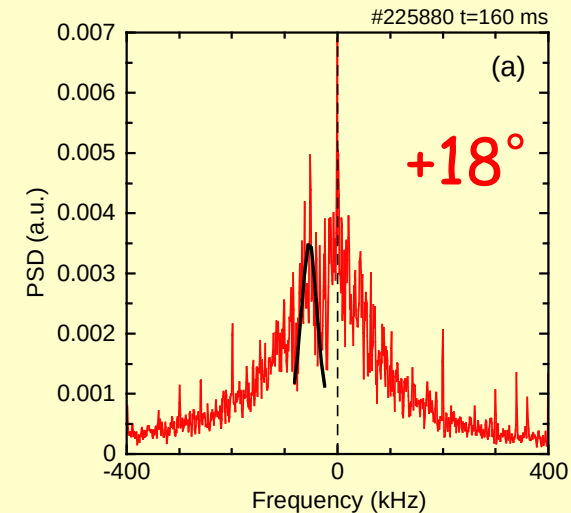


Experimental example

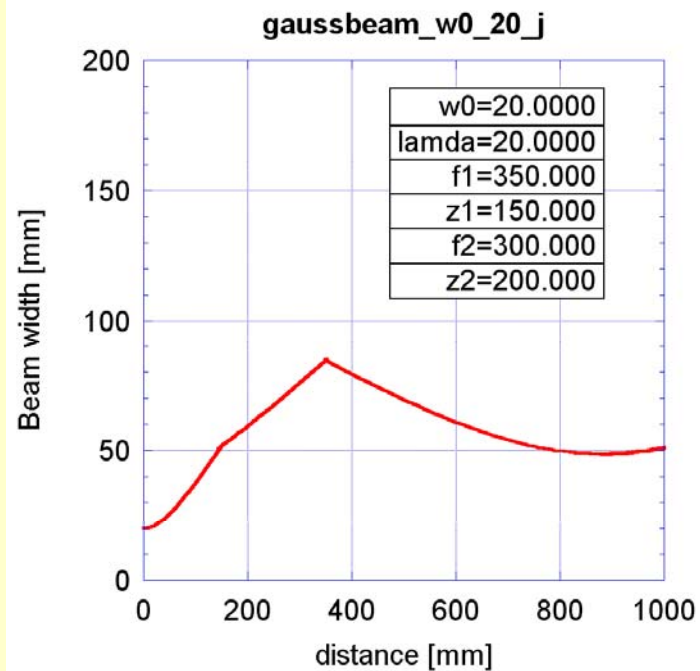
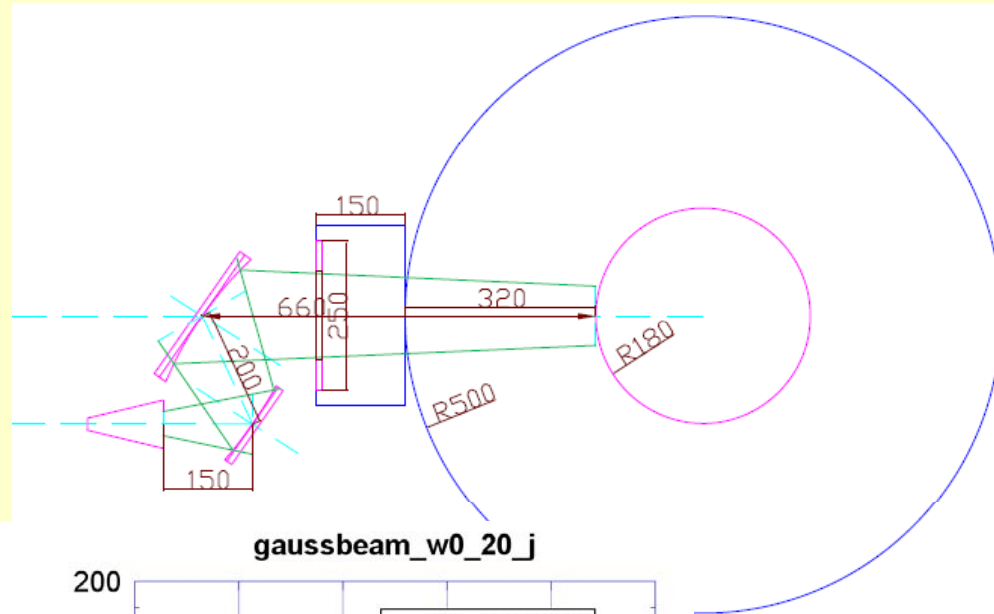


- ✓イオン反磁性ドリフト方向に回転している。
- ✓ドップラーシフト周波数から、径方向のプラズマ回転速度は、それぞれ (a)~2.2 km/s、(b)~3.6 km/sと推定。
- ✓径方向電場は、~1 kV/mと見積もられる。
- 今後他の計測との比較。

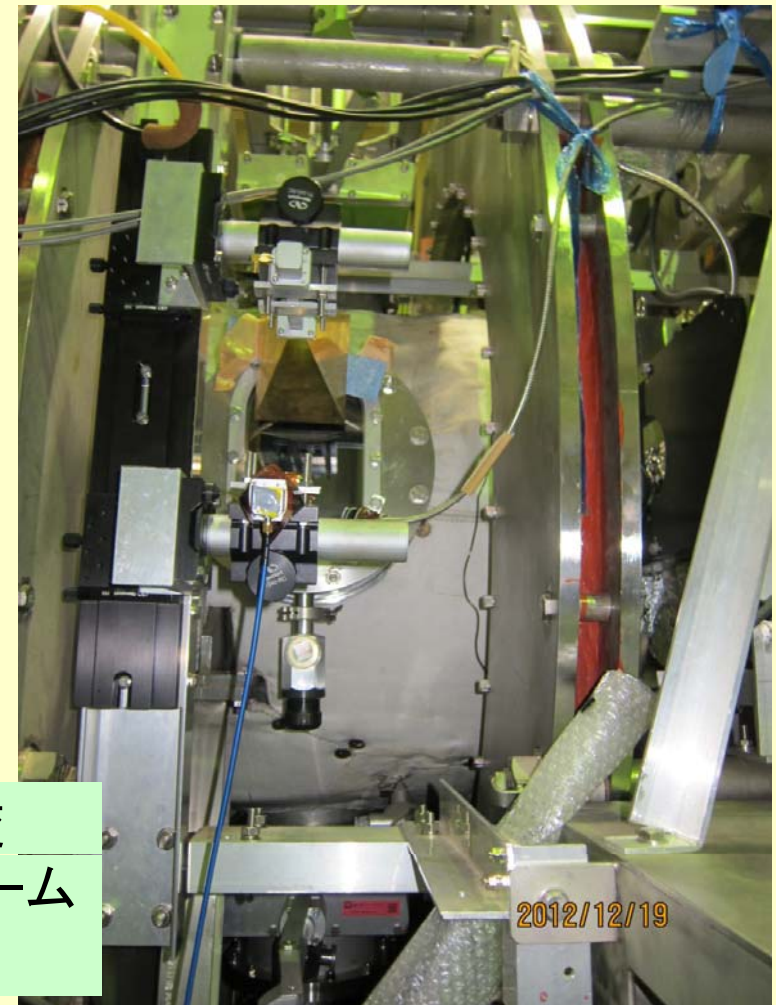
Complex frequency spectrum



New antenna design



- ✓入射角度可変
- ✓ガウシアンビーム
- ✓集光光学系



まとめ

- ◆将来の核融合炉への実装を視野において、マイクロ波計測器の開発を行っている。
- ◆位相とびのない電子密度線積分値計測＋密度分布計測の同時計測の実証のため、GAMMA-10装置に超短パルス計測システムを適用し、初期データを得た。実証に向けて、データ数を増やすこと、また周波数空間を広げることが課題。
- ◆径電場計測が可能なDBSシステムを適用し、比較可能な種々の計測器があるGAMMA-10装置において、電場形成機構の解明に向けた実験を行う。
- ◆マイクロ波シミュレーションの高精度化のため、計測実験データとの比較を行うことを目指して、新しく集光光学系のアンテナを導入する。