

# RT-1におけるBdotループと電気光学センサを用いたホイッスラー波の磁場揺動計測

東大<sup>1</sup>, 核融合研<sup>2</sup>, 精工技研<sup>3</sup>

齋藤晴彦<sup>1</sup>, 西浦正樹<sup>1,2</sup>, 森敬洋<sup>1</sup>, 上田研二<sup>1</sup>, 仲川涼介<sup>1</sup>, 大沢隆二<sup>3</sup>

1. 磁気浮上ダイポール「人工磁気圏」によるプラズマ実験
2. コーラス放射状の揺動の自発励起と計測対象
3. Bdotプローブと電気光学センサの組み合わせによる磁場揺動計測の現状
4. まとめと今後の課題

# ダイポール磁場によるプラズマ閉じ込め研究の進展

- Levitated dipole: **high- $\beta$  plasma** investigation for advanced fusion

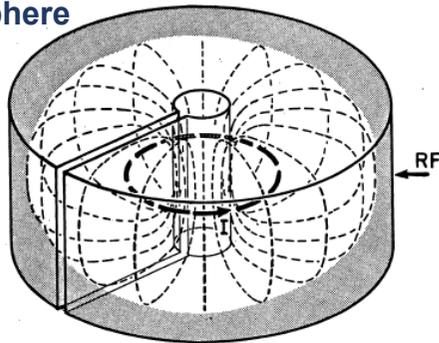
1987 Hasegawa, Comm Plasma Phys. Contr. Fusion

"Dipole Fusion" motivated by plasma in Jovian magnetosphere

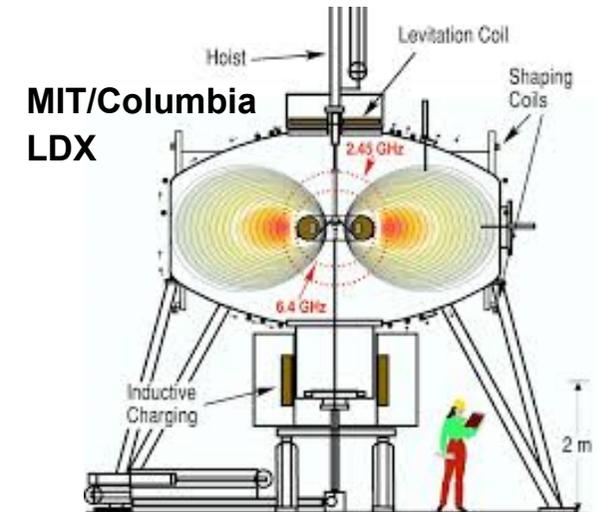
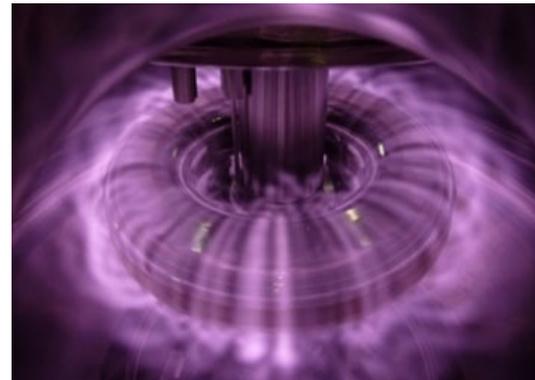
$\beta > 100\%$



Globally equivalent to magnetosphere



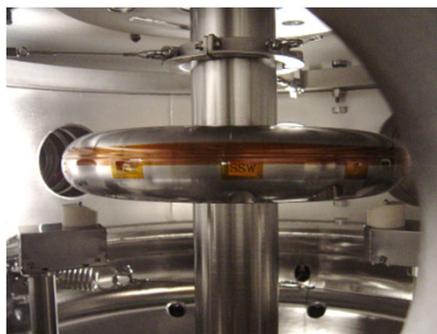
RT-1 of U. Tokyo



D-T  $\Rightarrow$  D-D, D- $^3\text{He}$  Advanced Fusion      Levitated Dipole with SC coil

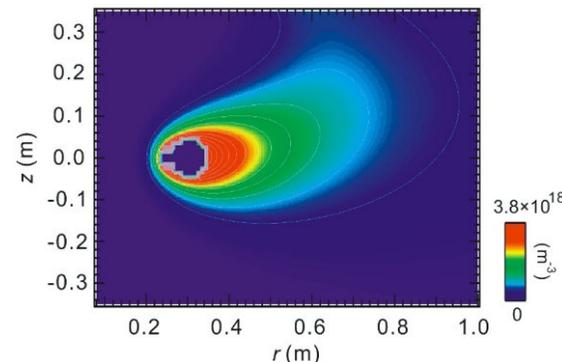
2006 Yoshida+ Plasma Fusion Res.  
2010 Boxer+ Nature Phys.

High-Tc SC technologies



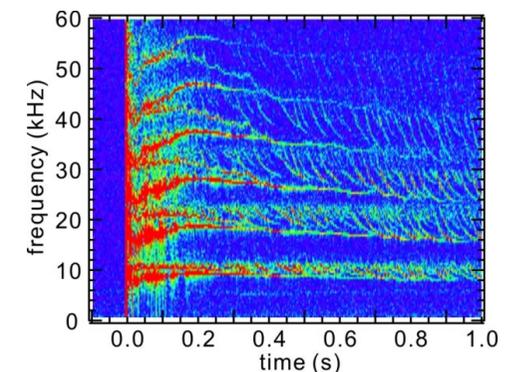
- Fusion/Geospace physics**

Wave particle interaction, relaxation

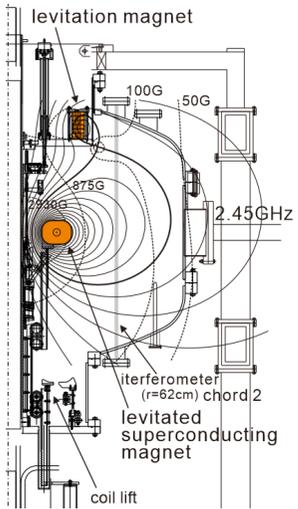


- NNP and antimatters**

Charged particle trap application



# RT-1磁気浮上ダイポールで観測される揺動とその役割

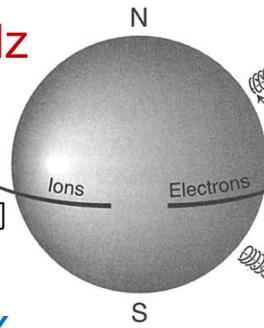


磁場:  
5mT-0.3T

- 周期運動と対応する作用(断熱不変量)

$\Phi = \int B dS \sim P_\theta$

トロイダル方向  
ドリフト運動  
magnetic flux



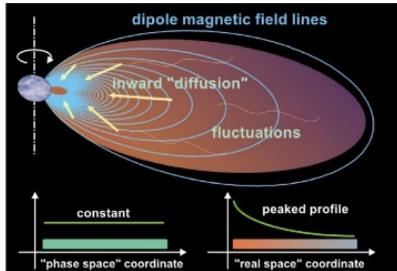
~ MHz action integral

磁力線に沿う  
バウンス運動  $J = \int v_{||} ds$

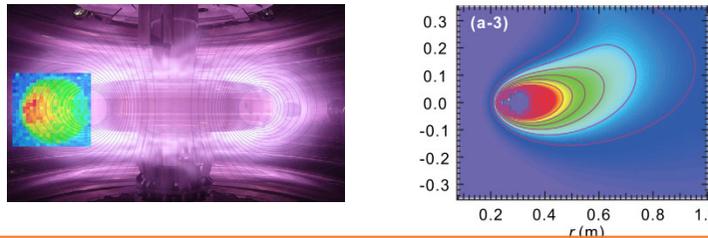
100MHz ~ 1GHz  
 $\mu = v_{\perp}^2 / B$

magnetic moment  
磁力線周囲のgyro運動

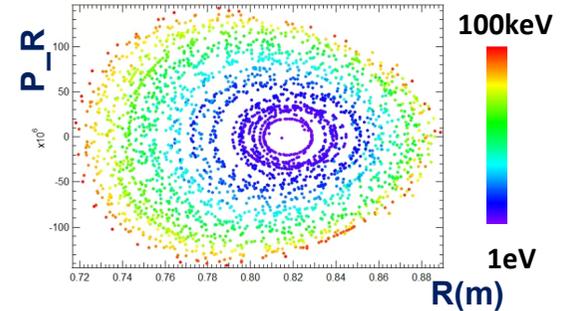
位相空間での「平坦化」



構造形成・位相空間での再構成



加速による  
カオス軌道



内向き輸送の  
駆動・加熱

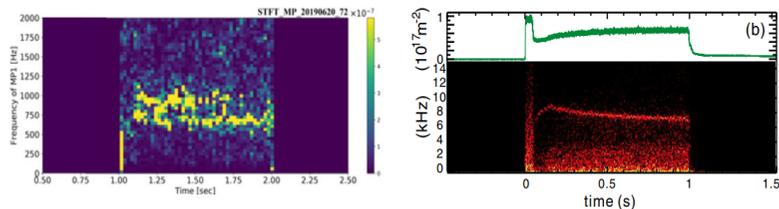
揺動の  
駆動機構

波動粒子  
相互作用

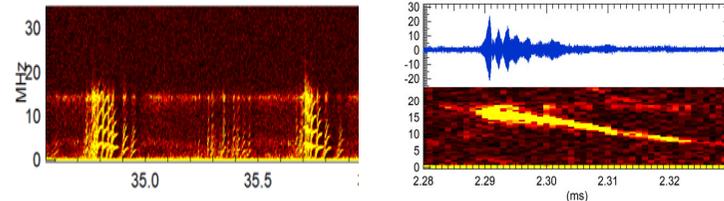
粒子加速,  
輸送過程

位相空間分布と  
関わる揺動駆動

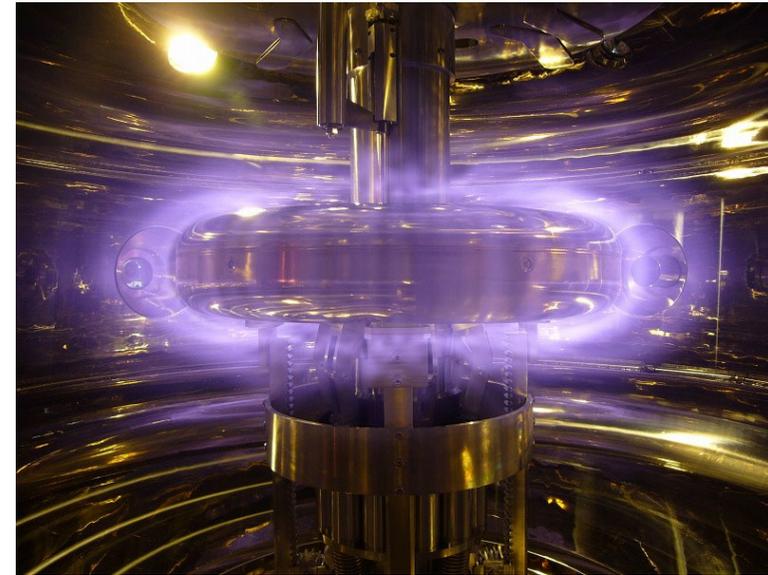
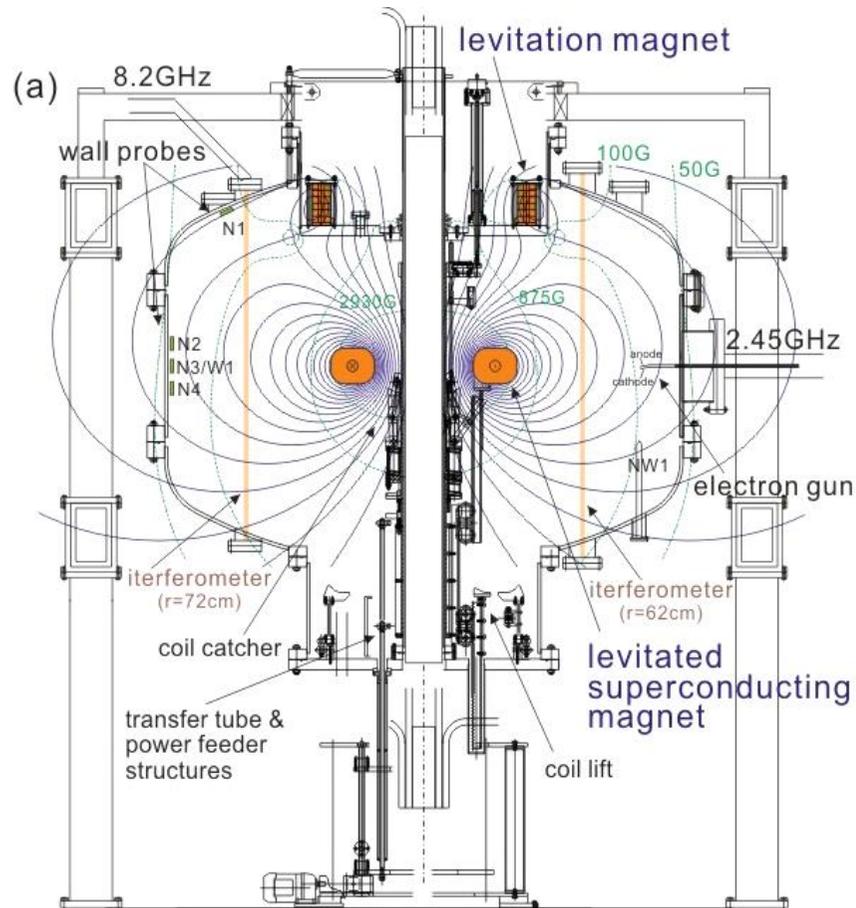
低周波揺動 kHz ~ 10kHz



高周波揺動 MHz ~ 数100MHz



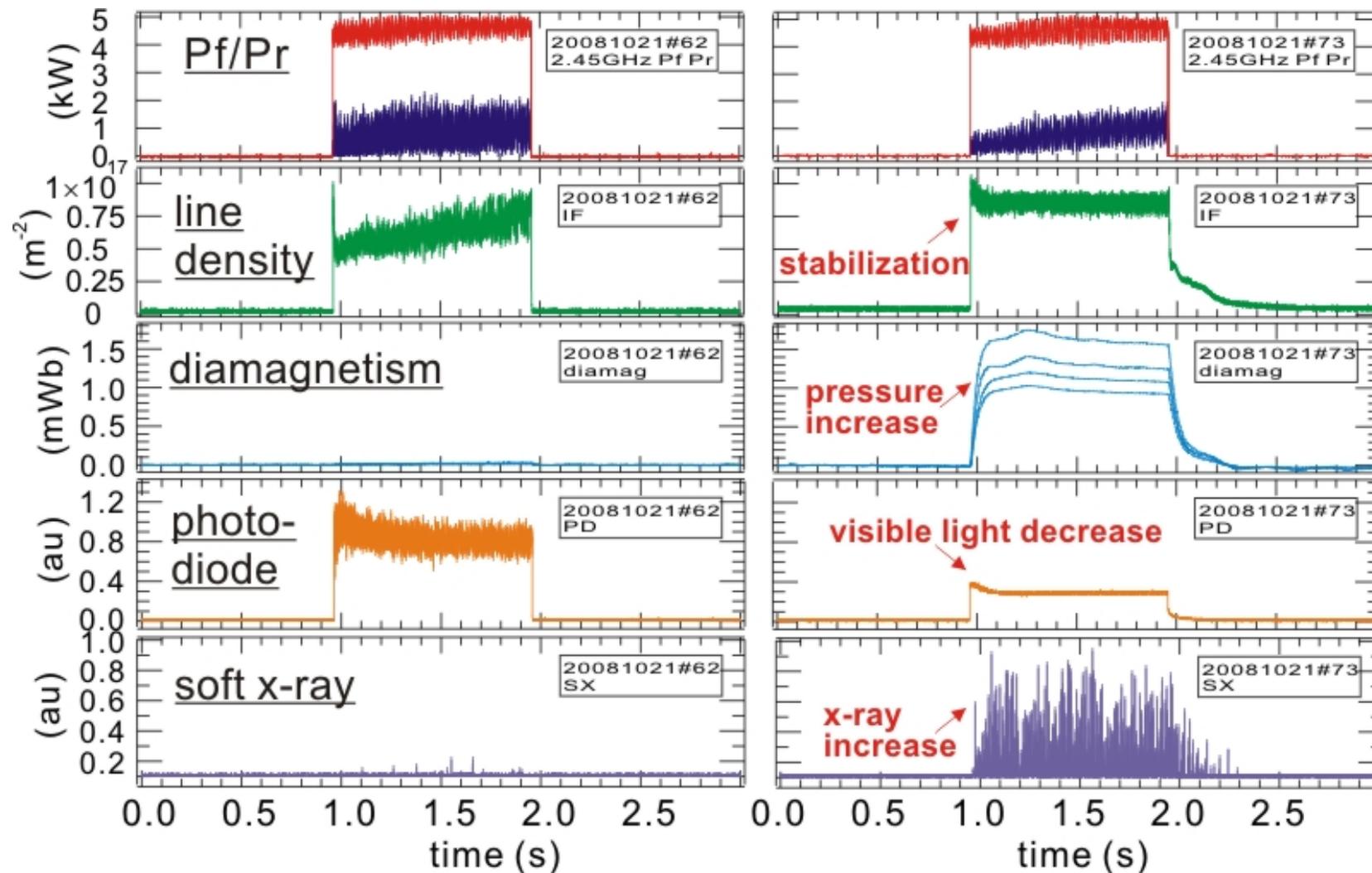
# 高温超伝導コイルによる人工磁気圏RT1



- **Hi-Tc SC (Bi-2223) coil** is magnetically levitated by feedback control
- ECH with 2.45/8.2GHz microwaves, ICH
- Diagnostics: magnetic and electrostatic probes, Thomson scattering, spectroscopy, x-ray, etc.
- High-beta ( $\sim 100\%$ ) plasma, by electron cyclotron heating
- Self-organization and wave particle interaction in plasmas towards advanced fusion, as common physics in space plasmas

# 高温電子成分の増加によるプラズマの高 $\beta$ 化

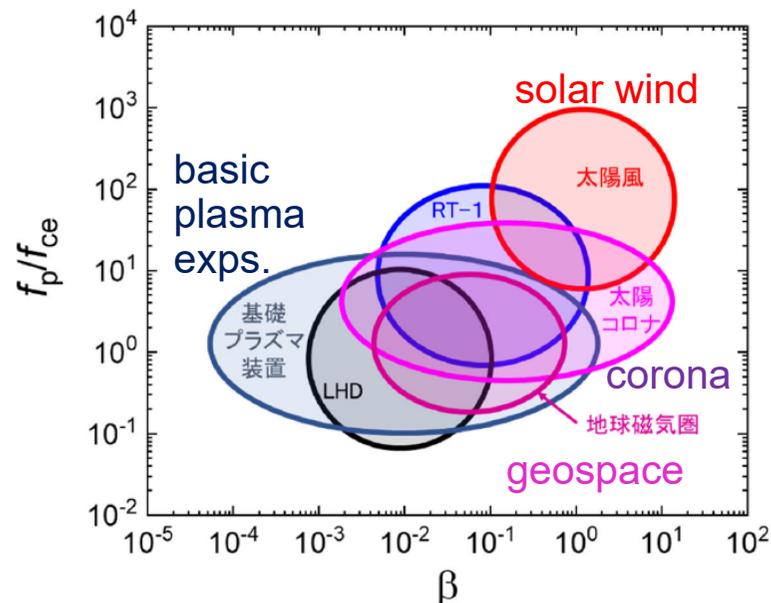
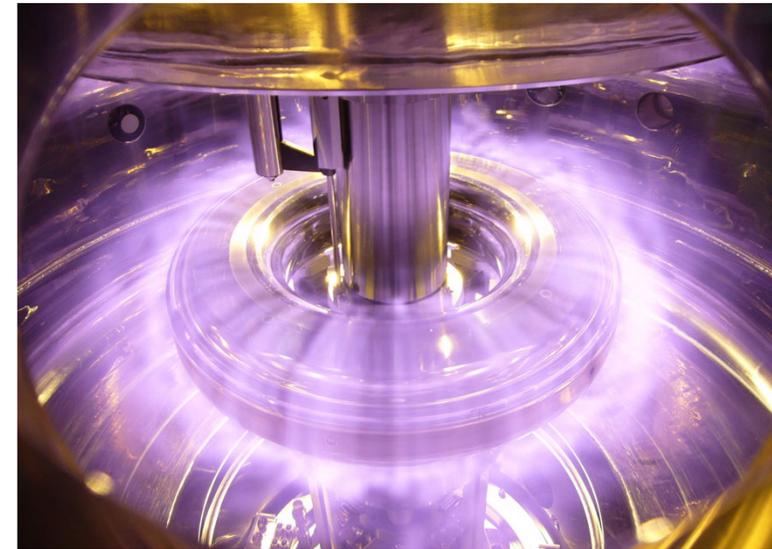
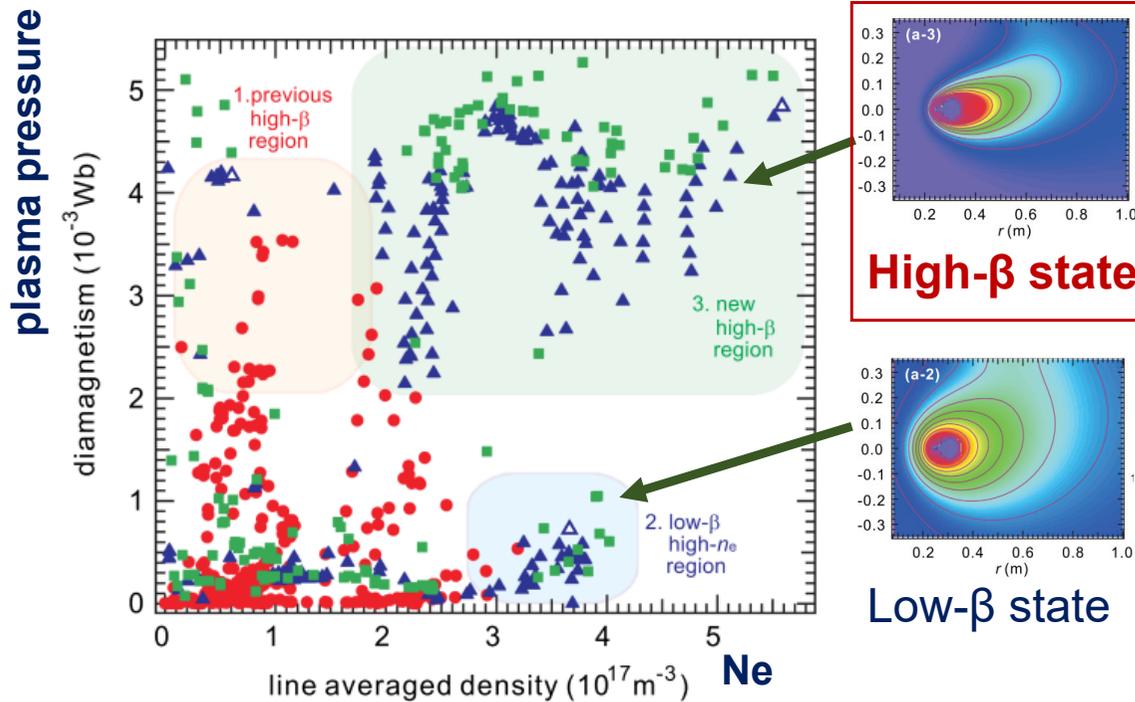
In the first series of plasma experiment, plasmas were generated by ECH with 2.45GHz and 8.2GHz microwaves



Waveforms of ECH plasma in RT-1 with (a)  $P_{H_2} = 4.5 \times 10^{-2}$  Pa (b)  $1.3 \times 10^{-3}$  Pa.

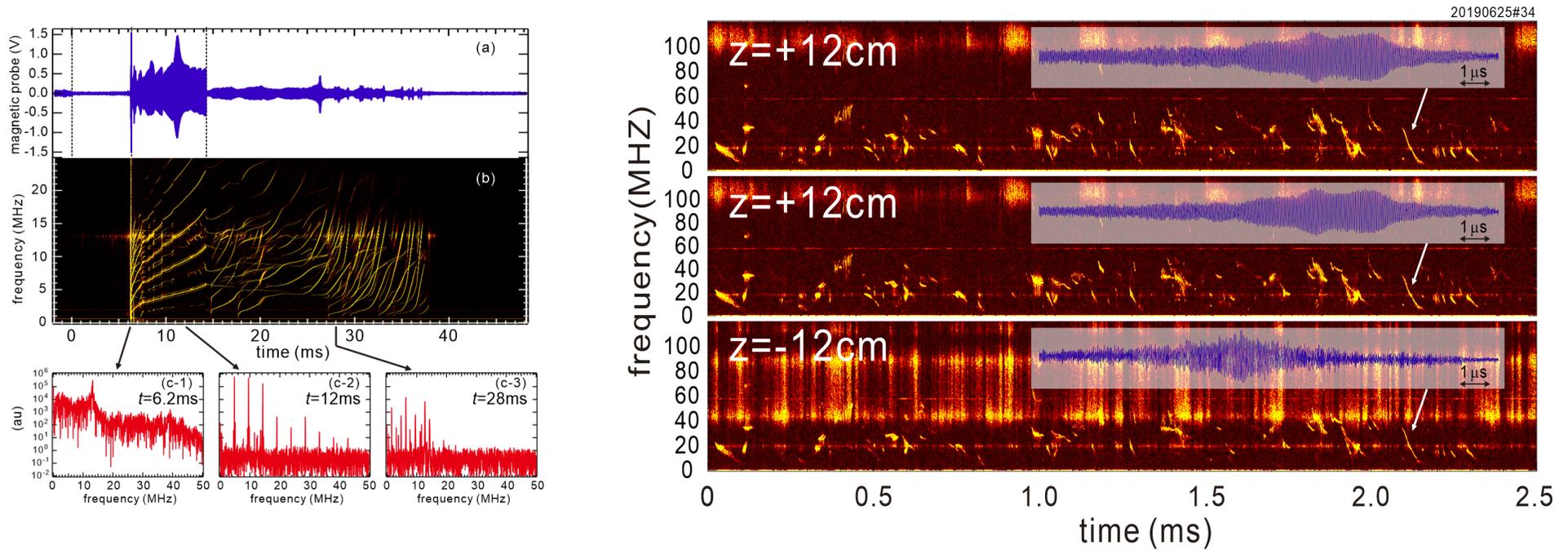
# RT-1の運転領域と宇宙プラズマとのパラメータ比較

2015 Nishiura+ NF, 2017 Nishiura+ NF



- Optimized operation realized
- Local  $\beta \sim 100\%$ ,  $N_e \sim 10^{17} \text{ m}^{-3}$
- $\sim 1\text{s}$  discharge (set by ECH)
- Hot electron ( $> \sim \text{keV}$ ) plasma
- Comparison with space plasmas  
high Ne, strong B, but several similarities

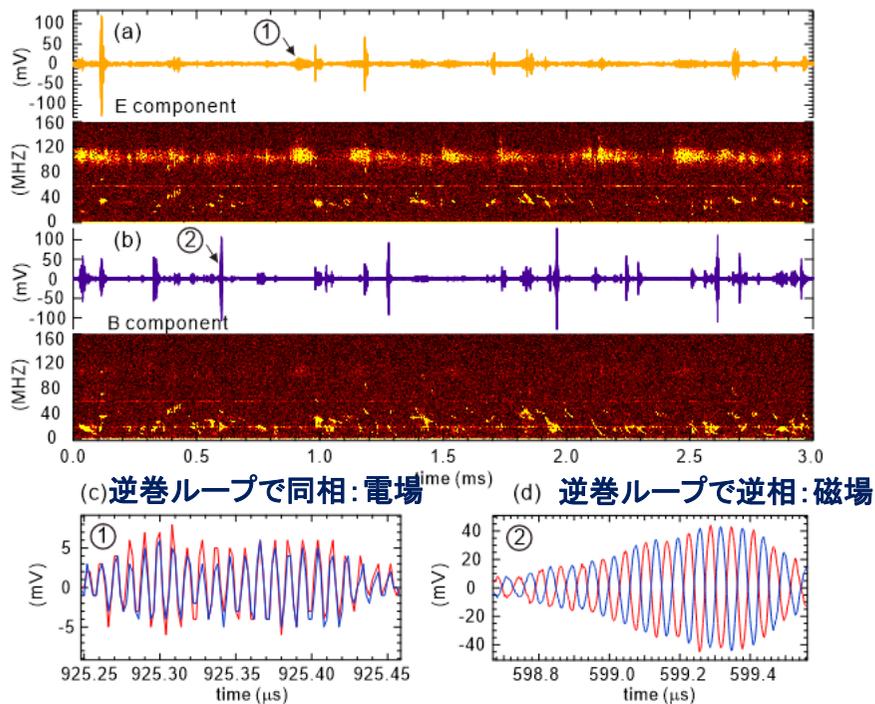
# RT-1の高 $\beta$ プラズマ中の電子サイクロトロン周波数帯揺動



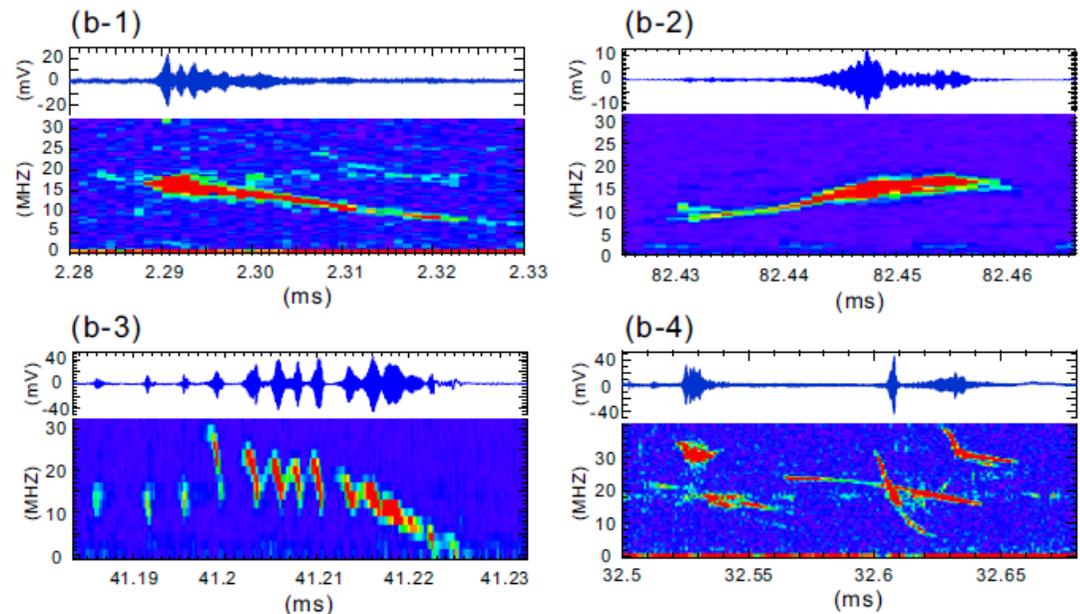
- 磁気ミラーを持つダイポール磁場（大域的に磁気圏と同一）中の現象
- おおよそ電子サイクロトロン周波数以下（電子との共鳴が可能）
- 異なる磁場配位や宇宙プラズマの関連現象  
高エネルギーイオン励起MHDモード，電子系の波動，コーラス放射

# 出現する突発的揺動の特徴と計測上の要請

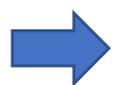
- 電子サイクロトロン周波数程度, 時間的な周波数変調
  - 磁場成分は主に $0.1f_{ce} \sim 0.4f_{ce}$ と $\sim 0.6f_{ce}$
  - RT-1のプラズマ周辺部 ( $B \sim 5\text{mT}$ ) では $\sim$ 数百MHzまで



間欠的に出現する波動の時間発展. (左) 電場 (①) と磁場 (②) 揺動の典型波形と, (右) 磁場揺動信号.



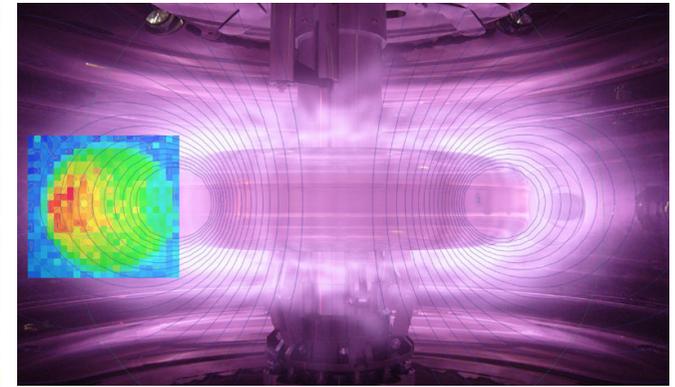
- 比較的高周波のchirp信号の位相情報を含む計測が, ノイズ環境下で必要



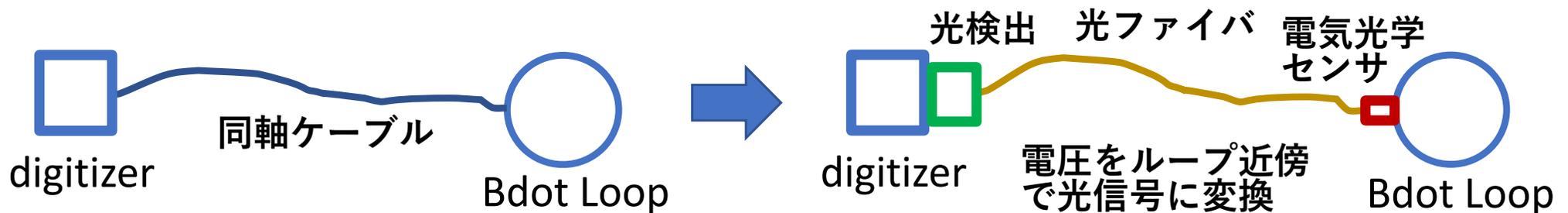
良好な周波数特性と信号伝送時のノイズ低減を目指して, 磁気ループの電圧信号を電気光学素子で受信する磁場揺動プローブを導入した

# 電気光学効果を利用した電圧センサによる磁気信号検出

- ポッケルス効果 (1次の電気光学効果)
  - 電場により物質の屈折率が線形に変化する現象 1992 Hidaka 応用物理
  - 利用例: 高電圧の非接触計測, プラズマ中の電場計測, 高速光シャッター  
 サージセンサ, 架空配線の健全性 2001 Yagi+ JPFR Series. (カオスによる無衝突抵抗)  
2017 Nishiura+ RSI. (ICH電場の直接計測)



- プラズマの磁気計測に用いることで,
  - 計測素子や信号の伝送経路が光部品であり, **低ノイズ化**が期待できる
  - 伝送経路の容量低減により, **高周波領域までLC共振を避けた計測**が可能



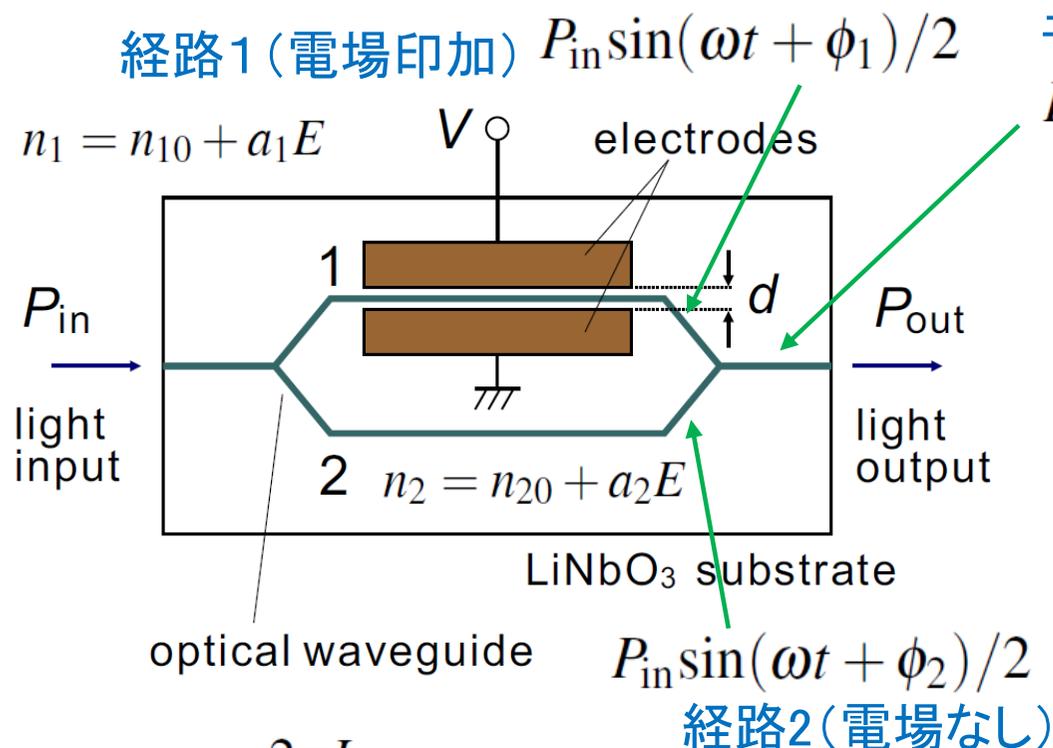
# 電気光学効果による電場センサの測定原理

- ポッケルス素子上に**光導波路**を設置

精工技研 ES-2005

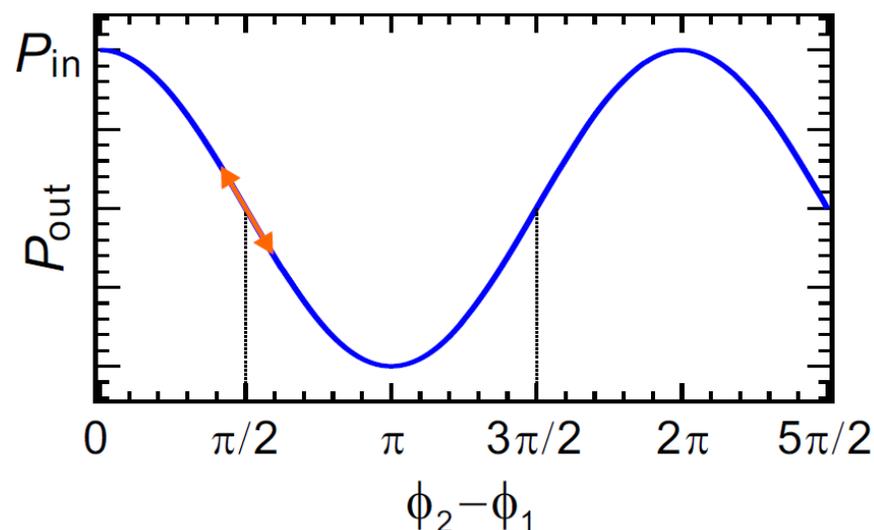
(反射型導波路タイプセンサ)

- 分岐した片方の経路のみに電場/電圧を印加する
- 両者の**干渉光**を光ファイバで転送し, 光強度を計測する



干渉光

$$P_{out} = [1 + \cos(\phi_2 - \phi_1)] P_{in}/2$$



$$\phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_1 - n_2)$$

$$\phi_2 - \phi_1 = \frac{2\pi L}{\lambda} [(a_1 - a_2)E + n_{10} - n_{20}]$$

$$\Delta(\phi_2 - \phi_1) \propto \Delta E \quad \text{位相差と電場の比例関係}$$

- 電場情報を位相差として取り出す
- 出力パワーが線形に比例する範囲で使用している(感度, 線形性)

# 電気光学センサによる電圧検出部とBdotプローブとしての校正

- 電気光学素子センサを含む光回路部分の構成

レーザー光源 ID Photonics 精工技研 ES-2005

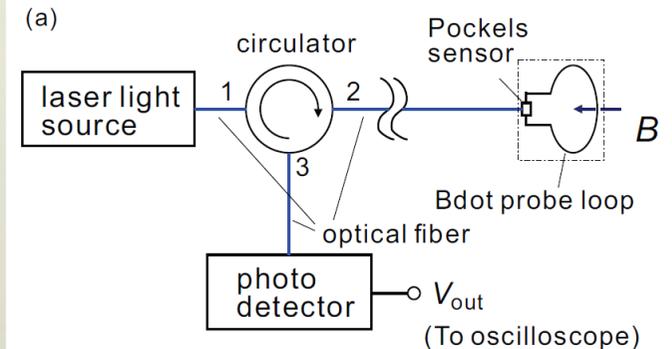
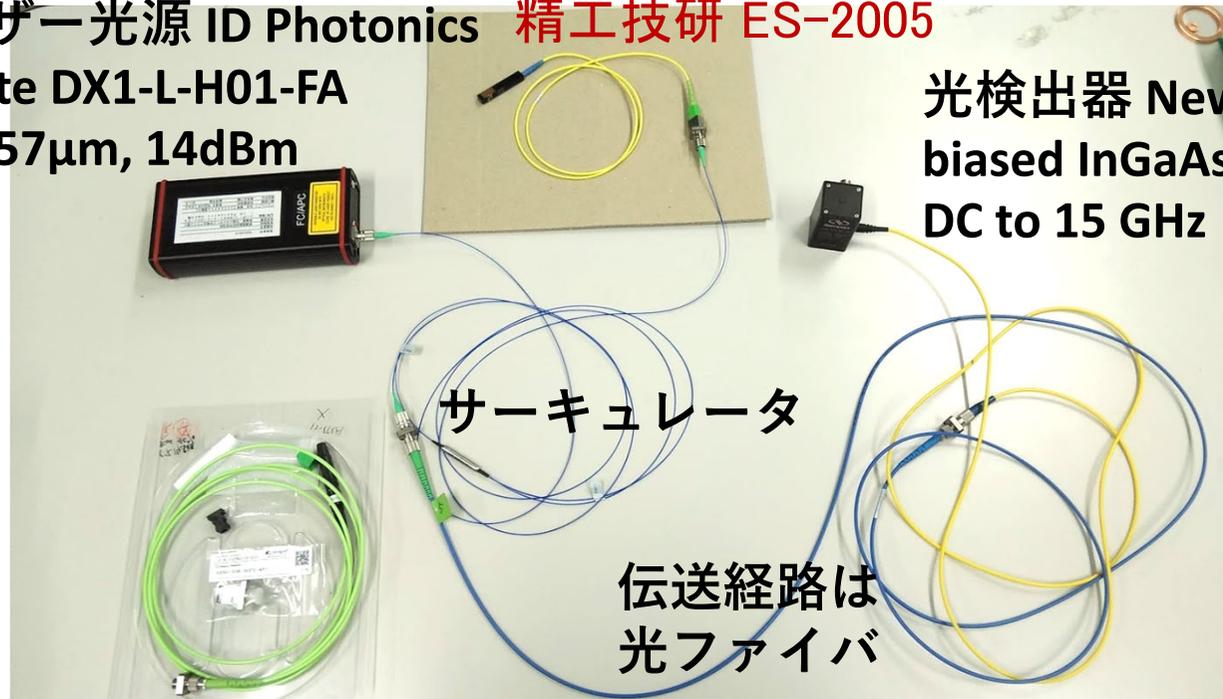
CoBrite DX1-L-H01-FA

$\lambda = 1.57\mu\text{m}$ , 14dBm

光検出器 Newport 818- BB-35F

biased InGaAs fiber-optic detector,  
DC to 15 GHz

(500MHz オシロスコープ  
Rohde & Schwarz RTM3004へ)



- 磁場校正

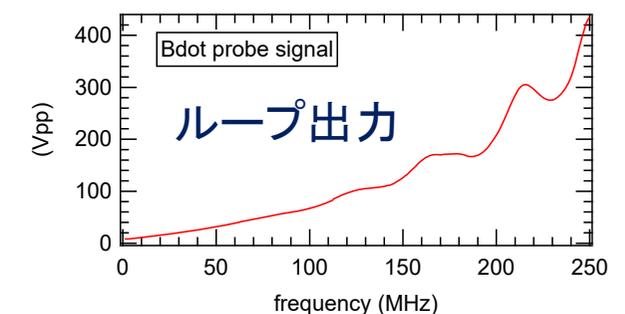
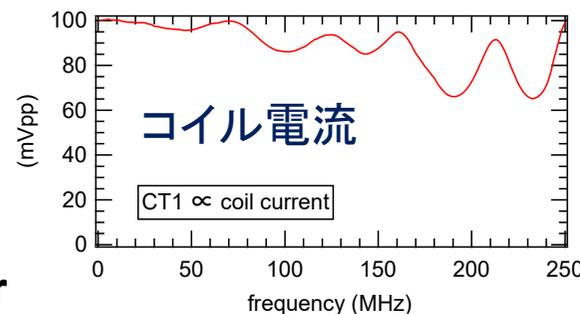
$\Phi 1\text{cm}$   
single-turn  
loop



電流トランス Tektronix

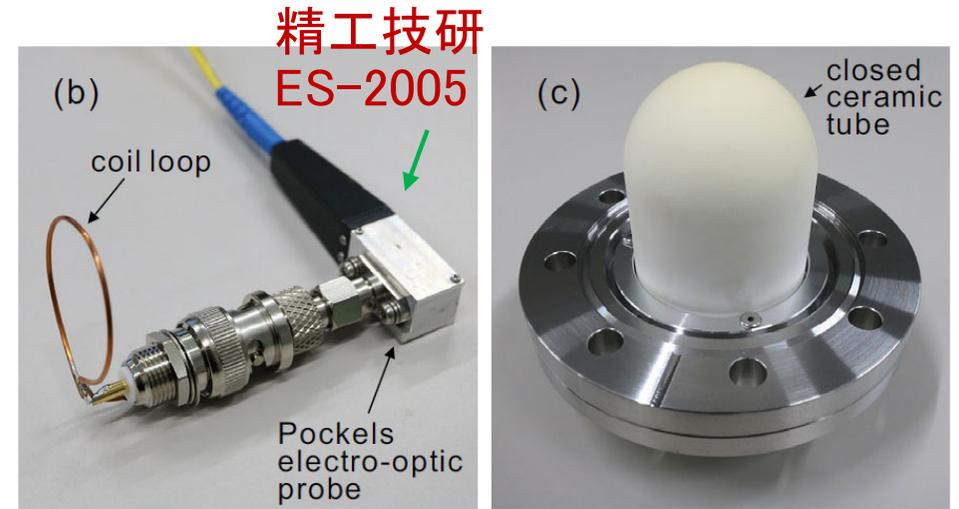
CT-1, 1GHz current monitor

低周波: ヘルムホルツコイルによる校正 (磁場の絶対校正),  
高周波: ループ電流をCTでモニタ, 鎖交する磁束を計算



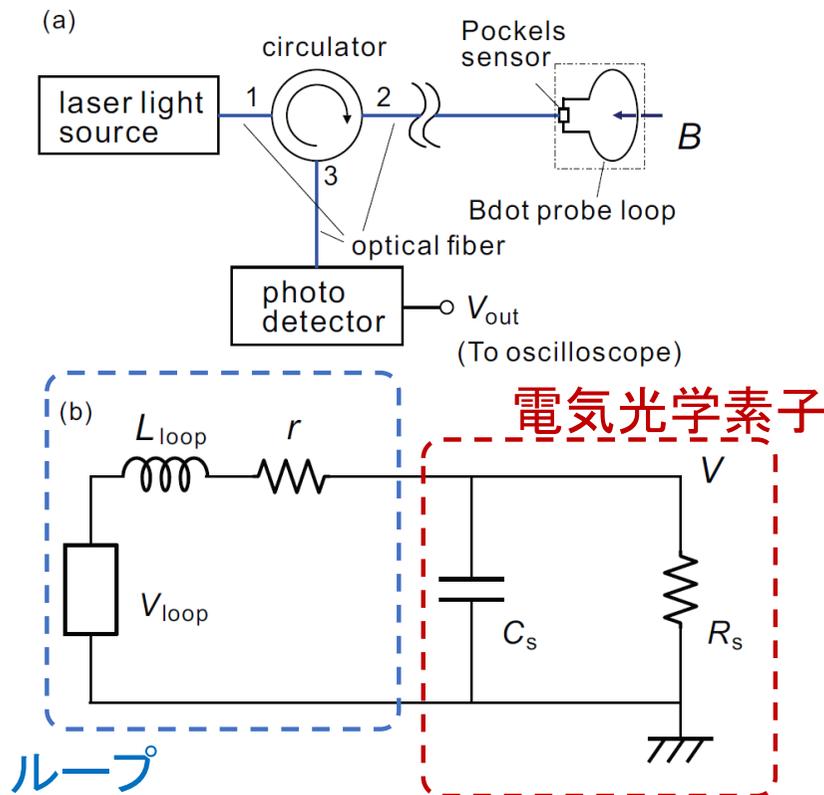
# 磁場揺動センサの構造と等価回路による周波数特性評価

- 今回導入した磁場揺動プローブ
  - セミリジッド同軸ケーブルのループ
  - ポッケルス効果を利用した電場センサ
  - 両者を近接して設置し、容量を削減



同軸構造による静電シールドを持つ磁気プローブの構造と、セラミック保護管内部に配置したプローブの写真。

- 計測系の等価回路と周波数特性



$$V_{loop} = SN \frac{dB}{dt}$$

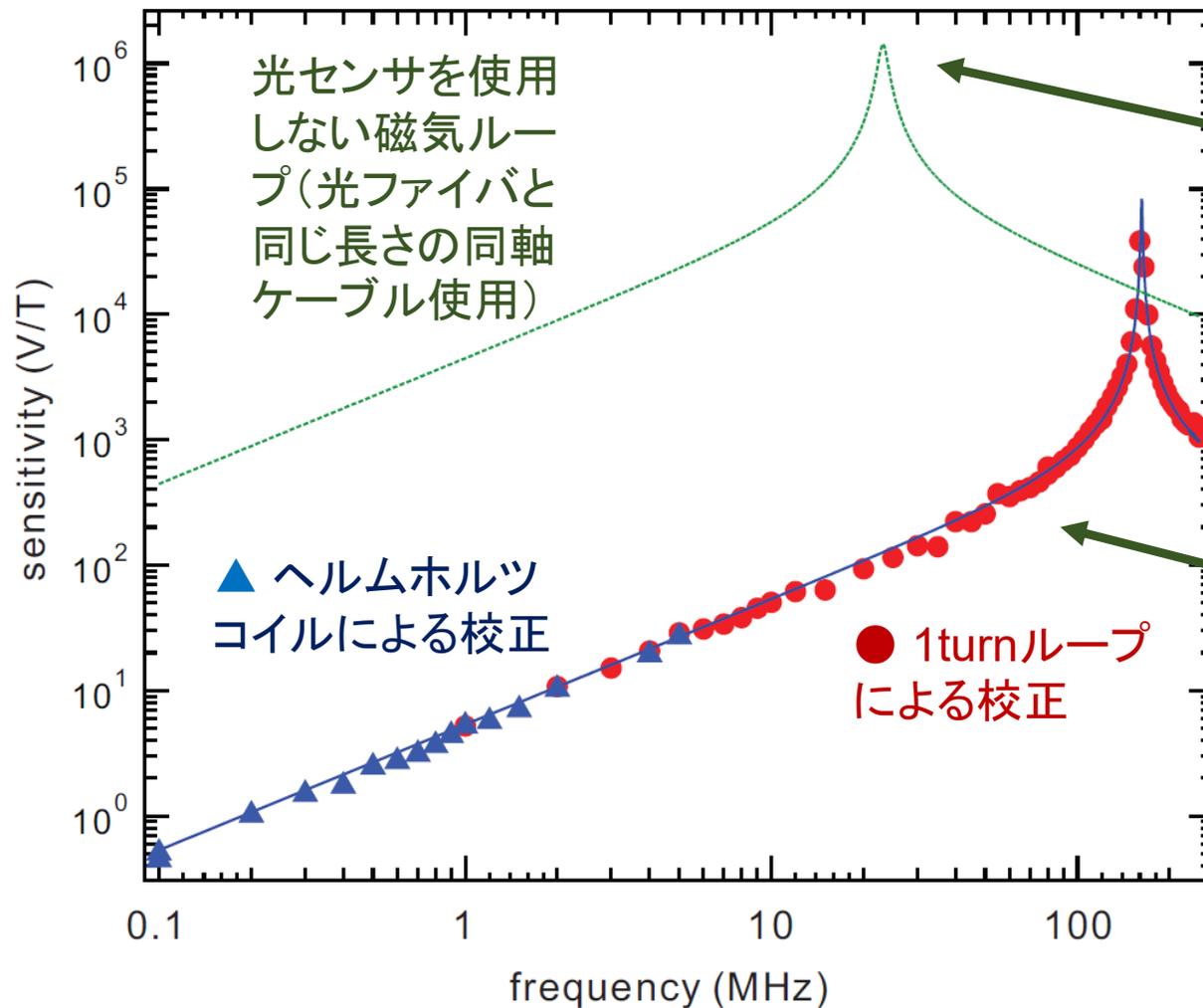
磁場揺動と出力信号の関係  
(係数除きBdotプローブ同様)

$$\frac{V(\omega)}{B(\omega)} = SN \frac{\omega^2 (L_{loop}/R + rC_s) + i\omega [(1 + r/R_s) - L_{loop}C_s\omega^2]^2}{[(1 + r/R_s) - L_{loop}C_s\omega^2]^2 + \omega^2(L_{loop}/R_s + rC_s)^2}$$

$$\omega \ll 1/\sqrt{L_{loop}C_s} \quad \omega \ll R_s/L_{loop} \quad (\text{低周波では線形な比例関係に帰着})$$

$$\frac{V(\omega)}{B(\omega)} = SN \frac{\omega^2 (L_{loop}/R_s) + i\omega [1 - L_{loop}C_s\omega^2]^2}{[1 - L_{loop}C_s\omega^2]^2 + \omega^2(L_{loop}/R_s)^2}$$

# 周波数特性の計算値と実測値, 通常のBdotプローブとの比較

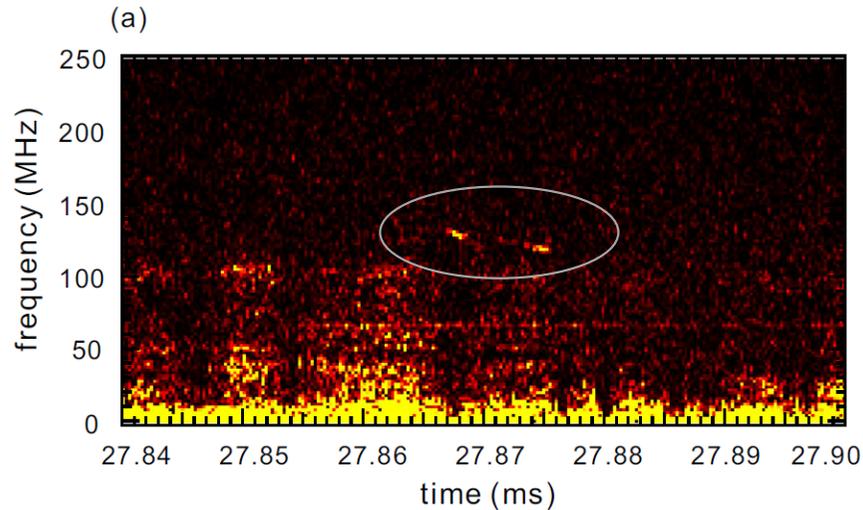


通常のBdotプローブ(光ファイバと同等の長さ5mの同軸ケーブル使用)を使用した場合の感度特性

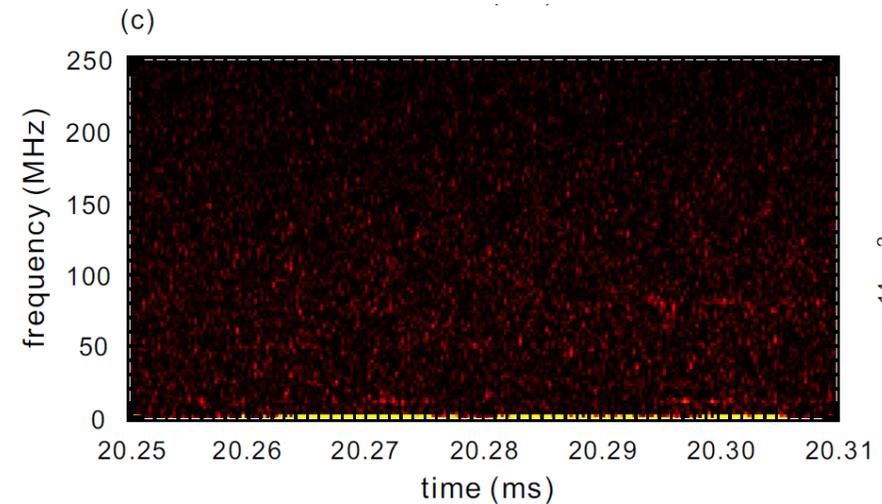
電気光学センサを導入し伝送経路を短くしたことでLC共振周波数が上昇,フラットな特性の範囲が広がった

- 計測器(デジタイザ)をプラズマから離れた状況で, LC共振以下のフラットな領域を幅広く取る磁場揺動計測が可能になった
- 一方, 現状のレーザーと光検出器では感度は非常に低い

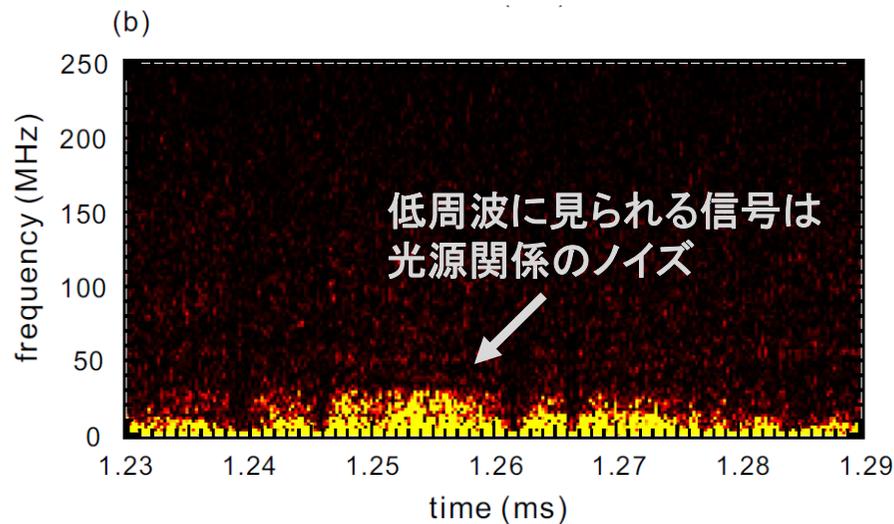
# 磁場揺動の検出



電気光学センサを利用した磁場計測  
(高 $\beta$ 時): 150MHz付近に揺動



通常のBdotプローブ(ループ+同軸  
ケーブル伝送)による計測(高 $\beta$ 時):  
揺動は観測されない



電気光学センサを利用した磁場計測  
(低 $\beta$ 時): 揺動は出現しない

- 計測感度は現状で高くないが、揺動の磁場信号を検出した。
- コイルを磁気浮上しない純ダイポール磁場中で比較的高周波の揺動が見られる。

## まとめと今後の課題

- RT-1ダイポールでは揺動が駆動するプラズマ現象の研究を進めており、本課題では特にコーラス放射状の比較的高周波の揺動に注目した。
- 観測されるこのタイプの揺動は以下の性質を示す：
  - 温度非等方性を持つ高温電子による高 $\beta$ プラズマ中で、 $f \sim 0.1-0.4f_{ce}, 0.6-0.8f_{ce}$  (共にチャープを示す),  $f_{ce}$  付近の間欠的な揺動発生。
  - 多くの揺動モードはコヒーレントな磁場揺動であり、磁力線に沿い伝搬する。
  - 周波数の時間的な変化(多くは周波数低下)が観測される場合が多く、R波として矛盾しない分散関係を示す: コーラス放射の自発励起と判断
  - 磁力線上の発生場所の特定, 発生条件, 粒子加速の検出が課題となる。
- 磁場揺動計測方法として、電気光学センサによる磁場信号の検出を提案し、プラズマが揺動が検出された。コイル着地状態でコヒーレントな揺動が出現。
- レーザー光源と光検出器の改良による計測感度の改善が今後の課題。