

第22回クエスト研究会 2017年2月10日
九州大学応用力学研究所 2階大会議室

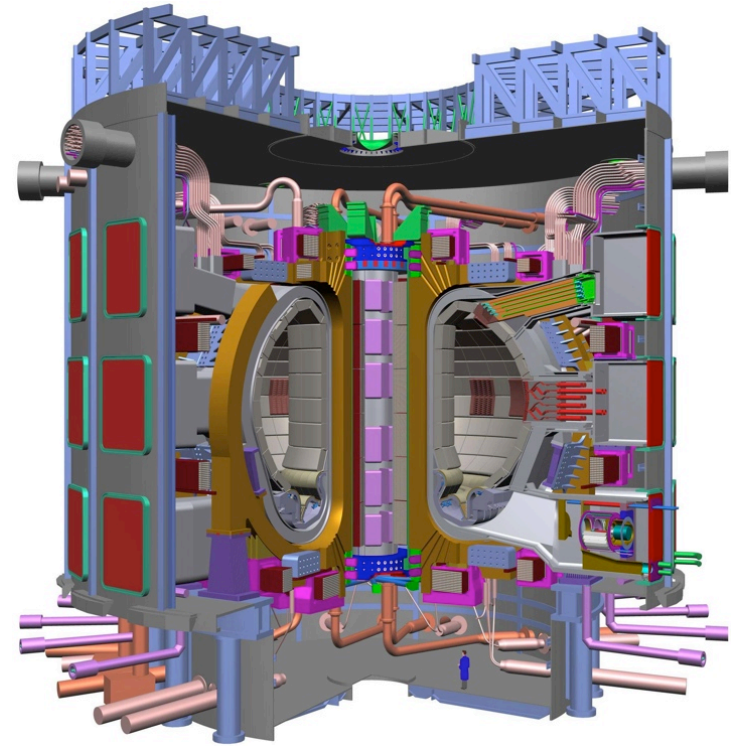
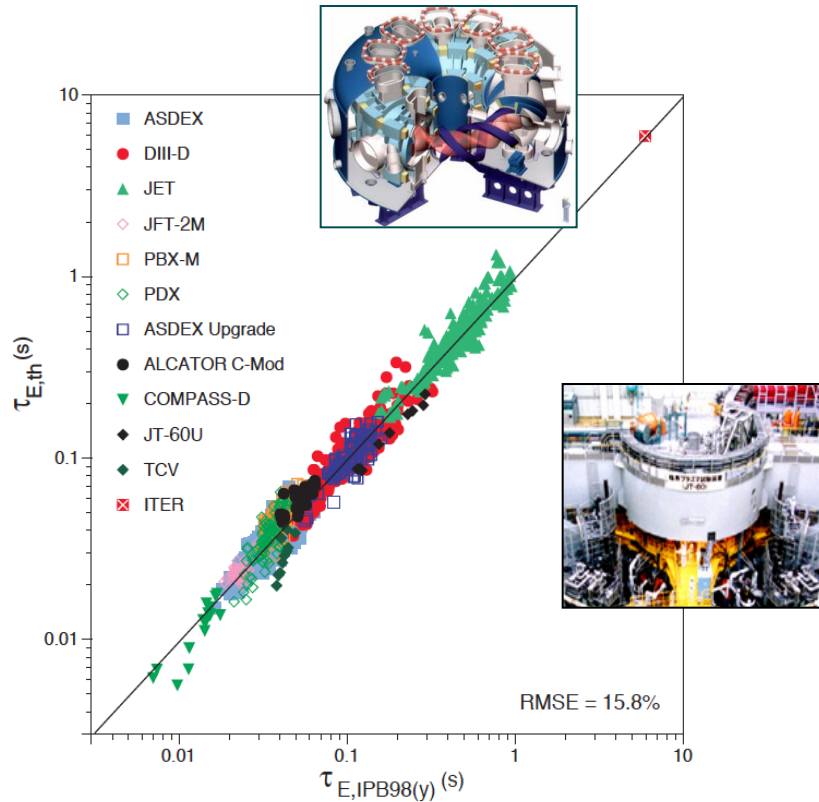
クエストにおける 高周波数バイアス実験計画

永島芳彦

九州大学応用力学研究所

一部直線装置PANTAのデータを使用させていただいたことに感謝します。

Plasma Turbulence and Fusion



$$\tau_E \propto I^{0.96} B^{0.03} P^{-0.73} n^{0.40} M^{0.2} R^{1.83} \varepsilon^{-0.06} k^{0.64}$$

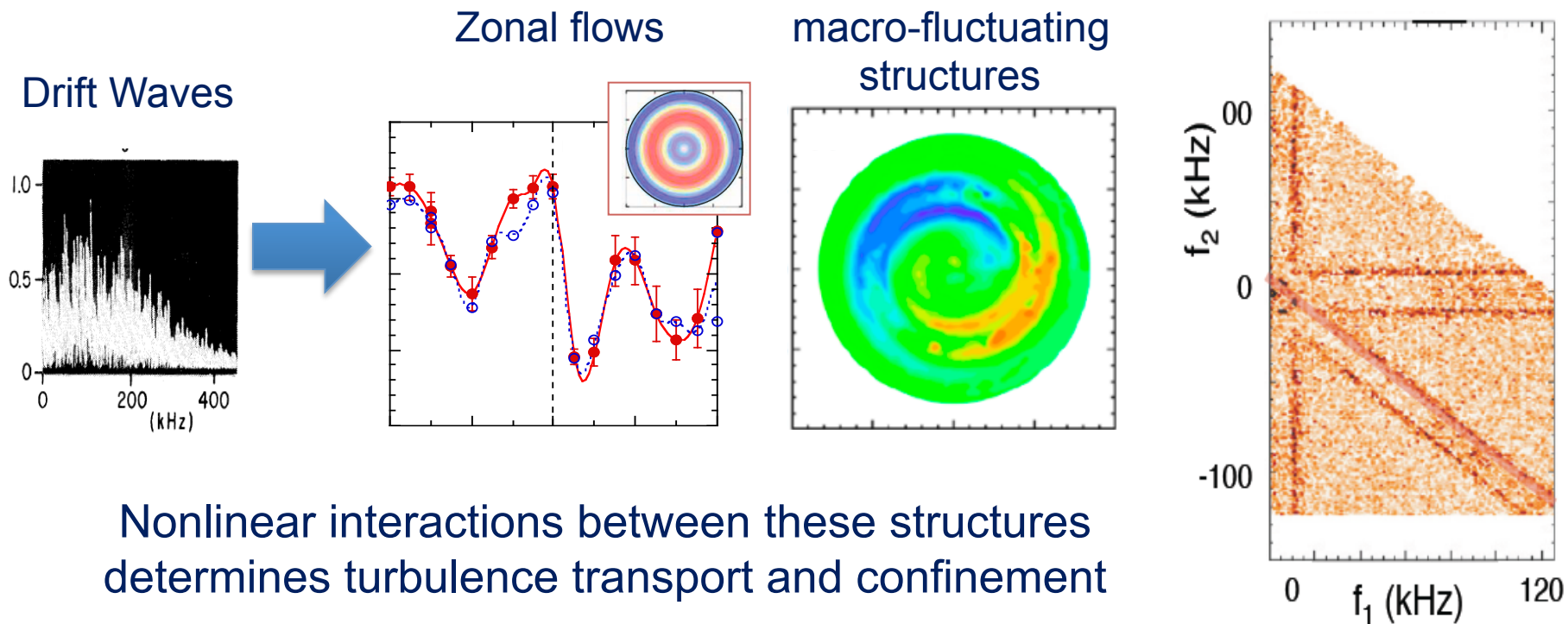
Empirical laws of confinement

Confident prediction needs the first principle understanding of plasma turbulence

核融合プラズマの乱流輸送研究の進展

Elemental meso- and macroscale structures have been found, and the nonlinear coupling has been successfully quantified.

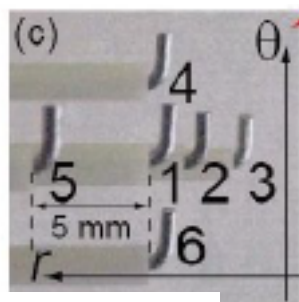
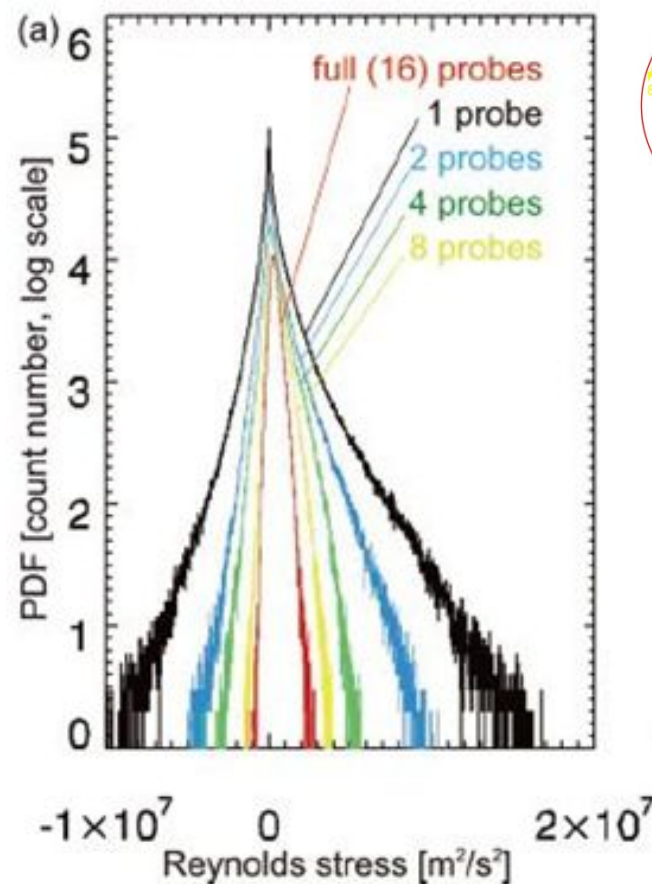
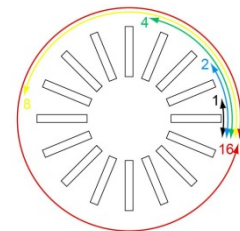
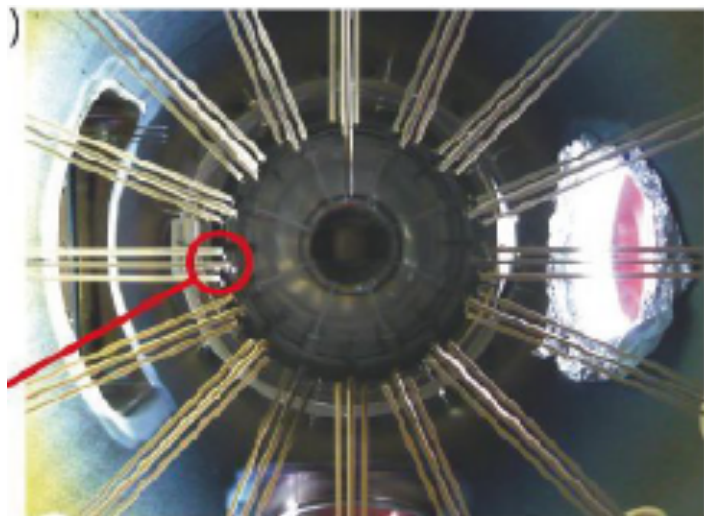
Development of the tools for turbulence analysis



モード分解による解析で、乱流の非線形性に関する理解が飛躍的に進んだ。

モード分解から乱流輸送の統計則へ

プローブを山のように差して...



V_θ (3, 5)

V_r (4, 6)

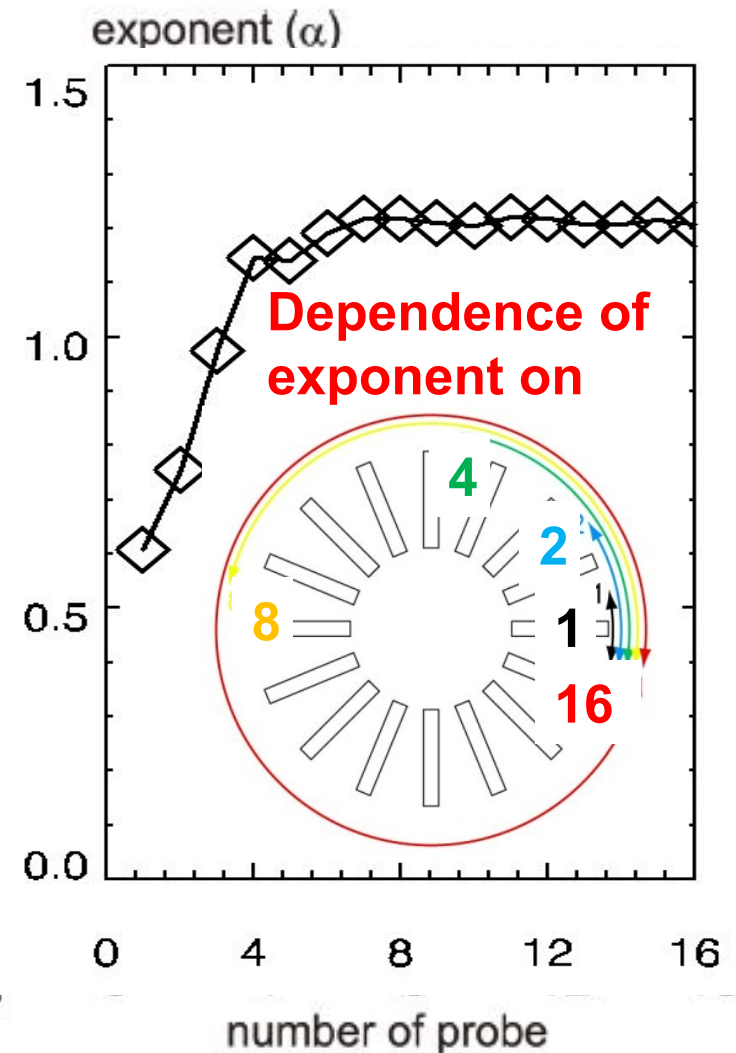
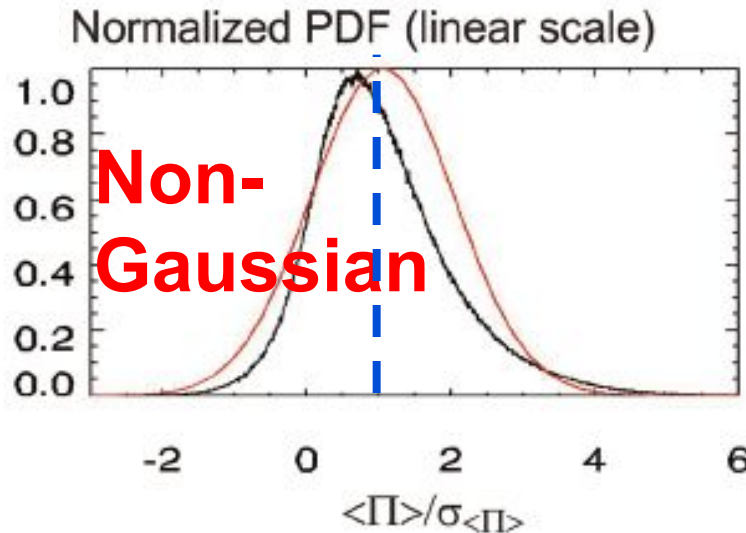
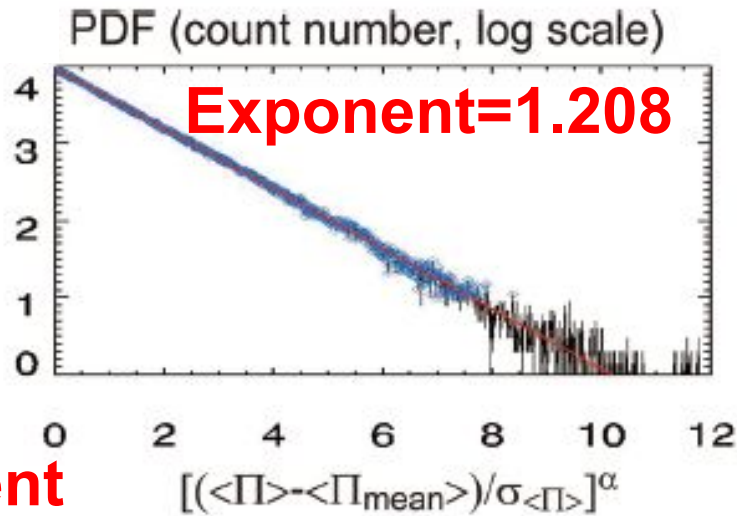
$$-V_r V_\theta = \pi_{r\theta}$$

大域的乱流輸送 (この場合は $\langle \pi_{r\theta} \rangle$) の統計則を知りたい (エネルギー分配、大強度変動)。

Y. Nagashima, et al., POP2011

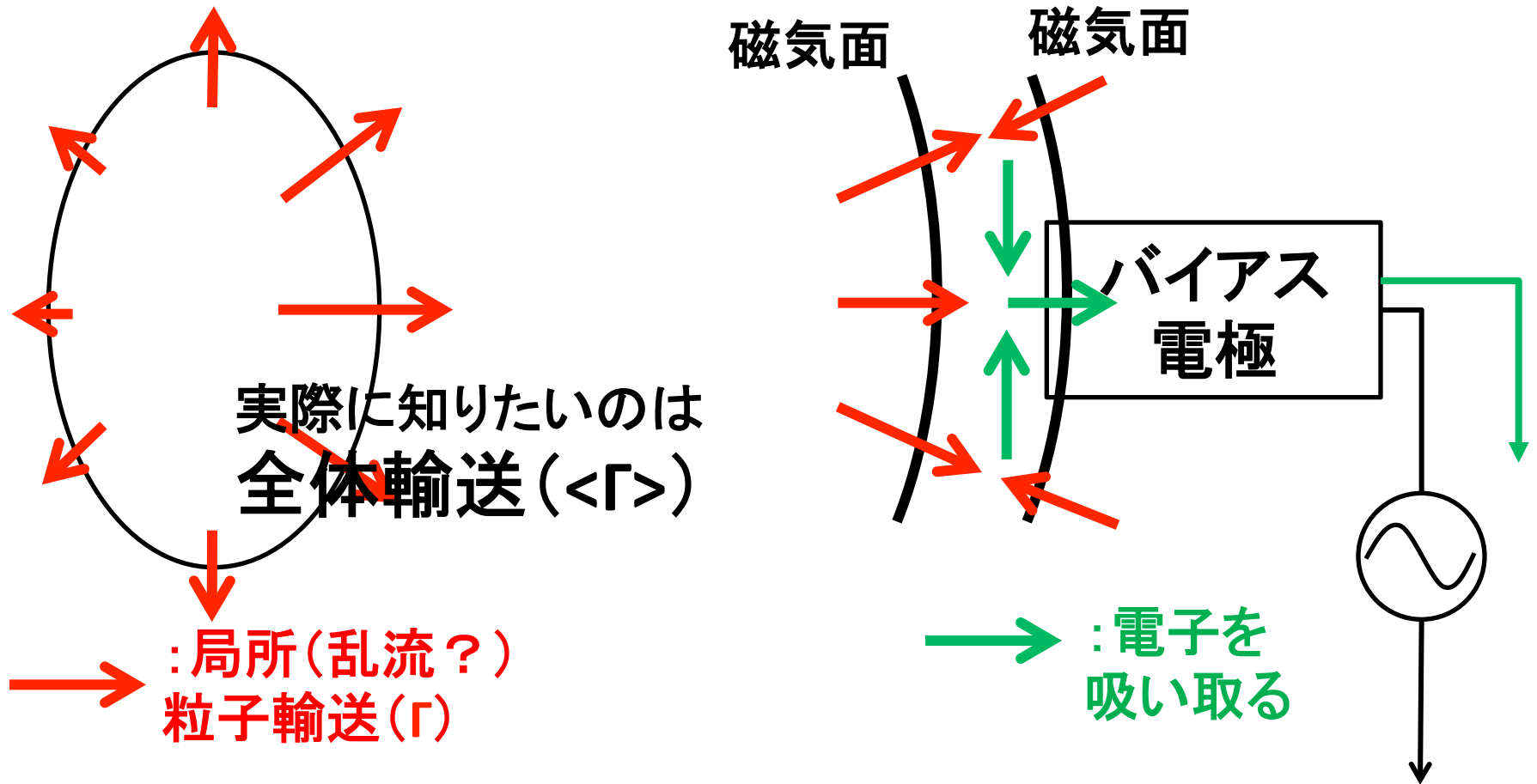
大域乱流輸送の統計則を知りたい

Stretched
Gaussian
Law
 α : exponent



$\langle \pi_{r0} \rangle$ の非ガウス性やテールの指数依存性を調べた。
→QUESTで研究を行うには？

新しい粒子輸送の研究？



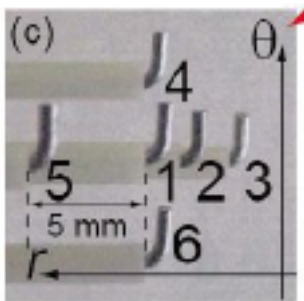
ある磁気面間の (狭い) 領域について、電極から高速で (乱流輸送の供給速度よりも早く) 電子を吸い取る

→ 復帰時間から粒子輸送を定量的に見積もれないか。

バイアスをかけてプラズマは 変調される？

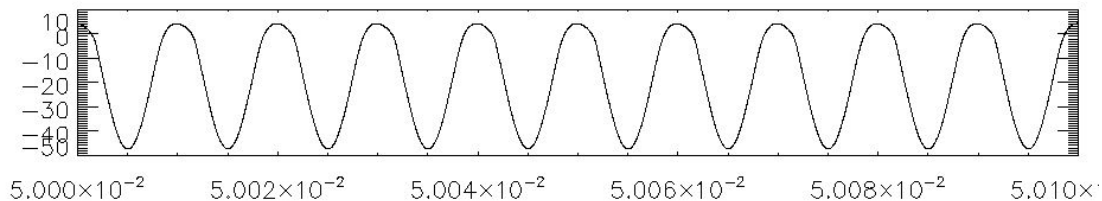
質問: 早いバイアスをかけて
プラズマは変調されるか。
答え: されます。

質問: 変調されたプラズマ
は元通りになるのか。
答え: なりそう。

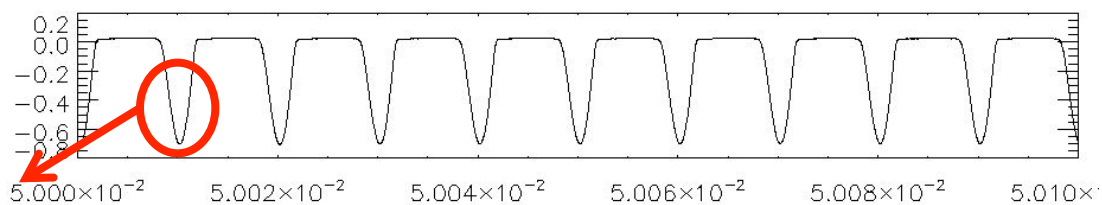


電流変調
(max 0.6 A)
電位変調
(~ 1.5 V)
ベースライン \rightarrow

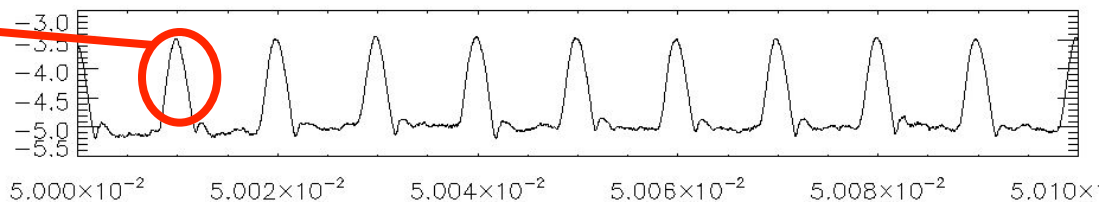
1番プローブの電圧 [V]



1番プローブの電流 [A] (負は電子飽和側)



2番プローブの浮遊電位 [V]



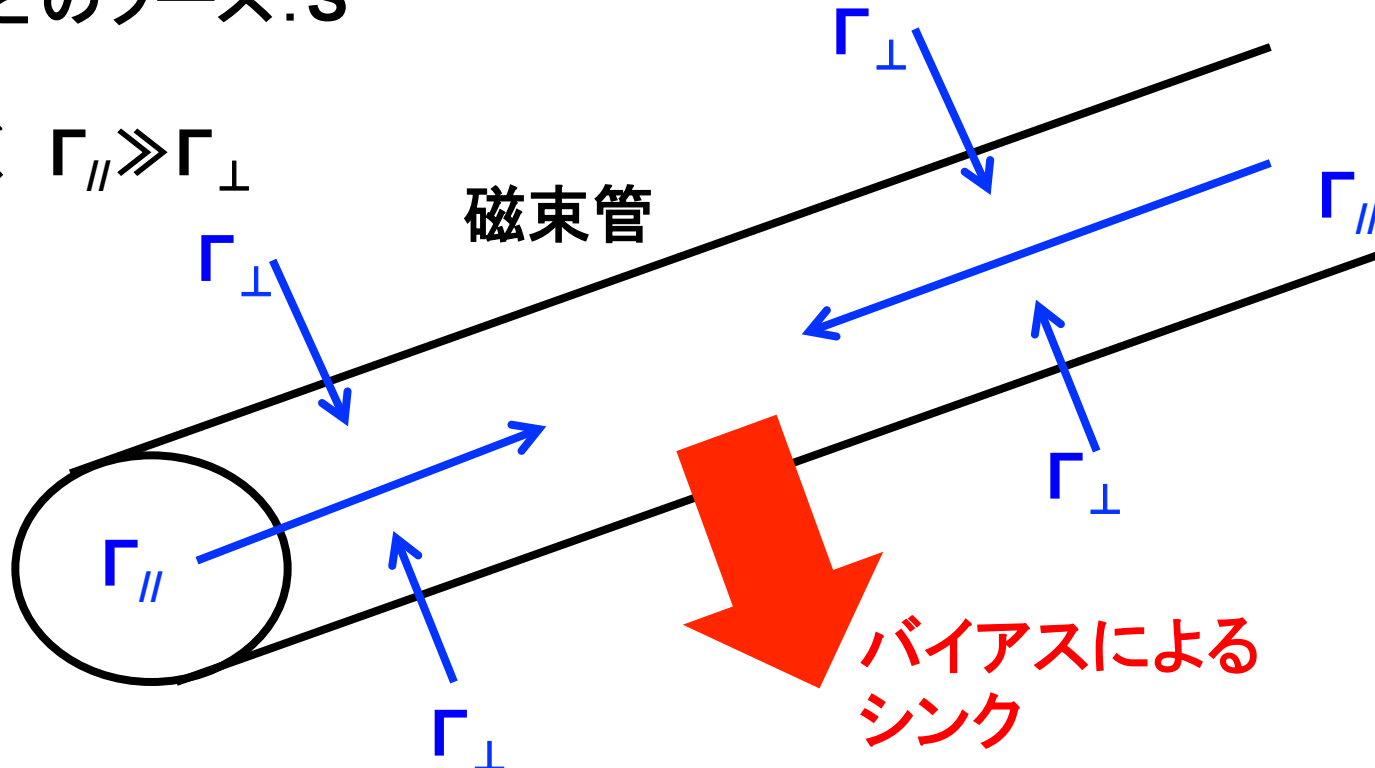
time [sec]

プラズマを早く変調すれば、高時間分解能で変調の度合いや時間
応答がわかる可能性がある。

電子の供給経路

磁束管に沿った輸送： $\Gamma_{//}$
磁束管に垂直方向の輸送： Γ_{\perp}
電離などのソース： S

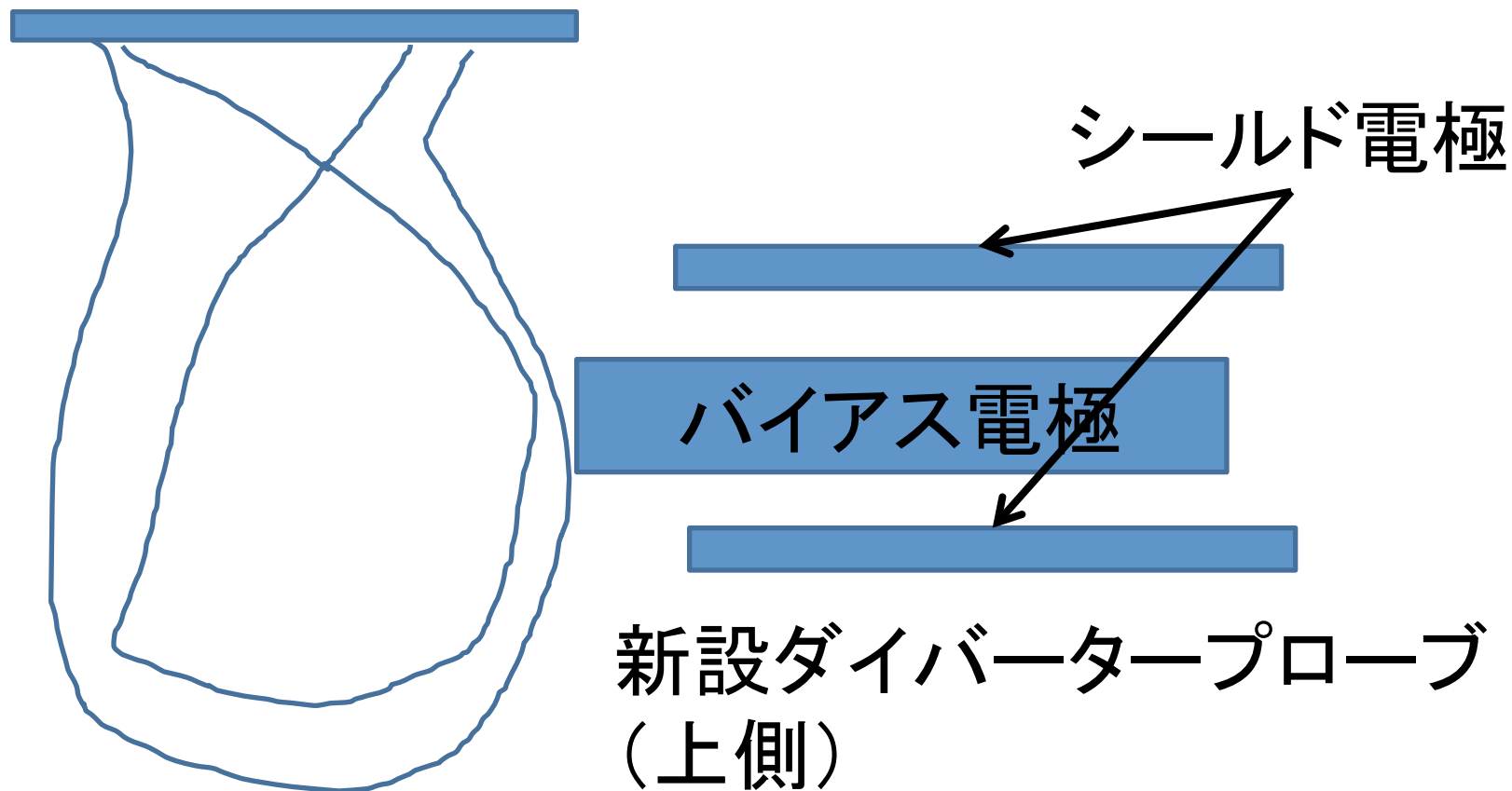
おそらく $\Gamma_{//} \gg \Gamma_{\perp}$



バイアスによって電子が捕集される場合、磁力線に沿った向きに選択的に電子が失われていくと推定される。

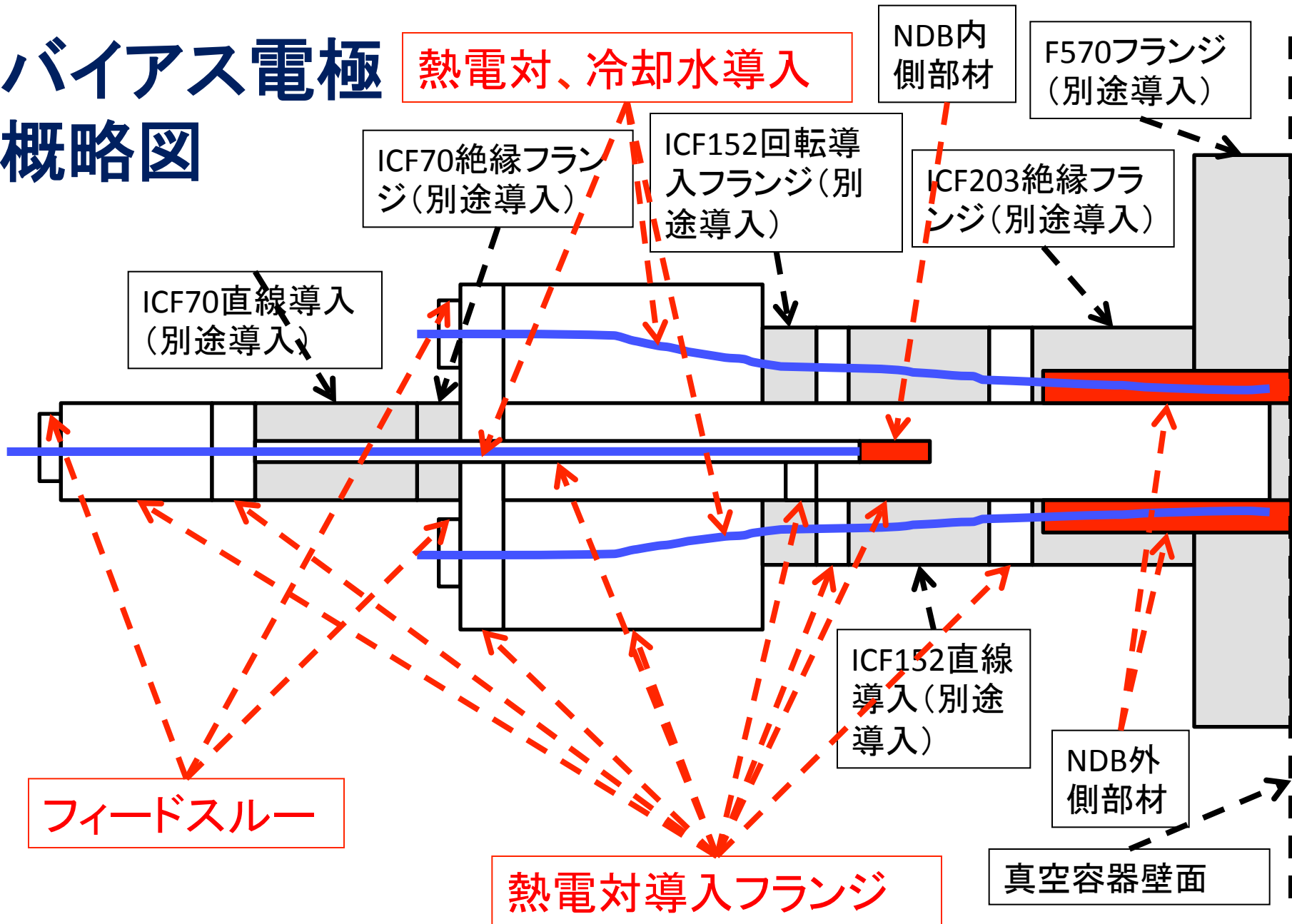
→バイアス電極が接触した磁気面に沿って電子が失われると期待。

実験計画



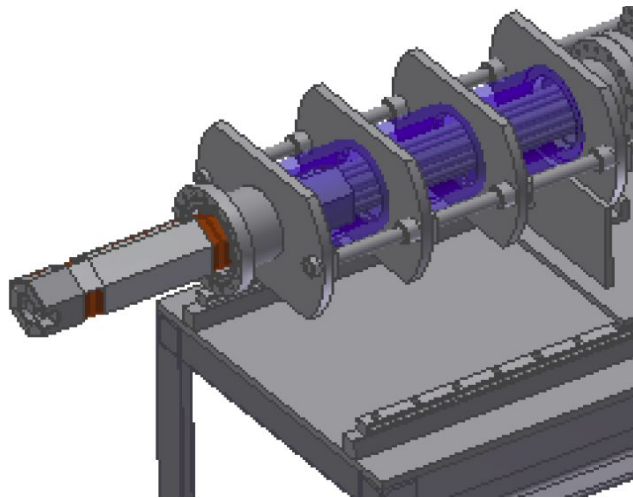
バイアス電極から電圧・電流の摂動を与え、その応答をダイバータープローブで検出する。
スラブ配位、ダイバーター配位 (SOL～セパトリックス)。

バイアス電極 概略図



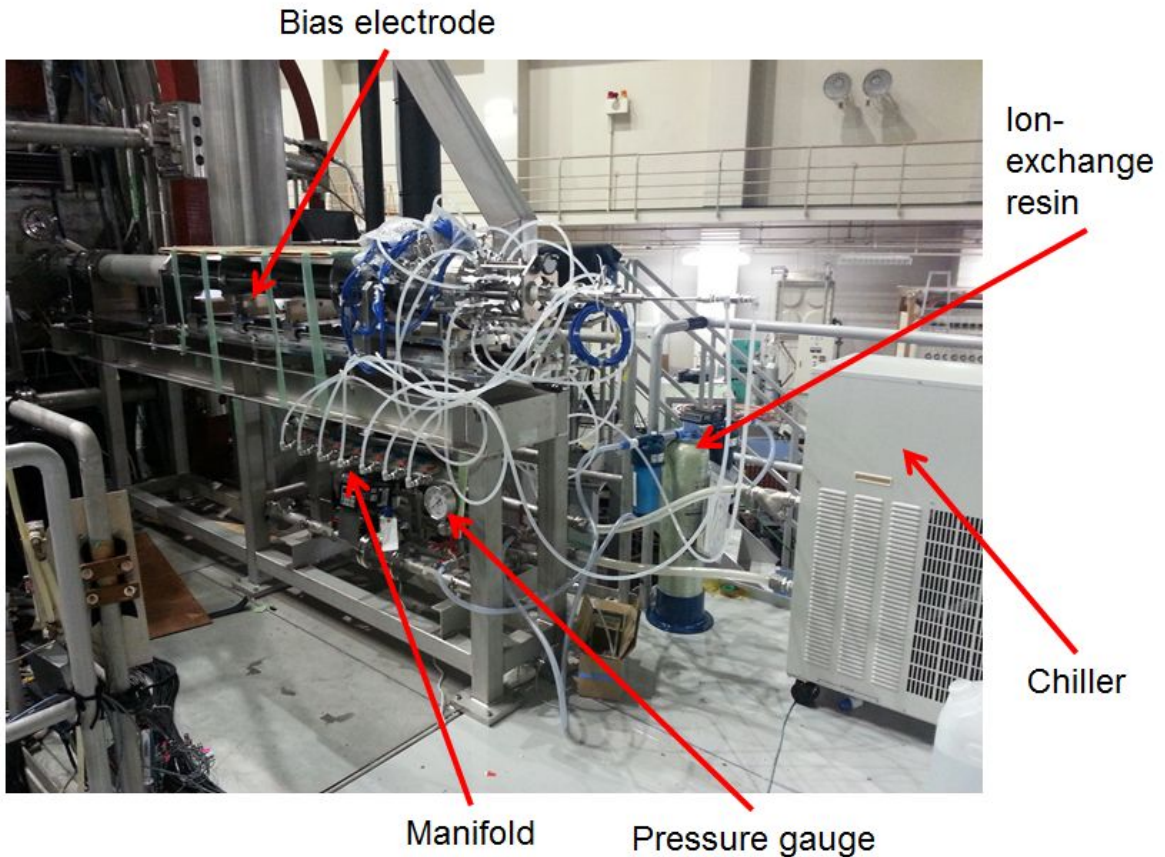
中心電極とシールド電極の2重構造(容器からは絶縁)。

バイアス電極

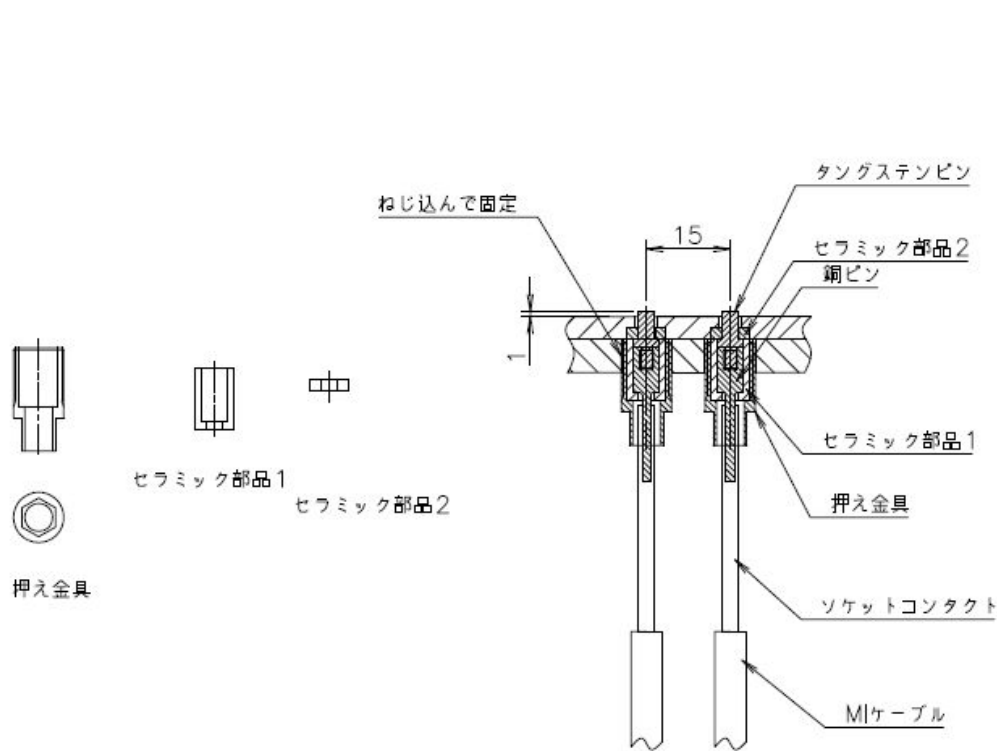


電極先端は切欠き有。回転させて高速電子を阻止できるか。

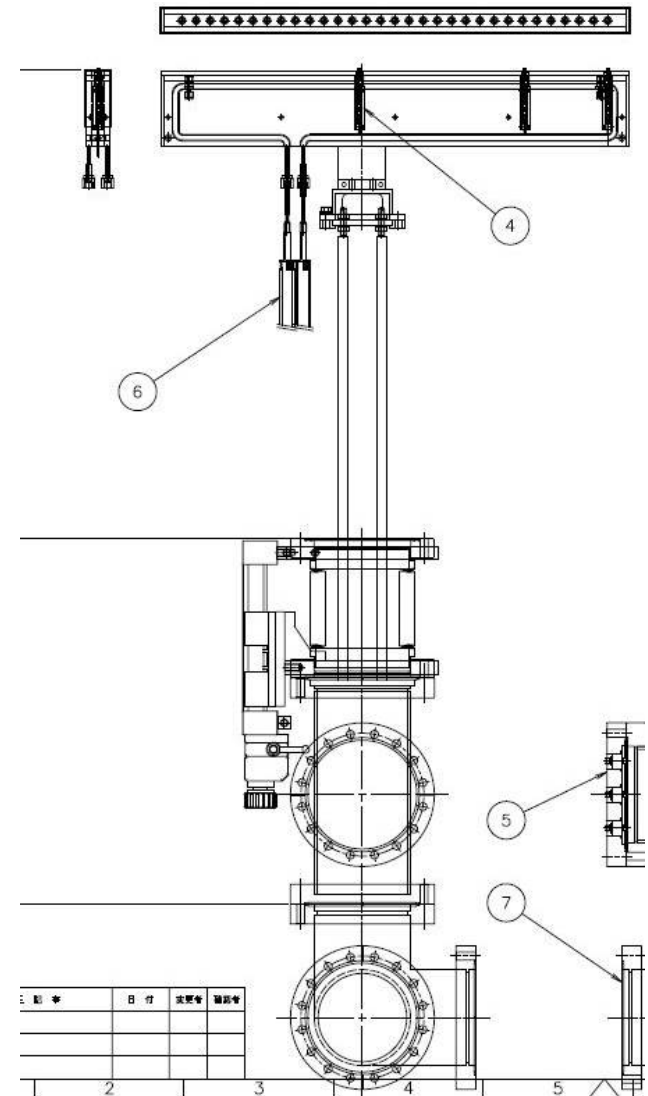
現在は温度モニター系(中心電極、シールド電極が別々、高絶縁耐圧)やバイアス電圧印加系、データ取得系を整備中。



ダイバータープローブ



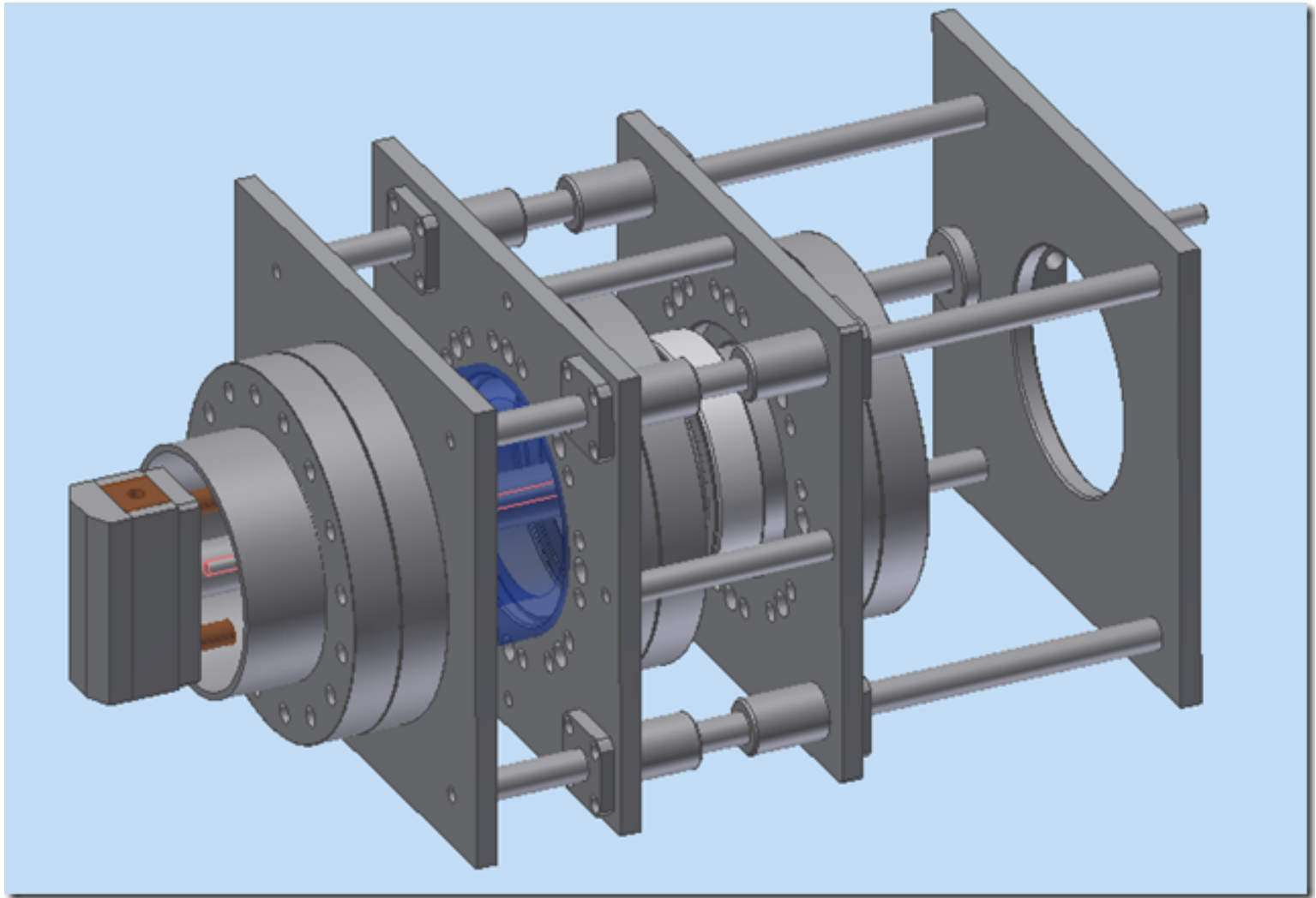
- 近接電極をVV電位で遮蔽 (クロストークを最小に)。
- 電極数は31。
- MIケーブル(SMAコネクタ)。



予備実験

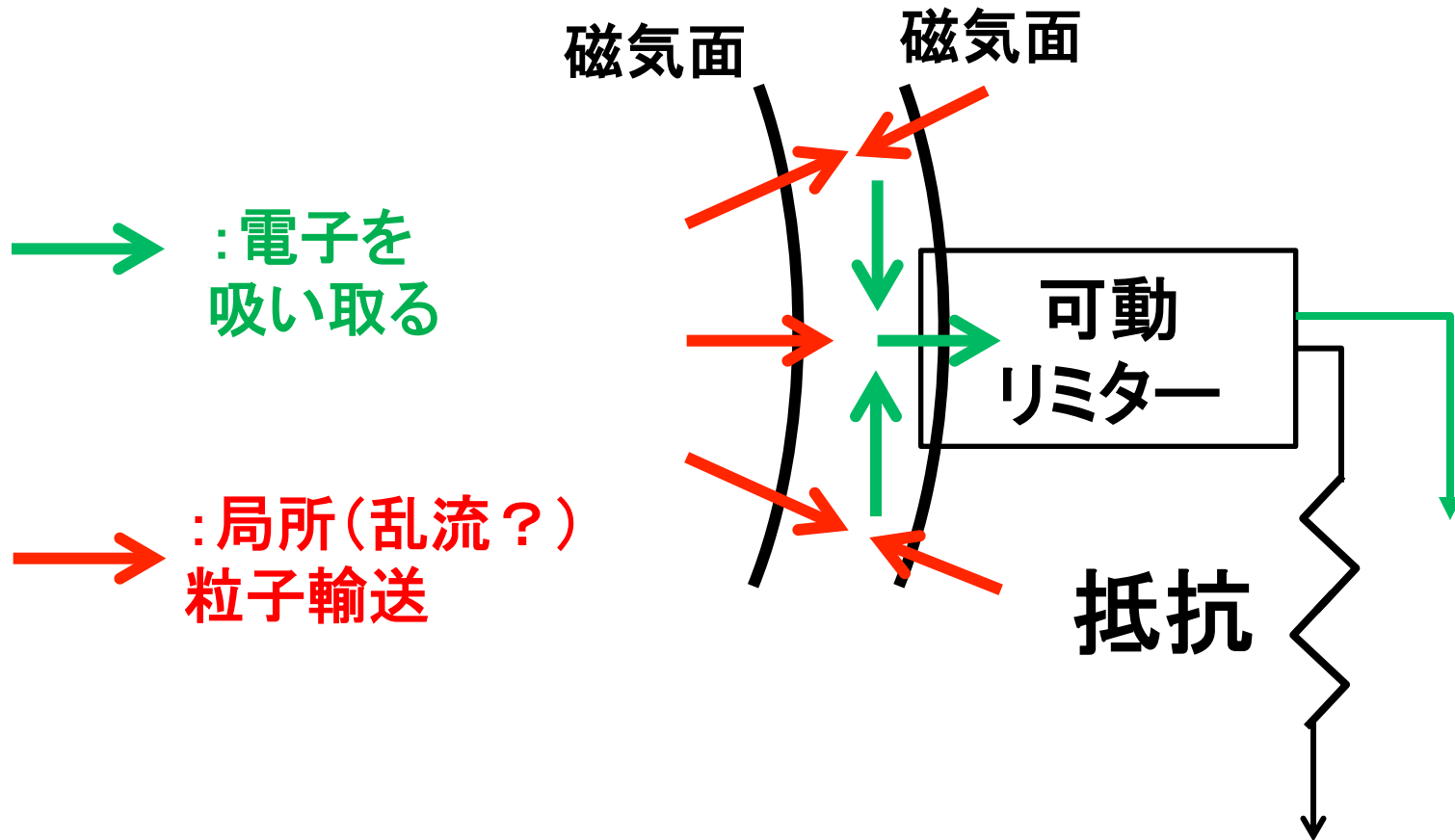
- 可動リミターを使ってテスト的に電流電圧特性を観測し、バイアス電圧と得られる電流値を推定。
- 電源の見積（電流と電圧のスペック、乱流周波数より早く掃引するために、電源のスルーレートを見積もる）。
- これらは、ダイバータープローブによる浮遊電位計測の精度検証の方法としても有用。

テスト実験: Movable limiter



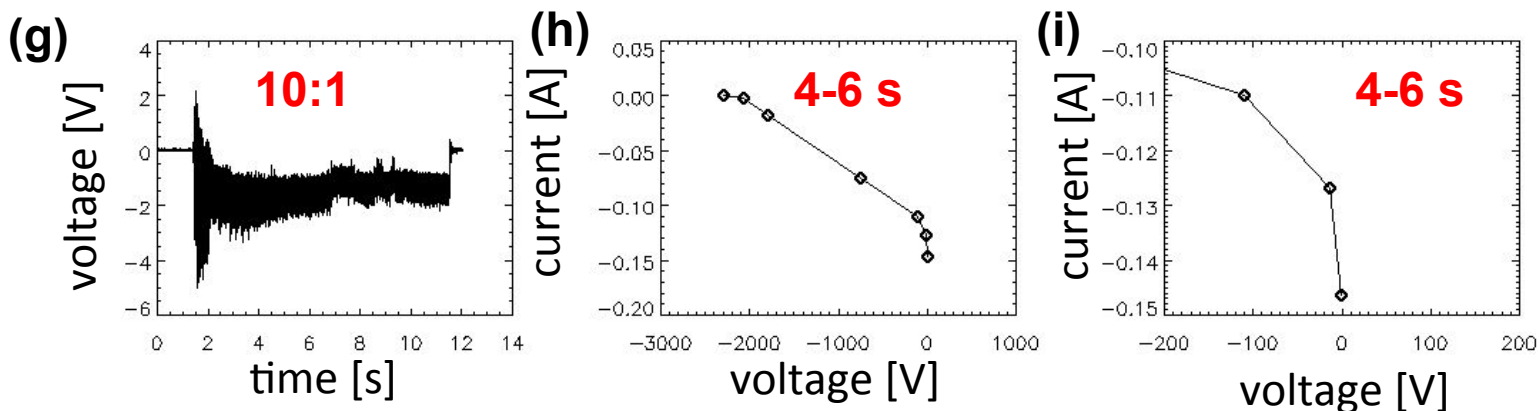
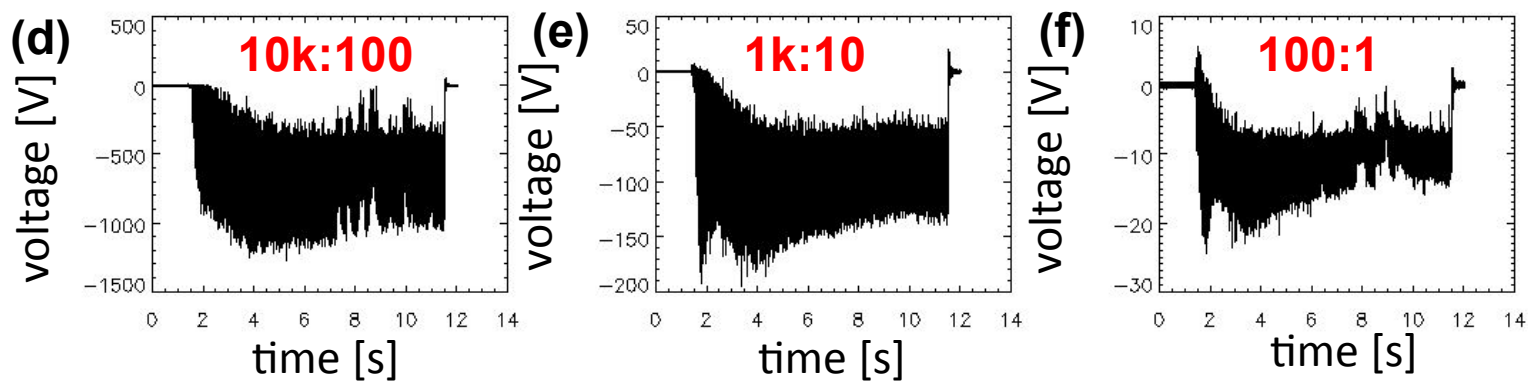
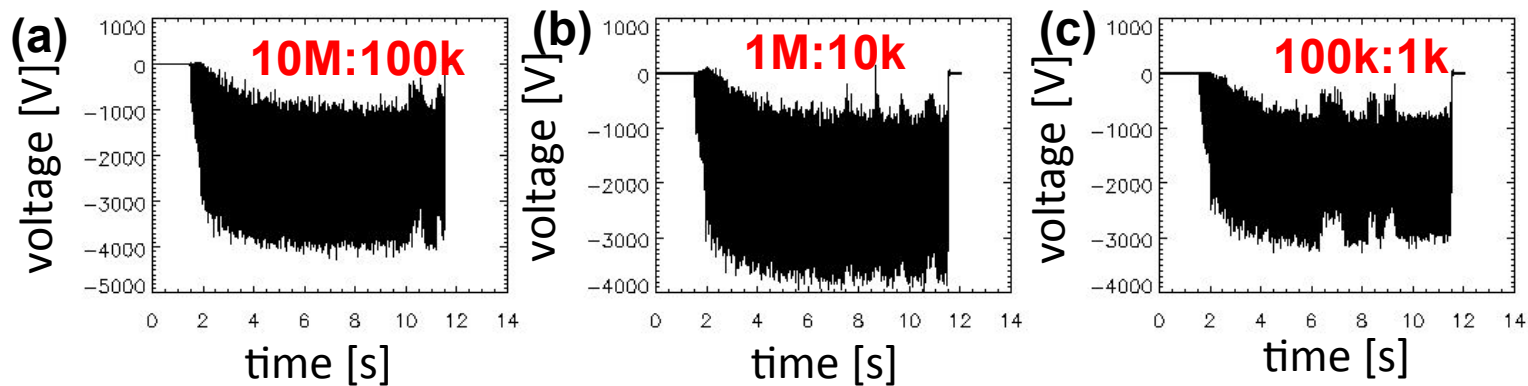
実験では、先端をMo固定リミターより20mm中に入れる

バイアスする前に抵抗を入れる



リミターと真空容器間に抵抗を入れて、電流電圧特性を見る。バイアスできる電圧範囲と、得られる電柱値を見積もる。リミターの電位幅は、浮遊電位～真空容器電位まで(電子を吸い取る向き)。抵抗値は、 $10\text{M}\Omega$, $1\text{M}\Omega$, $100\text{k}\Omega$, $10\text{k}\Omega$, $1\text{k}\Omega$, 100Ω , 10Ω の7つ

波形(全時間)とI-V特性(4~6 s)

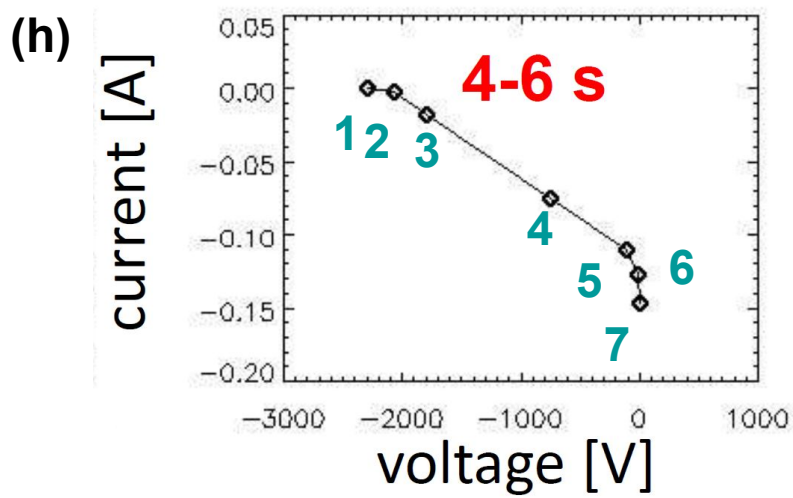
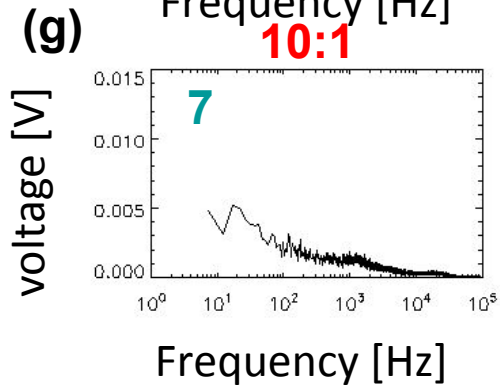
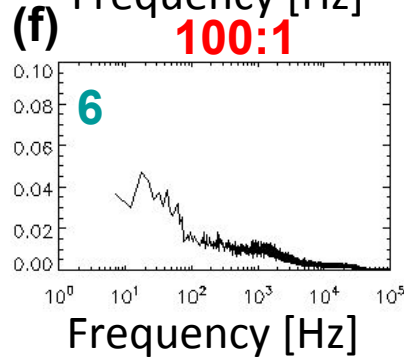
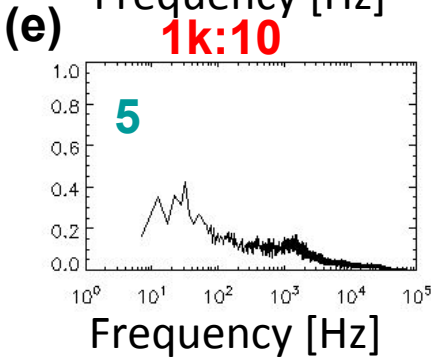
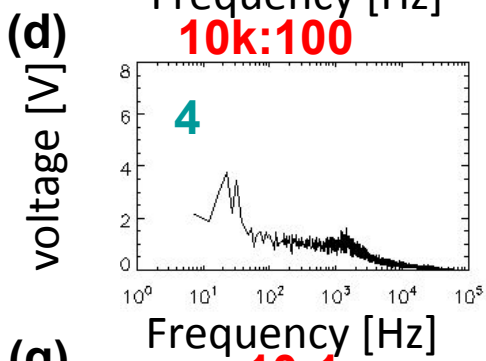
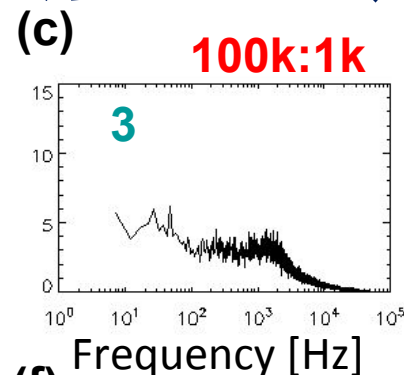
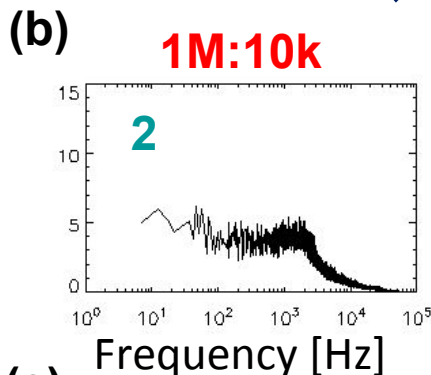
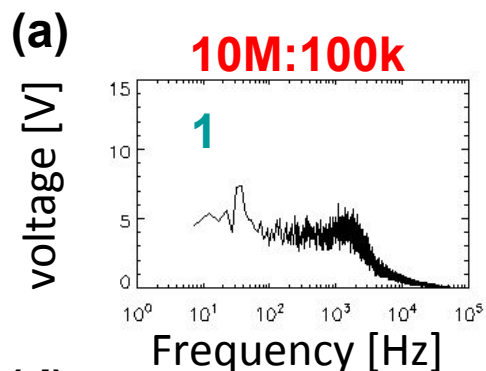


電流電圧特性から読み取れること

- 10M~1M位で浮かせれば、電極電位は浮遊電位に落ち着く。
→しかし、リミターは捕集面積が大きく、シース抵抗 l_{is}/Te は比較的小さい。一方、実際のバイアス電極やプローブは低密度でシース抵抗は大きい可能性。より高抵抗が必要かもしれない。
- 浮遊電位が-3kVと、負に非常に高い。
→バイアス印加時はコンデンサで浮かせる。
- 浮遊電位の揺動成分がかなり大きい。
- 電流・電圧特性が指数関数に乗らず(ただしイオン飽和電流を引かなければ正確な議論はできない。)、単調減少⇒高速電子の影響あり(エネルギーは数keV)。
- 0V付近(抵抗値~100、10 Ω)では、電流の負の増え方が大きい。この辺りからバルク電子がいる?(バルクの温度は1~10eVのオーダー)

Power spectra (窓無FFT)

4-6 s



スペクトルから読み取れること

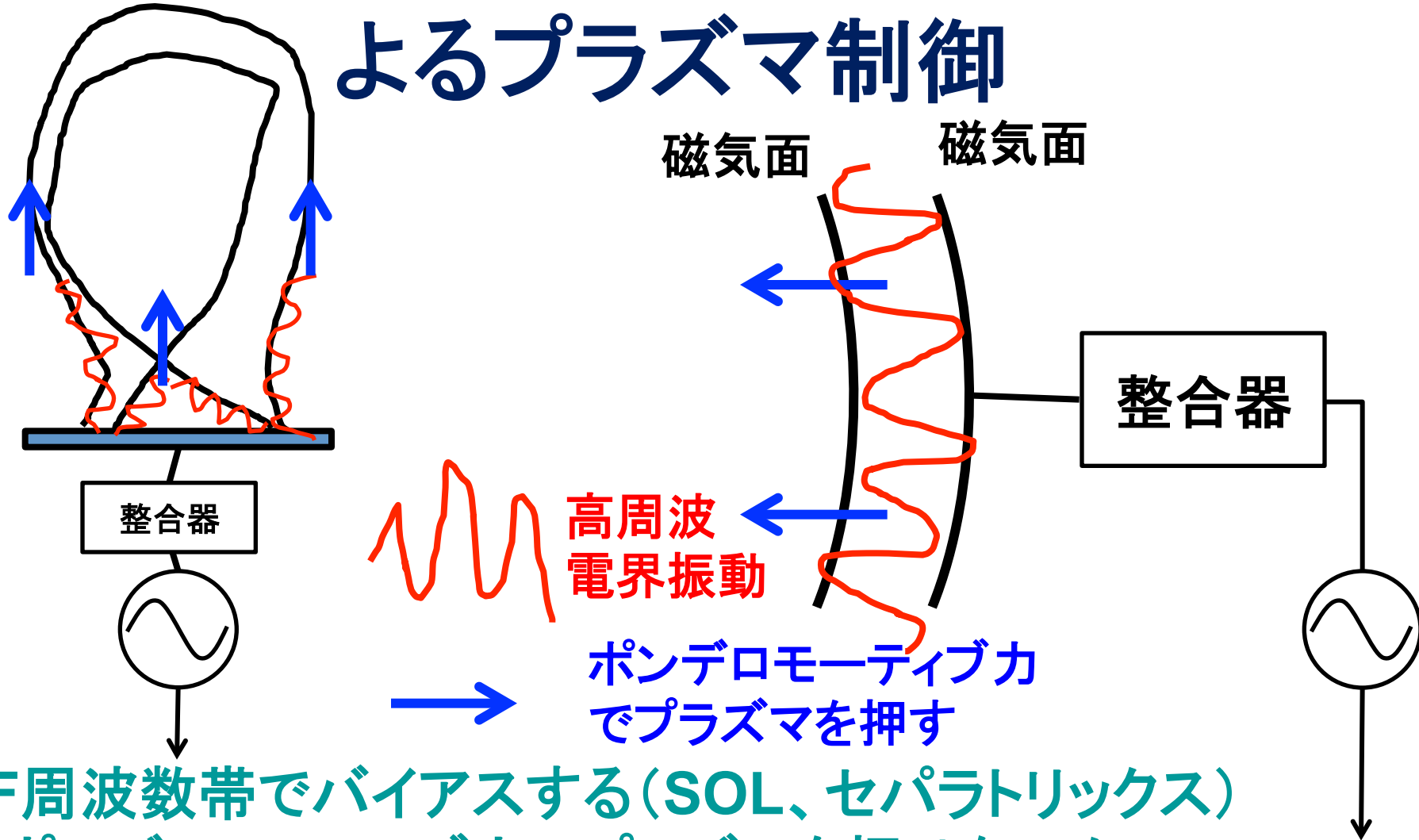
- 20–30Hzあたり(低周波)と、1–2kHzあたり(高周波)にスペクトルピーク。高周波は乱流的。
- リミターは割と大きいですが、それでも揺動が見えるということは、この揺動の波長はこのリミターよりも大きいと思われる。
- 浮遊電位を反映していると思われる信号(抵抗 10M ~100kΩ)では、低周波ははっきりしない。
- I-V特性の中間領域の信号では、解釈が難しいが、低周波が卓越している。
- 磁気揺動などを計測すれば、この揺らぎの正体がわかるかもしれない(磁気揺動による高速電子の輸送?)。

変調周波数は50kHzもあれば、少なくとも同じような放電では対応できそう。

まとめ

- 大域的粒子輸送の研究として、高周波数バイアス実験を提案し、その準備を進めている。
- 直線装置(トカマクでも)の実験では、高周波バイアスによってプラズマの電位の変調自体には成功している。球状トカマク(TST-2)でも変調は見られた(規模は小さめ)。
- バイアス電極や観測器自体の整備は完成している。現在モニター系の整備を行っている。
- 予備実験として、水冷可動リミターを利用して抵抗を変えつつIV特性や揺動パワースペクトルを得た。

別の可能性: 高周波バイアスによるプラズマ制御



RF周波数帯でバイアスする(SOL、セパトリックス)
→ポンデロモーティブカでプラズマを押しえないか。
→ダイバーター板からプラズマをデタッチできる？