

QUESTにおけるトロイダル方向に 分割されたダイバータ板による ダイバータバイアス実験

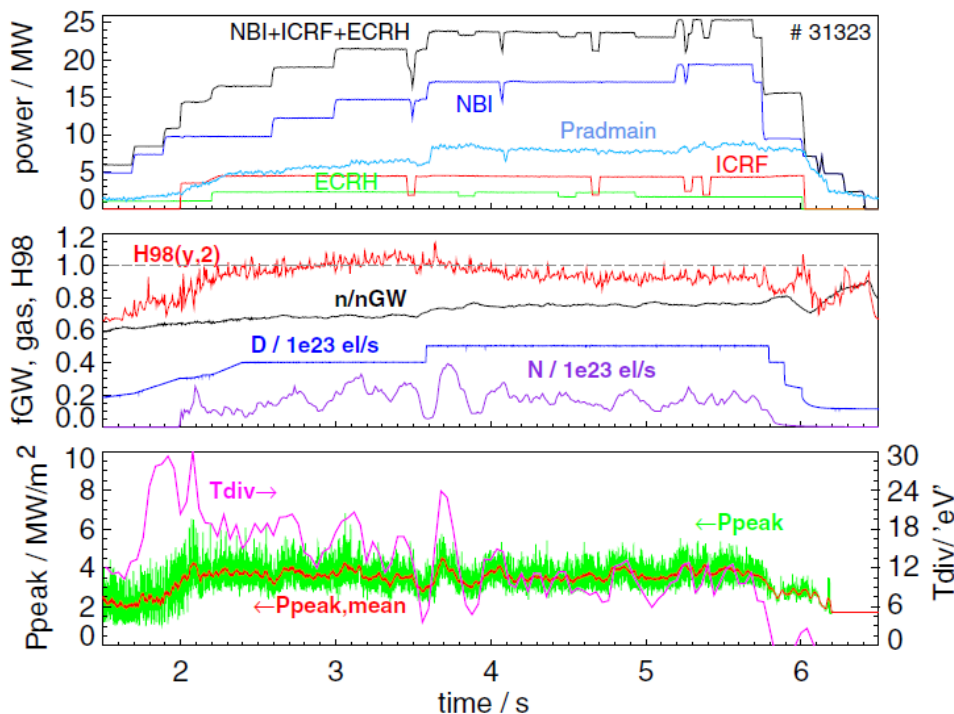
核融合研 名誉教授
東井和夫

研究協力者

恩地拓巳、黒田賢剛、小島信一郎、関子秀樹、長谷川真
池添竜也、出射浩、花田和明、QUEST実験グループ

はじめに(1)

- ITERでの定常熱負荷制御=>非接触ダイバータにより $P_{div\perp} \lesssim 10 \text{ MW/m}^2$
- (課題)高閉じ込め(閉じ込め改善度 $H98y \geq 1$)と非接触ダイバータの両立と定常維持
非接触ダイバータ運転条件下での高性能Hモードの,準定常維持は極めて困難
非接触ダイバータ運転=>Hモード性能の劣化
- (方策)中程度密度($\sim 0.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$)の部分的非接触ダイバータでの λ_q の能動的拡張
“高いHモード性能と高いプラズマ電流駆動効率”が期待される



In AUG, $H98y \sim 1$ is sustained for ~ 2 s and gradually degraded down to ~ 0.9 in the latter half. Long time sustainment of $H98y$ is very challenging under detached divertor condition.

A. Kallenbach et al., NF 2015

In JET, detached divertor in H-mode with $H98y \sim 0.8-0.9$, $n_e/n_{eGW} \sim 0.8$ was maintained for ~ 5 s.

A.R Field et al., PPCF 2017

はじめに (2)

➤ ITERでの過渡的熱負荷制御

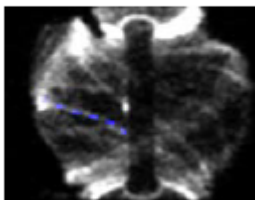
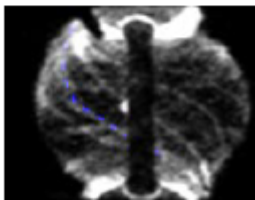
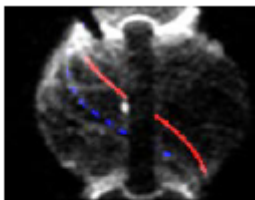
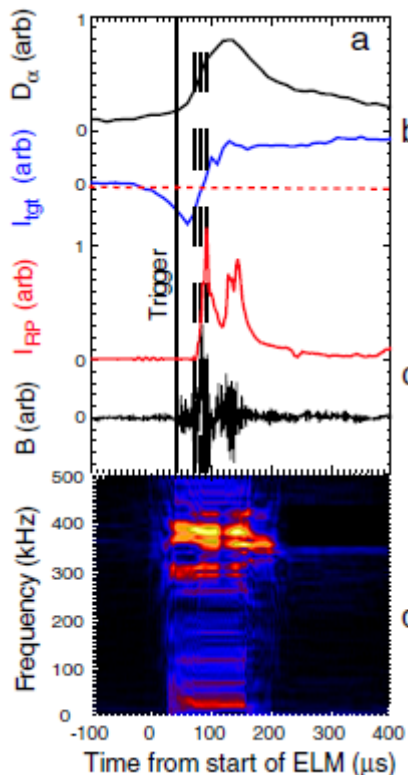
ELM (edge localized modes) 等による過渡的熱負荷許容値: $P_{div\perp} \lesssim 20 \text{ MW/m}^2$

=> ELM抑制 => 3D磁場(RMPsなど) 制御は進展(DIII-D, JET, AUG, LHD...)

ELM自身によるSOL電流生成=> RMP生成とダイバータ熱負荷分布に影響

T. Eich et al., PRL 2003, H. Takahashi et al., PRL 2008, A. Kirk et al., PRL 2006, J.W. Ahn et al., NF 2014.

(課題) ITER以後=> 容器内設置RMPコイルによらない3D擾動磁場生成



ヘリカル構造のELMフィラメントにより生成されるRMPがELMによる過渡的熱負荷分布を変える。

A. Kirk et al., PRL 2006

能動的SOL電流によるRMP生成の可能性を示唆。

本双方向研究の目的

トロイダル方向に分割したダイバータ板による電氣的バイアス方による定常及び過渡的ダイバータ熱流束制御の可能性検証

(目的1)乱流輸送の増大や $E \times B$ ドリフトの増大によるSOI

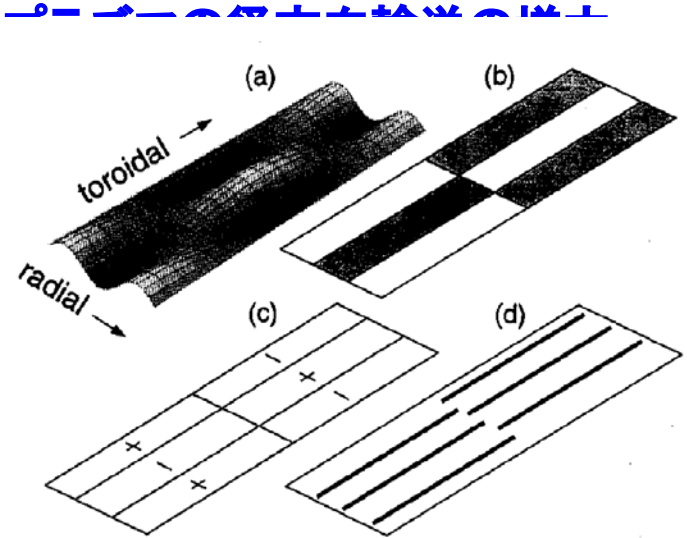
=> 熱流束減衰長 λ_q の増大

駆動乱流の候補 (collisional drift waves, current cor
resistive interchange mode, K-H instabil

関連理論: Toroidally asymmetric divertor biasingに

R.H. Cohen & D.D. Ryutov, PPCF 1997

ダイバータ熱流束分布の径方向の拡張への効果の確認



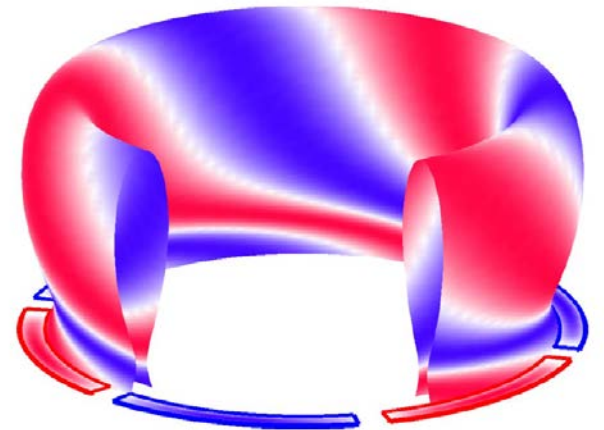
(目的2)位相制御したSOL 電流駆動によるRMP生成とELM

=> ELM制御: $q_{SOL} \sim q_{95}$ なので本質的にRMPとなる

関連理論: toroidally segmented divertor biasingに

I. Joseph et al., PoP 2009, K. Toi, PSI conf. 2016

SOL 電流によるRMP生成の確認と振幅 (b_{min}/B_t) の評価



ダイバータバイアス装置

上側平板ダイバータ板上:4か所 (90° 毎)

Moリミターより2 mm後退

バイアス電圧:真空容器に対し ± 80 V,

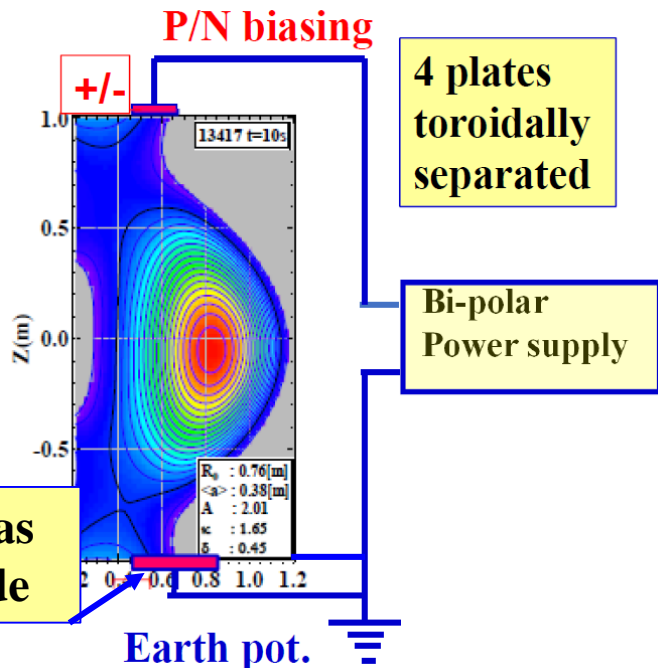
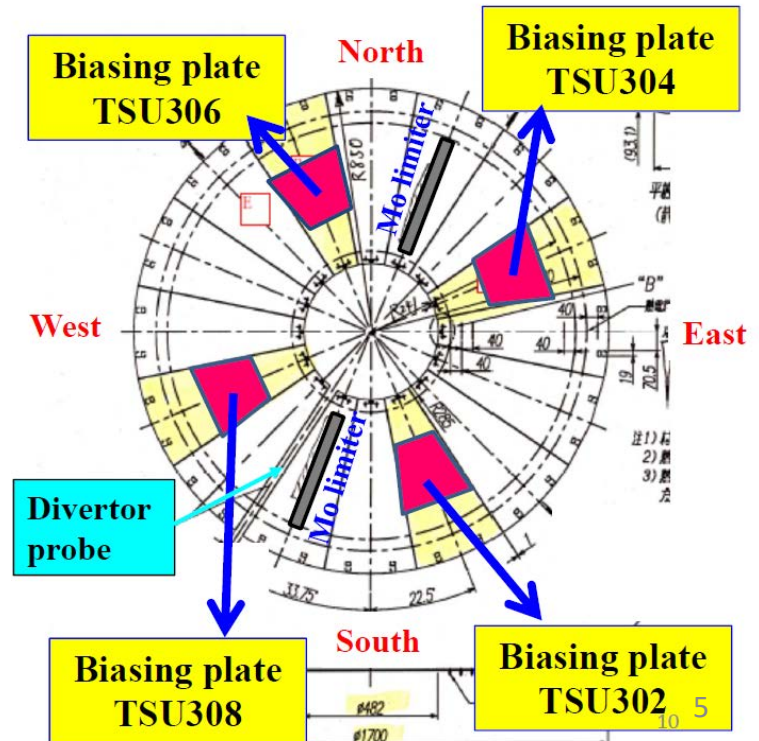
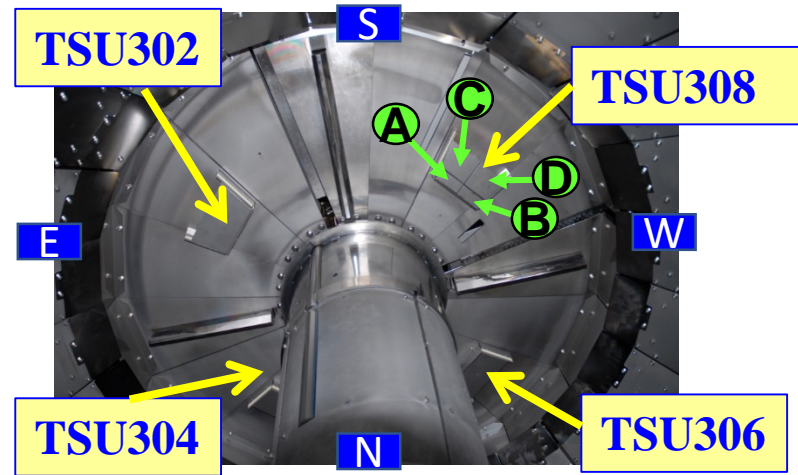
sawtooth波形, 0.1kHz ~ 20 kHz

バイアス板間の位相:0-F-0-F (F: off)等

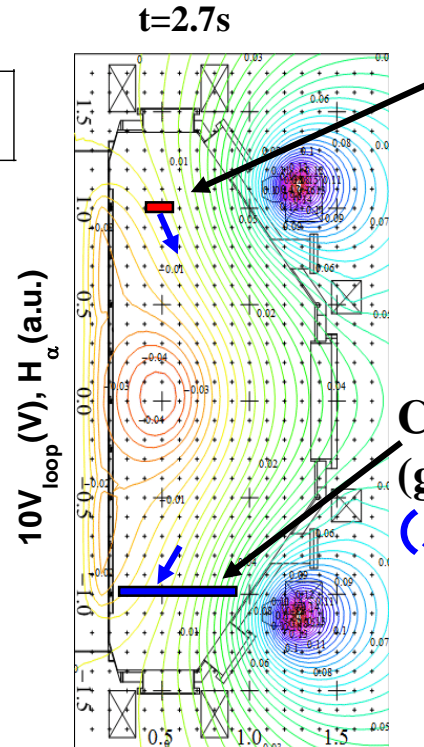
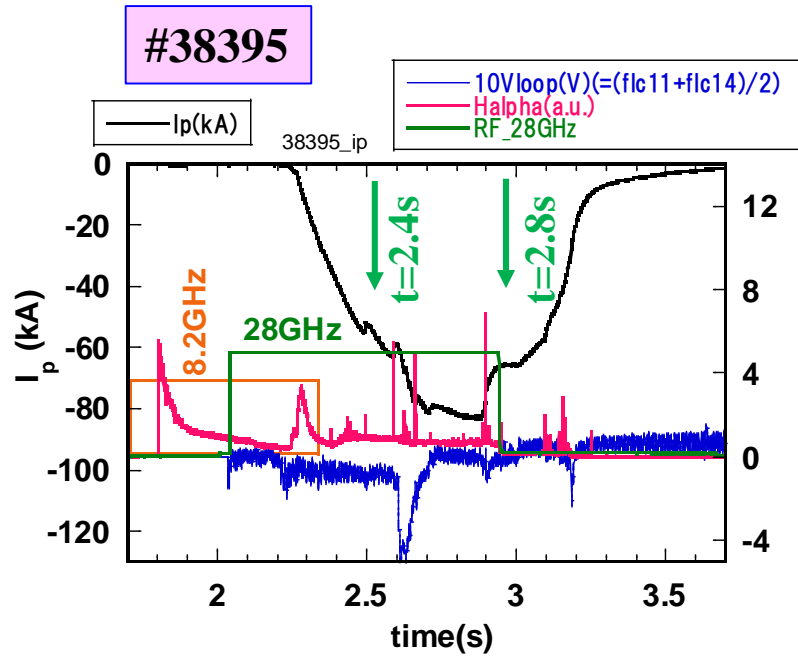
n=0, 1, 2 等の磁場 & 電位擾動

TSU308バイアス板:4分割,

接続磁束管からの漏れ電流計測



(I) D型内側リミター配位での実験



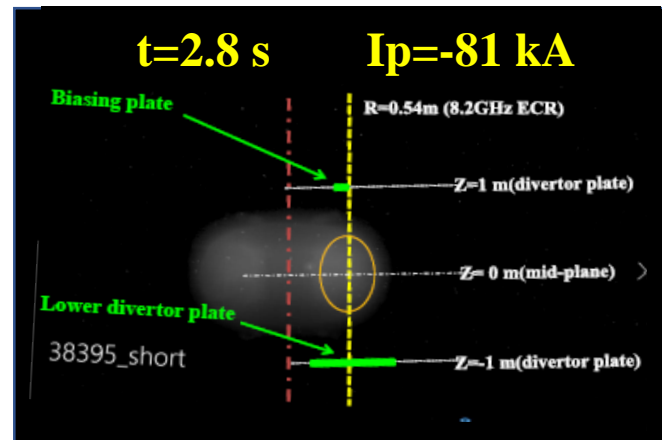
Biasing plate
(4 segments)
(正/負バイアス電圧印加で
駆動される電流=バイアス
駆動電流: $I_{bias}=\sum_i I_i$)

CHI bias electrode
(grounded full ring)
(バイアスにตอบสนองしてトーラスを
 q_{SOL} 回周回しSOL磁力線に
沿って流入/流出する電流
=SOL電流: $I_{SOL}=I_{LDP}$)

$B_t=0.5$ T (28GHz $2 \omega_{ce}$) @ $R=0.32$ m
 $B_t=0.293$ T (8.2 GHz ω_{ce}) @ $R=0.55$ m
 $I_p = -42$ kA @ $t=2.4$ s
 $I_p = -81$ kA @ $t=2.8$ s

Divertor biasing: from $t=0$ s to $t=4$ s

B_t : CW (toroidal drift: downward)
 I_p : CW



MHD平衡の予測:
MHD平衡,
可視光TV画像
から推定

バイアス駆動電流と SOL電流波形

#38395 1kHz sawtooth,
|V|=88 V.
TSU302-306: in-phase

低バイアス電圧 ($|V_{app}| \sim 20$ V) で飽和
=> バイアス板前面はかなり低温

$$T_e \sim 5 - 10 \text{ eV}$$

$$I_{SOL}/I_{bias} = I_{LDP}/(I_{302} + I_{306}) \sim 50-70\%$$

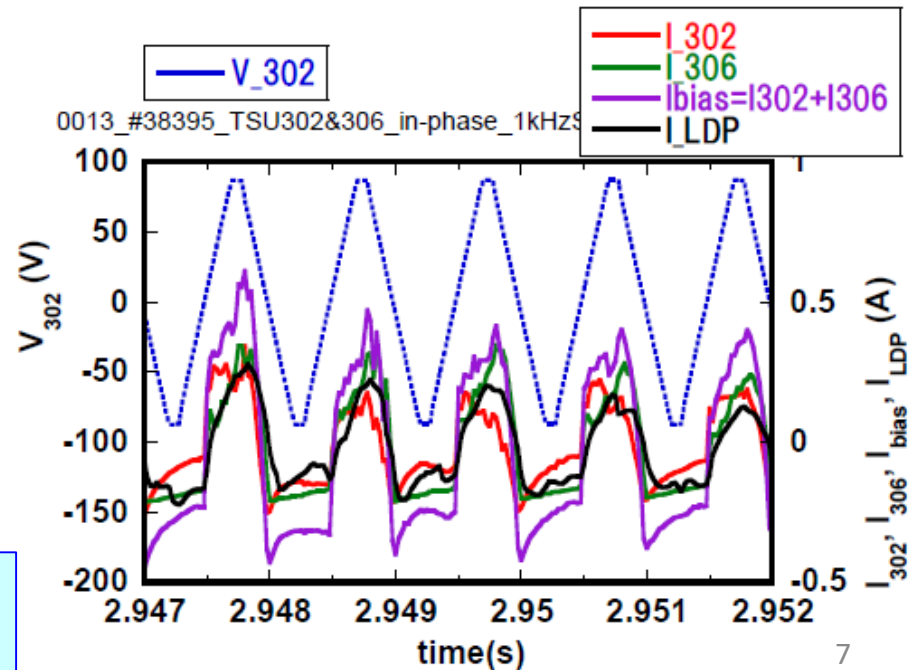
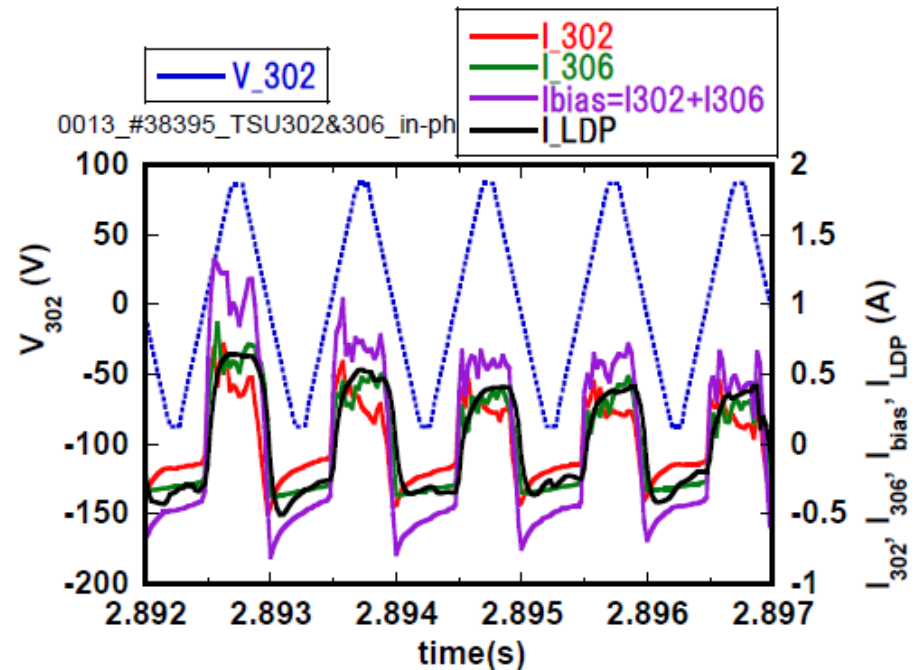
I_{SOL} の rise time ~ 0.2 ms

正バイアス時: I_{bias} の揺動大

負バイアス時: I_{bias} の揺動小

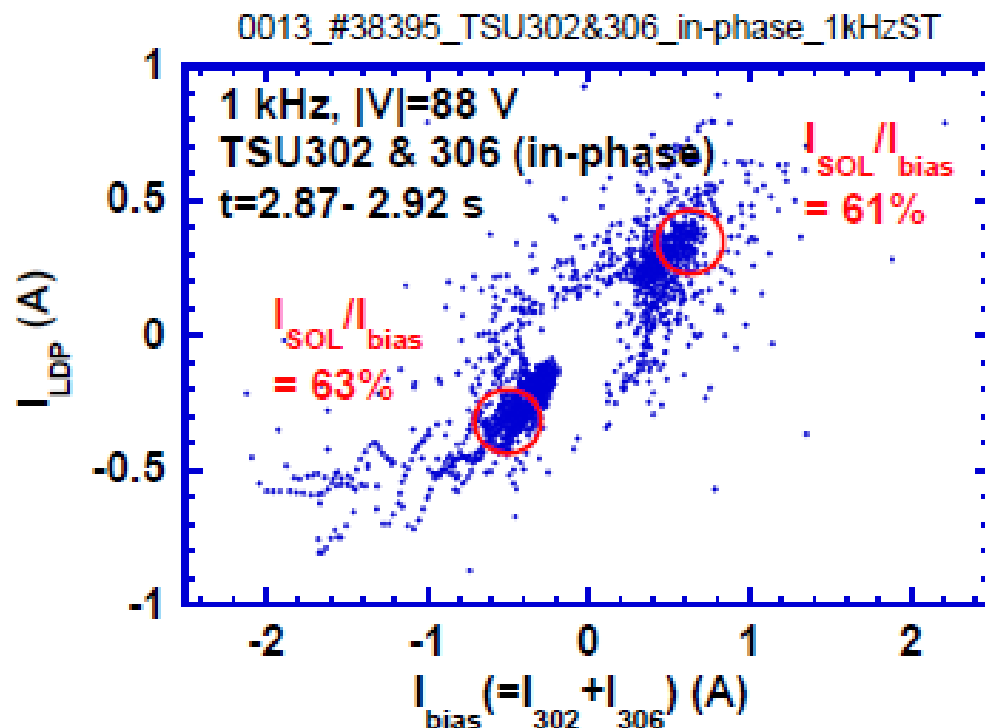
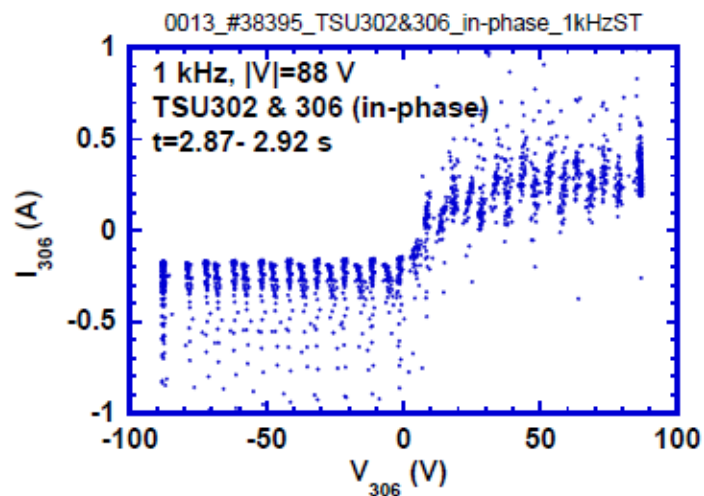
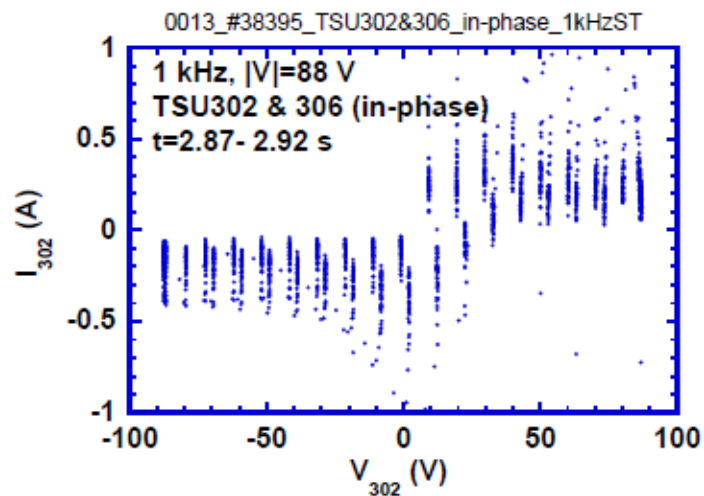
正・負バイアスで I_{SOL} の差異はない

Note: $I_{302}, I_{306} > 0$: flow-out
 $I_{LDP} > 0$: flow-in



バイアス板のV-I特性とSOL電流駆動率

#38395 1 kHz TSU302-306 in-phase
 t=2.87-2.92s , $I_p \sim 81$ kA

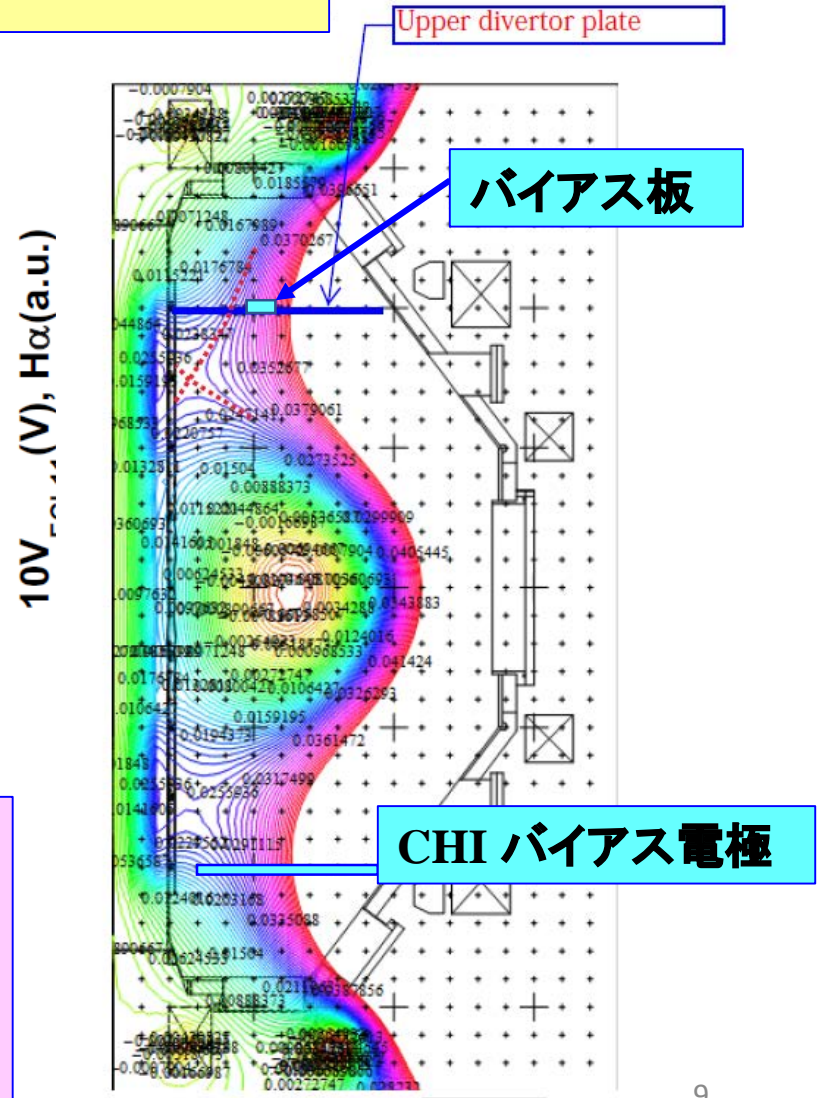
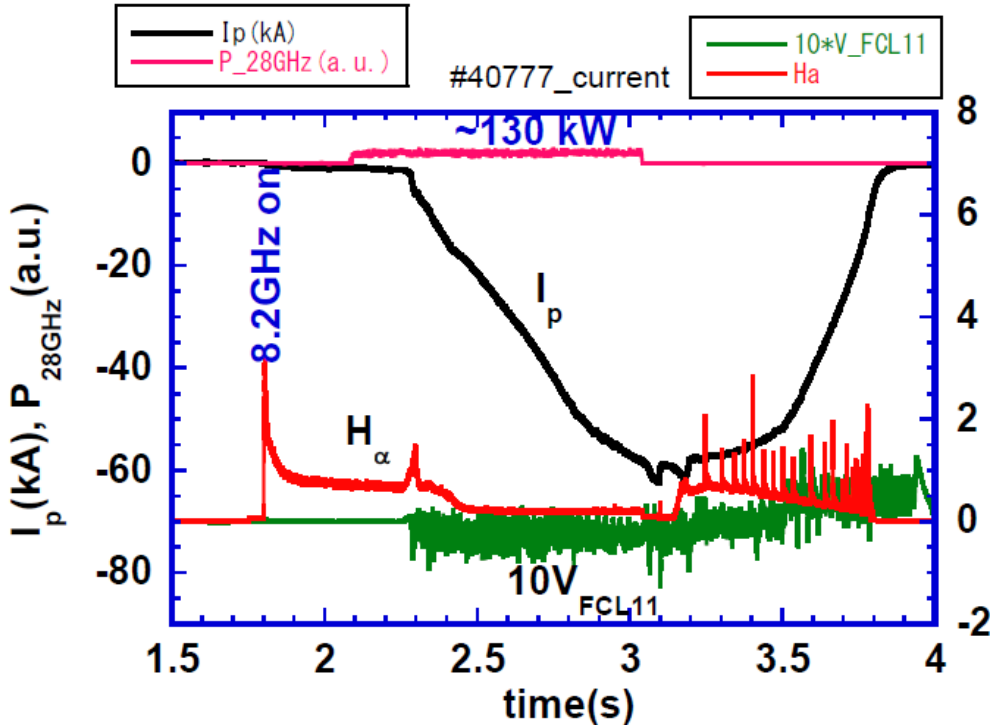


SOL電流駆動効率: $I_{SOL}/I_{bias} \sim 60\%$ ($q_{SOL} \sim 3 - 5$)
SOL電流駆動効率: 正/負バイアスに依存せず
 バイアス駆動電流の漏洩: I_{bias} の $\sim 40\%$ がSOL
 磁力線に対しR,トロイダル及びポロイダル方向に
 漏洩し真空容器へ

(II) 疑似ダブルヌルダイバータ配位

#40777

B_t : CCW (toroidal drift: upward)
 I_p : CW



$B_t = 0.5 \text{ T}$ ($28\text{GHz } 2 \omega_{ce}$) @ $R = 0.32\text{m}$

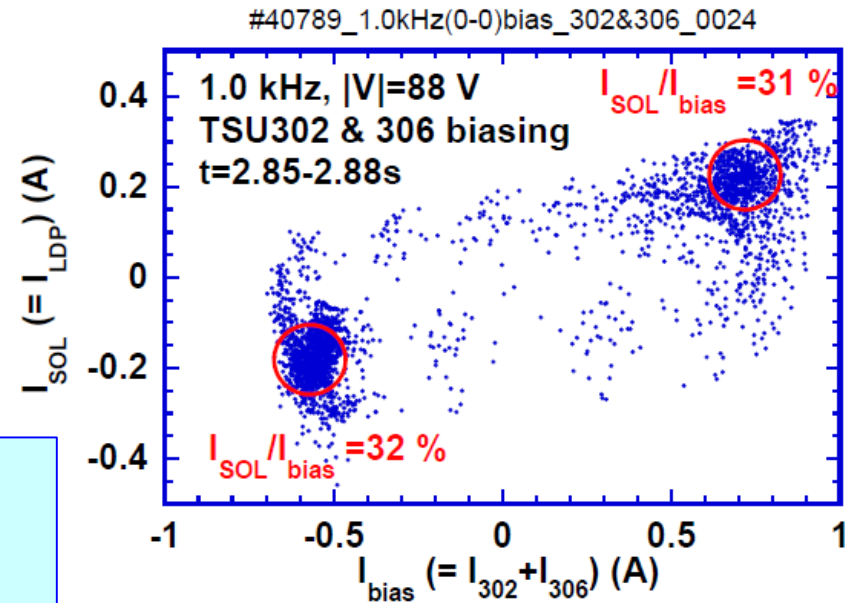
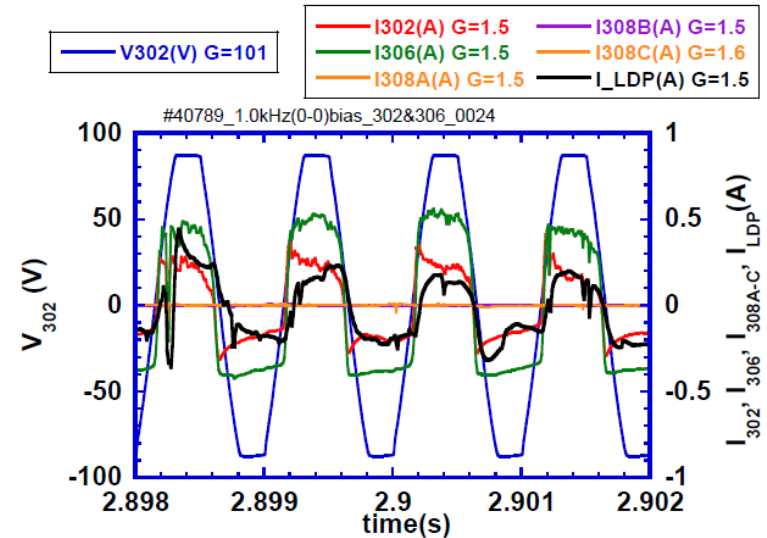
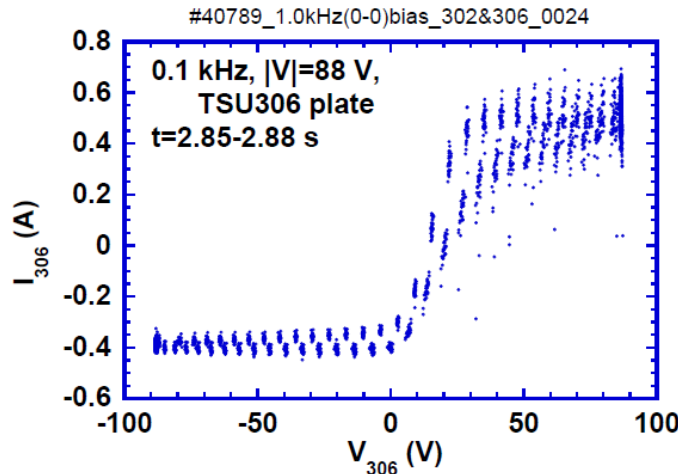
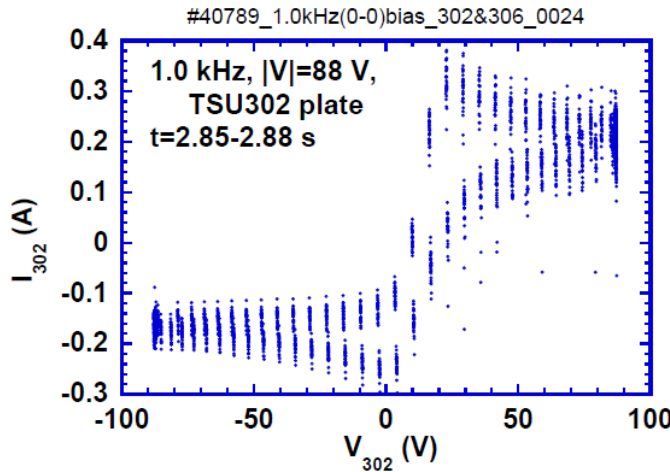
$B_t = 0.293\text{T}$ ($8.2 \text{ GHz } \omega_{ce}$) @ $R = 0.55\text{m}$

$I_p \sim 60 \text{ kA}$ @ $t = 3.0 \text{ s}$

Divertor biasing: from $t = 1.5\text{s}$ to 4.5 s

1kHz バイアス時のSOL電流駆動効率

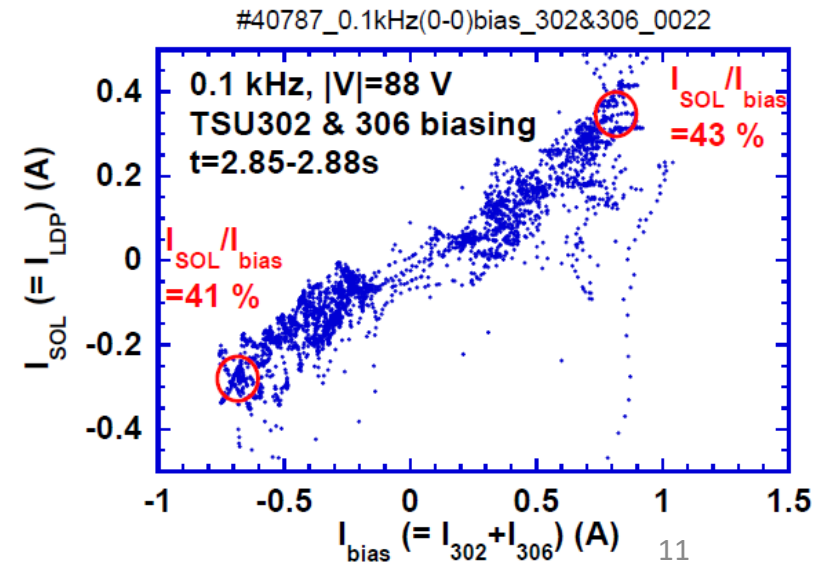
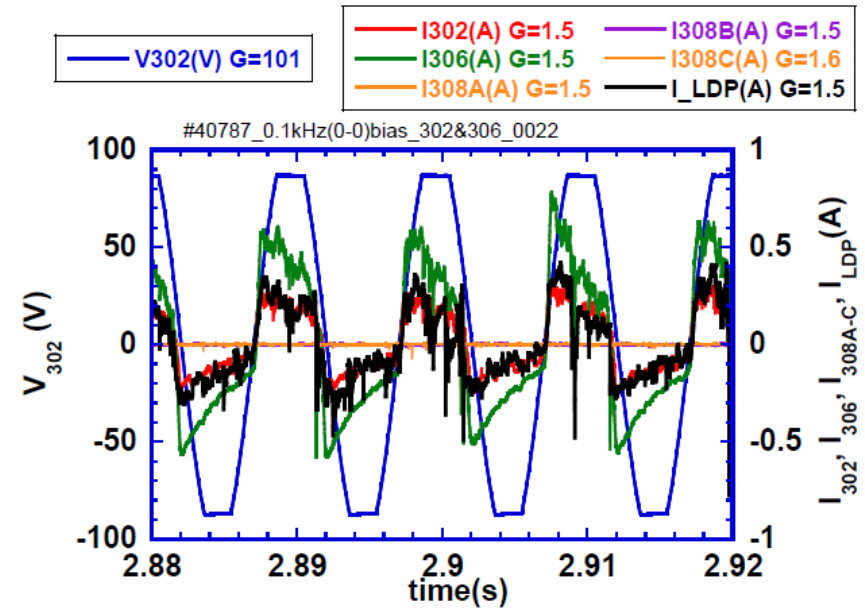
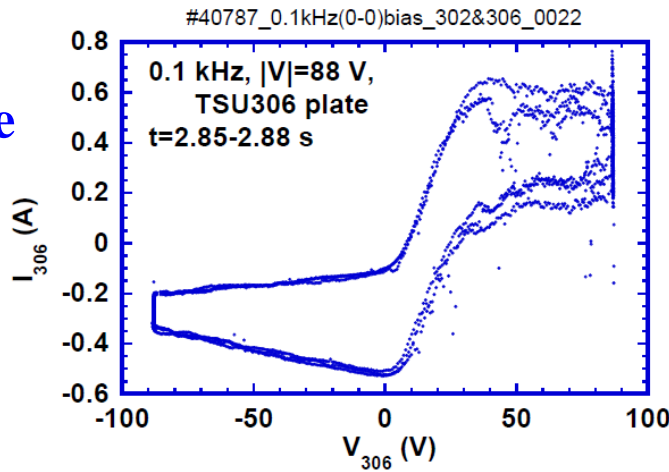
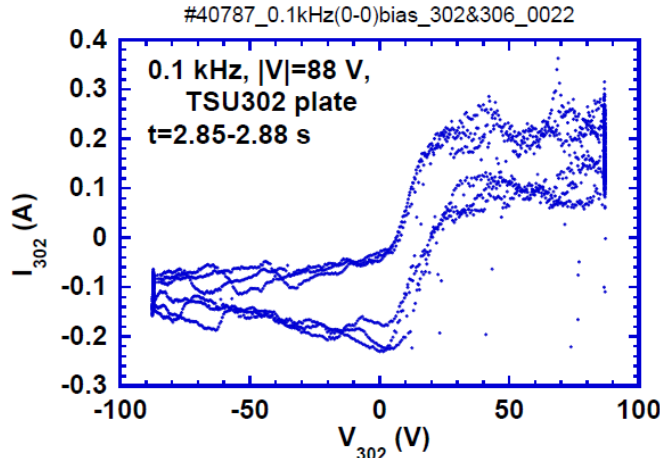
#40789
1.0 kHz
2 plates:
in-phase



- SOL電流駆動率~30%
(やや低い: 磁場配位、SOLプラズマパラメータとその揺動レベルに依存)
- 正バイアス時と負バイアス時でほぼ同じSOL電流駆動率

0.1kHzバイアスバイアス時のSOL電流駆動効率(1)

#40787
0.1kHz
2 plates:
in-phase

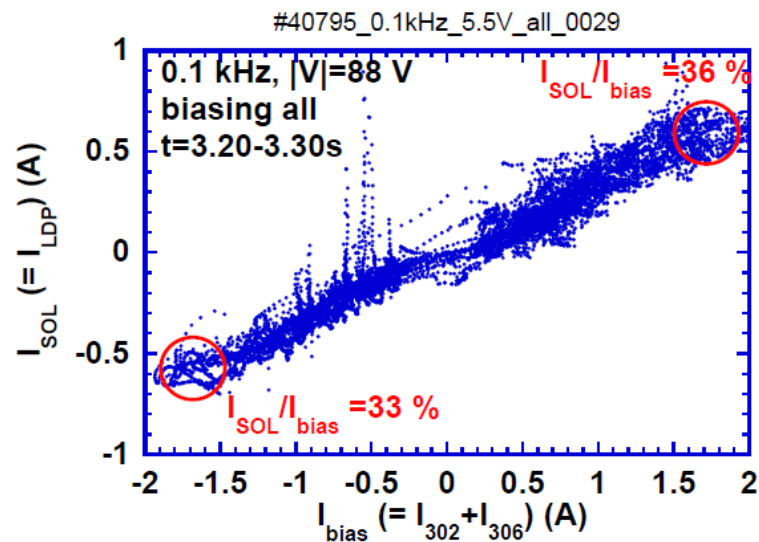
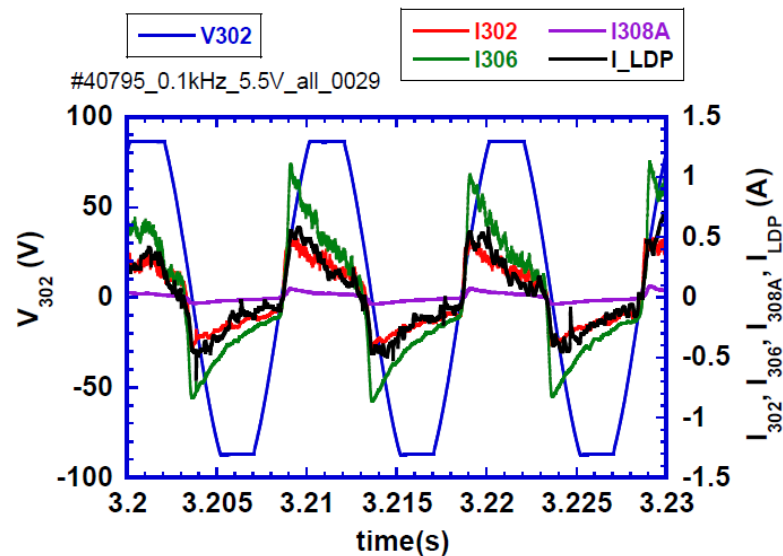
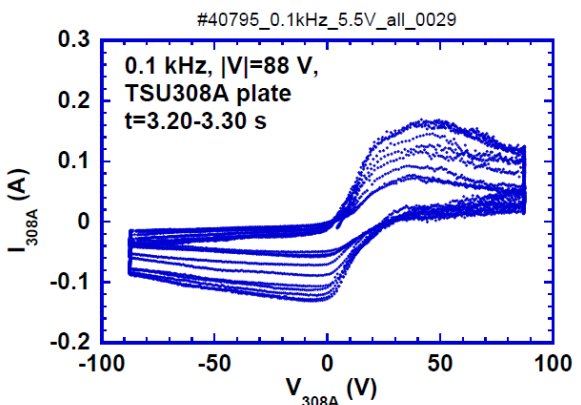
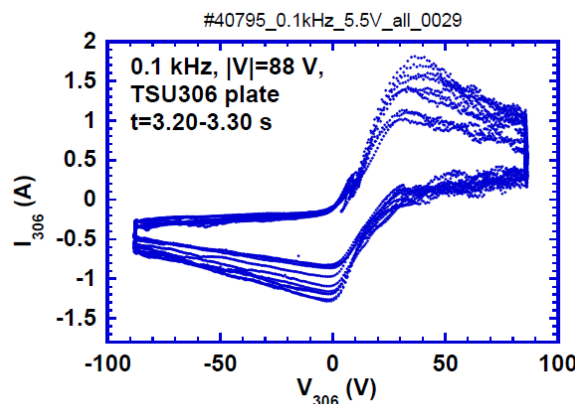
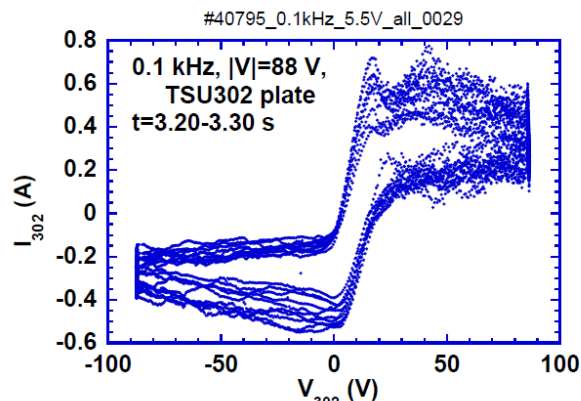


- SOL電流駆動率は正負バイアスに依存せず
- バイアス電圧印加中のバイアス駆動電流低下
バイアス板前面のプラズマの排除？

0.1 kHzバイアス時のSOL電流駆動効率(2) : 高 $\langle n_e \rangle$ プラズマ

#40795
0.1 kHz
With
late gas puff
(high $\langle n_e \rangle$)

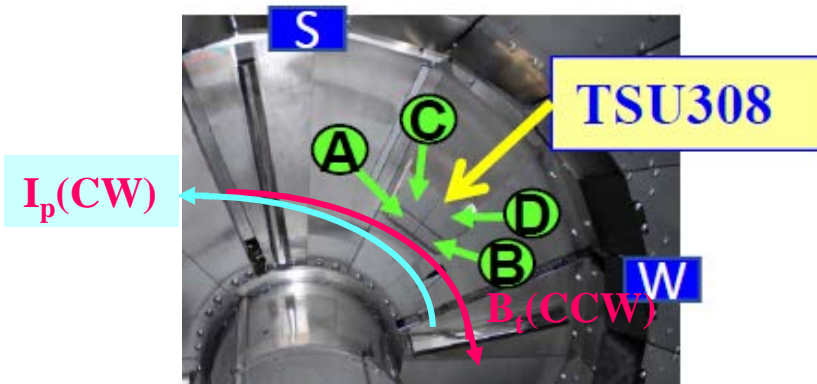
- H2ガスパフ:
駆動電流が1A
に達する(バイ
アス板前面の
電子密度の倍増)
- 低周波電圧印加
中のバイアス駆動
電流の顕著な低下



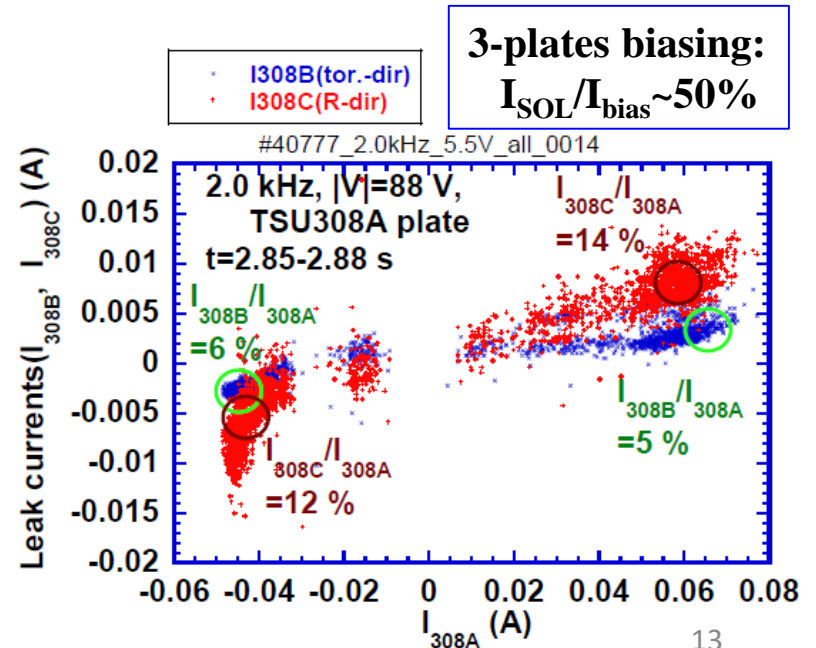
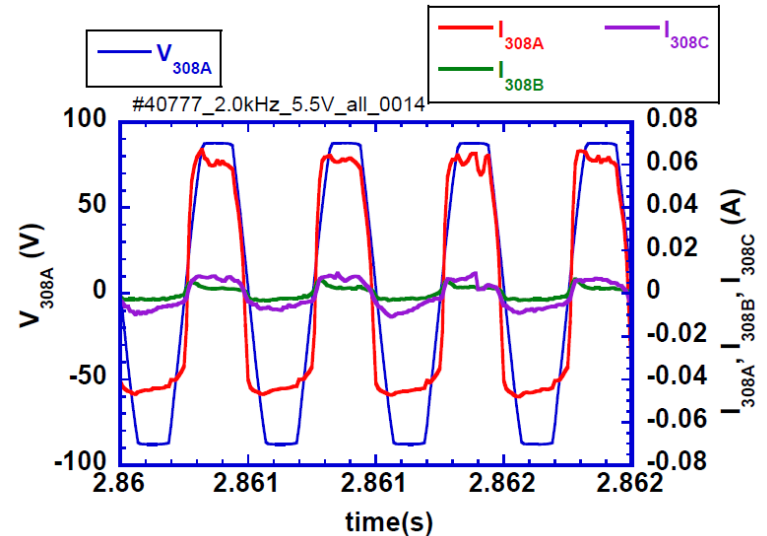
バイアス板に接続した磁束管からの漏れ電流

4分割バイアス板を使用した接続磁力管からのバイアス駆動電流の漏れ

TSU308Aのバイアス電圧印加(2kHz, $|V|=88$ V)し隣接する分割バイアス板 (TSU308B, TSU308C)への流入電流測定
I308B: トロイダル方向の漏洩電流
I308C: R方向の漏洩電流

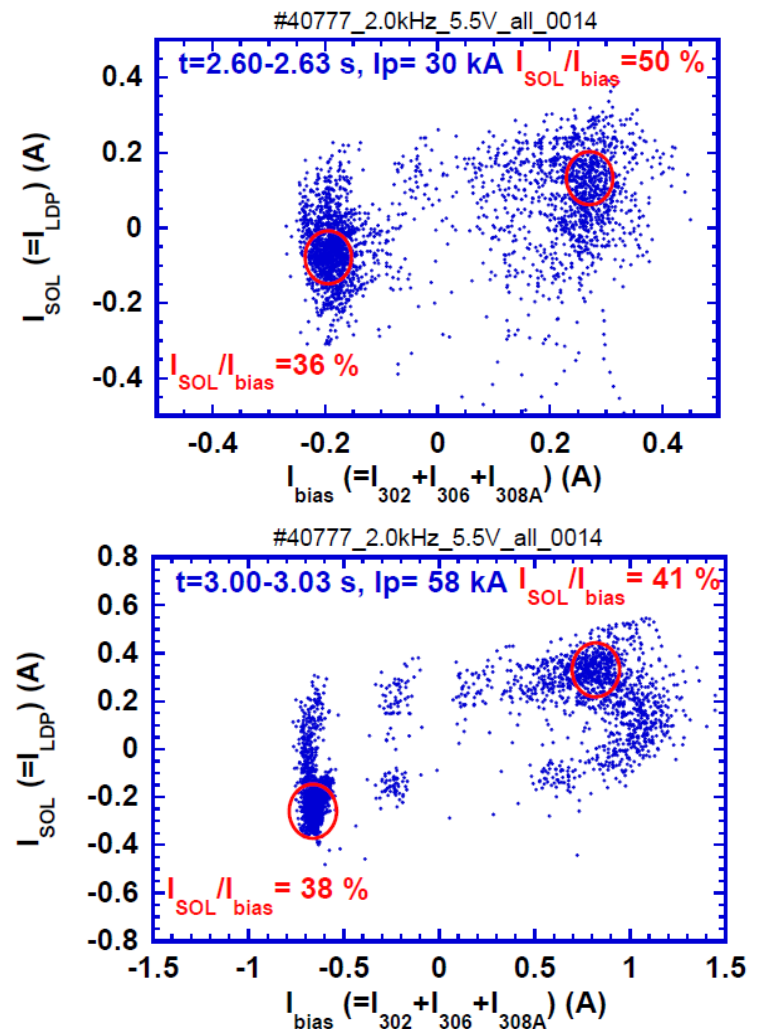
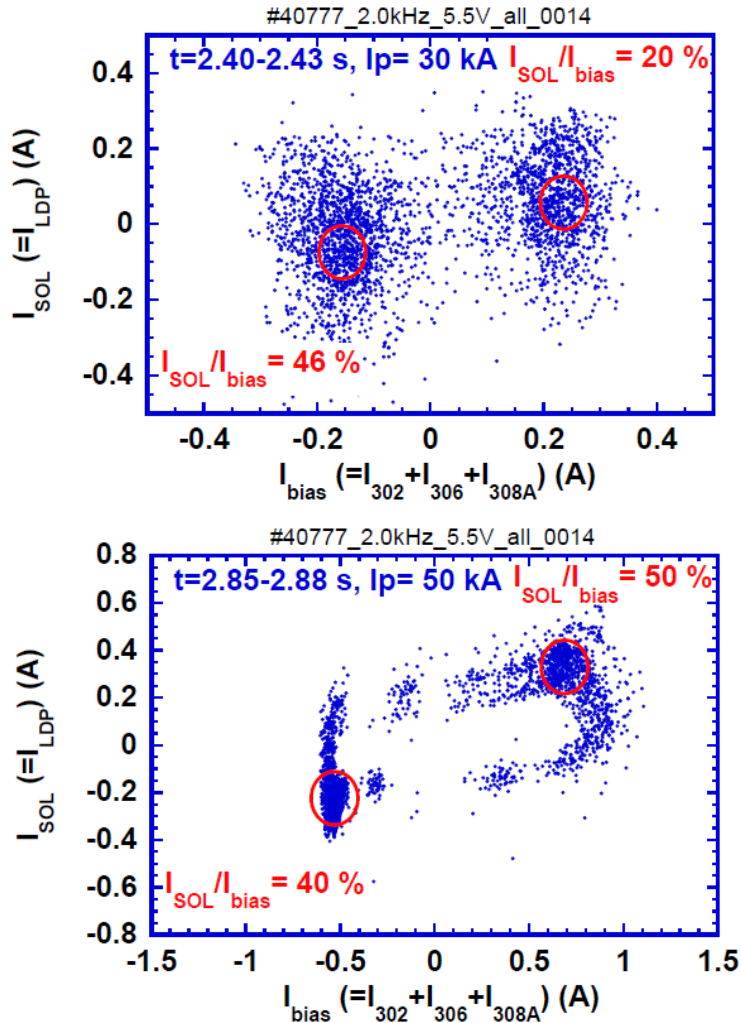


$I_{308B}(\text{tor. dir.}): I_{308C}(\text{R-dir.}) = 1 : (2 \sim 3)$
 $I_{308B}, I_{308C} \Rightarrow$ アース電位の真空容器へ損失。
 下側ダイバータ板の流入/流失電流への寄与は十分小さいだろう。



SOL電流駆動効率の I_p 依存性

#40777
2.0 kHz
3-plates:
in-phase

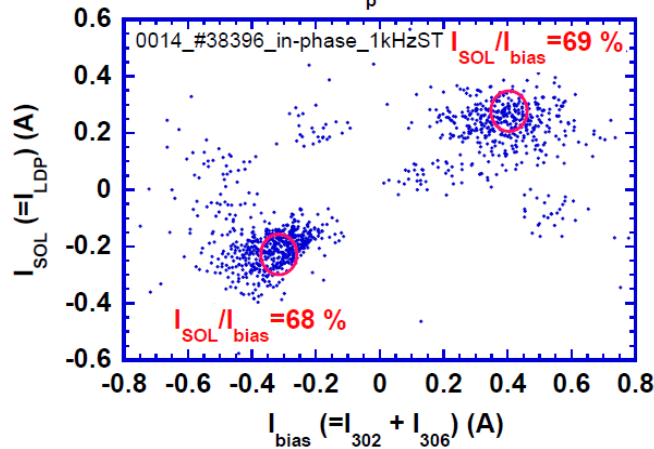


SOL電流駆動効率: $I_p < 20$ kAで I_{SOL}/I_{bias} が小さく($< 20\%$)なるが $I_p > 30$ kAでは明確な差異なし。差異はSOLプラズマパラメータと配位の時間変化?

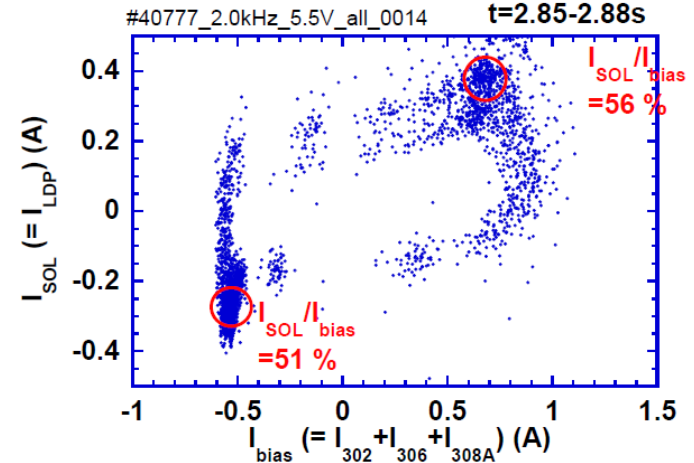
(注) $I_{SOL}/I_{bias} \sim 10-20\%$: 8.2GHz 実験(2016 Nov.)の低 I_p (~ 5 kA)プラズマ where $q_{SOL} \sim 20-30$

SOL電流駆動効率のバイアス電圧周波数に対する依存性

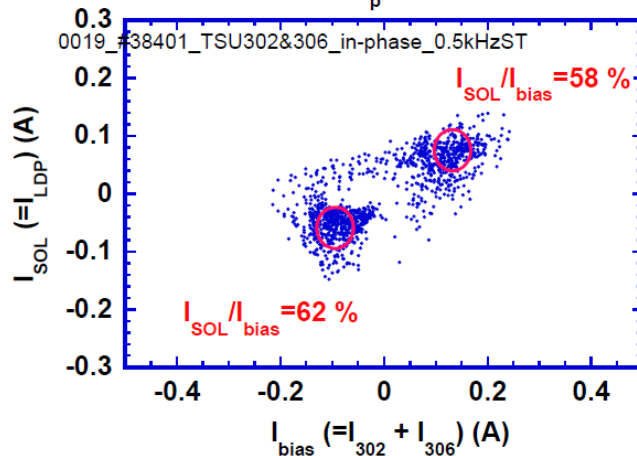
#38396 1kHz
TSU302+TSU306 (in-phase)
t=2.80-2.83 s ($I_p = 81$ kA)



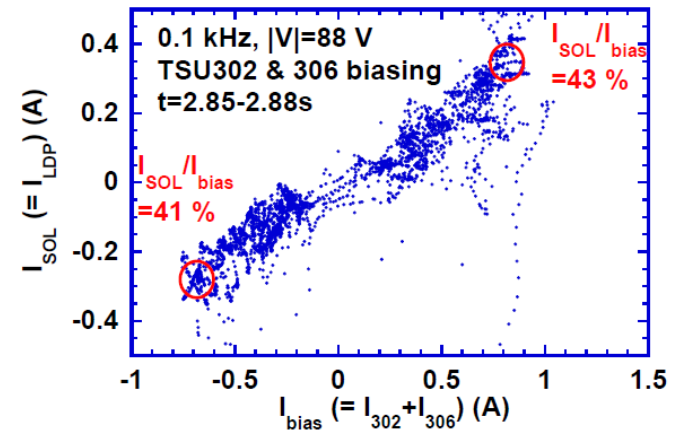
2.0 kHz, $|V|=88$ V
TSU302, 306 & 308A biasing



#38401 0.5kHz
TSU302+TSU306 (in-phase)
t=2.80-2.83 s ($I_p = 81$ kA)



#40787_0.1kHz(0-0)bias_302&306_0022



SOL電流駆動効率の周波数依存性は0.1 kHz ~ 2 kHzの範囲ではみられない。
SOL電流の大きさも0.1 kHz ~ 2 kHzの範囲では明確な違いはみられない

正・負バイアス時のSOL電流駆動率の比較

SOL 電流路長

Collisionless SOL : $A_{\parallel}\Gamma_{\parallel} + A_{\perp}\Gamma_{\perp}=0$ (\leq “Large area Langmuir probe”)

$$A_{\parallel}=dh ; A_{\perp}=2(d+h)L_{\parallel f}; \Gamma_{\parallel}=\frac{1}{4}n v_{\parallel}; \Gamma_{\perp}=-D_{\perp}\nabla n$$

$$\Rightarrow L_{\parallel j f} = \frac{d^2 h v_{\parallel j}}{8(d+h)D_{\perp j}} \quad \text{where } j=\text{“electron” or “ion”}$$

Collisional SOL: $L_{\parallel ec}$ for electrons; $L_{\parallel ic}$ for ions

$$L_{\parallel ec} = \sqrt{\lambda_e L_{\parallel ef}}, \quad L_{\parallel ic} = \sqrt{\lambda_i L_{\parallel if}}, \quad \text{where } \lambda_e = \lambda_i : \text{mean free path}$$

S.A. Cohen, JNM 1978;

P.C. Stangeby, JPD 1985

Connection length in the SOL: $L_c \sim 2\pi R q_{SOL}$

In SOL plasma of QUEST: $T_e \sim 10\text{-}20$ eV, $n_e \sim 5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, $q_{SOL} \sim 4$, $D_{\perp} = D_B \sim 2 \text{ m}^2/\text{s}$

$$L_c = 2\pi R q_{SOL} \sim 16 \text{ m}, \quad \lambda_{ei} = \lambda_e = \lambda_i \sim 20 \text{ m} \gtrsim L_c \Rightarrow L_{\parallel ec} \sim L_{\parallel ef} = 18 \text{ m} < L_c$$

正・負バイアスでSOL電流の差異なし

\Rightarrow SOLの磁場を横切る輸送について興味深い結果を示唆

上の簡単な見積もりから $L_{\parallel f_{el}} \sim L_{\parallel f_{ion}}$

$$\Rightarrow \frac{v_{\parallel e}}{D_{\perp e}} \sim \frac{v_{\parallel i}}{D_{\perp i}} \Rightarrow \frac{D_{\perp i}}{D_{\perp e}} \sim \frac{v_{\parallel i}}{v_{\parallel e}} \sim \sqrt{\frac{T_i m_e}{T_e m_i}} \ll 1 \quad (D_{icl} \ll D_{\perp i} \ll D_{\perp e} \sim D_B)$$

SOL中では $D_{\perp i} \ll D_{\perp e} \sim D_B$ と予想される。

(A. Loarte et al., ITER tokamak basis chap.4, NF 2007.)

まとめ

内側リミターと擬似的ダブルヌルダイバータ配位でトロイダル方向に分割したダイバータ板によるバイアス実験を行った。

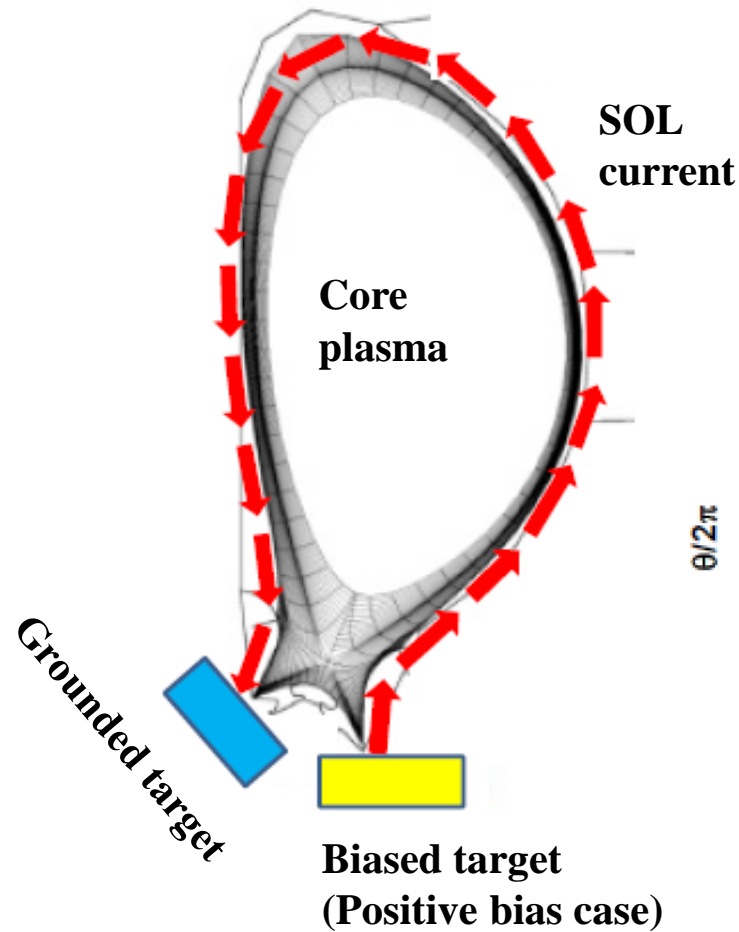
- ◆ SOL電流駆動効率($=I_{SOL}/I_{bias}$)：最大70%
- ◆ 小分割されたバイアス板による接続磁束管からの漏れ電流計測：
R方向の漏れ電流～10 %、トロイダル方向の漏れ電流：～5 %
- ◆ 正バイアスと負バイアスでのバイアス駆動電流の比は～2以下：
バイアス板とSOL磁力線のなす角度が小さい(～4°)。
- ◆ 正バイアスと負バイアスでSOL電流駆動効率に差異はない。
バイアス駆動電流の～60 %がSOL電流生成に寄与
=> SOL中での上下ダイバータ間の電流路形成 ($L_{||e} \sim L_{||i} > L_c = 2\pi q_{SOL}$)
=> SOL中では $D_{\perp e} \sim D_B \gg D_{\perp i}$
- ◆ SOL電流路のL/R時間で応答： $\tau_s \sim L/R$, $L = \mu_0 K_N n^2 L S$, $n = q/L$, $S = \pi R^2$, $q = 4$, $L = 2\text{m}$,
 $R = 0.65\text{m}$, $K_N = 0.77 \Rightarrow L = 0.013 \text{ mH}$; $R = L_c / (\sigma w \lambda_j)$, $L_c = 2 \pi R q$, $T_e = 0.01 \text{ keV}$,
 $Z_{\text{eff}} = 2$, $w = 0.15\text{m}$, $\lambda_j = 0.02\text{m} \Rightarrow R = 0.07 \text{ ohms}$
 $\tau_s \sim L/R = 0.19 \text{ ms} \Rightarrow$ SOL電流の立ち上がり時間は τ_s と同程度。
バイアス駆動電圧周波数を5 kHz以上とするとき留意。

今後の計画

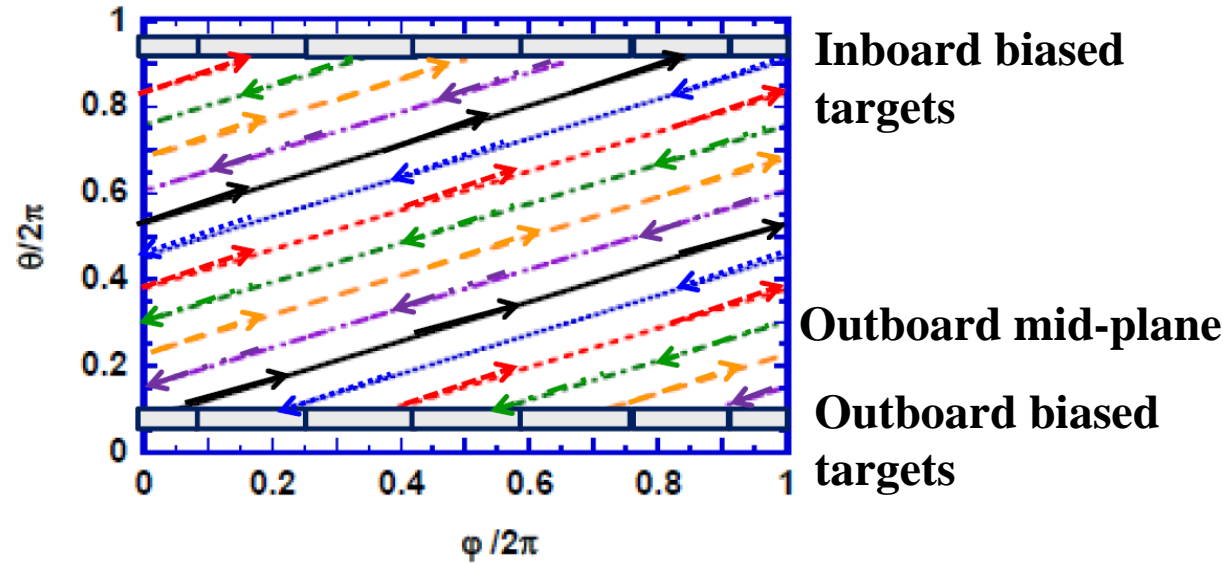
- ダイバータバイアスによるSOL幅の変化の有無の確認：
 - 下側ダイバータ板の温度変化の計測（IRカメラ）
 - ダイバータプローブ（ダイバータ板より50mm以上かさ上げ）
 - 赤道面でのSOL幅変化の計測（可動LPプローブ装置）
- RMP生成の直接計測：
 - 磁気プローブアレイ(振幅とm, nの評価)
- 高密度での実験によりバイアス駆動電流を駆動電源(7A)まで増大させて実験： $\Rightarrow b_{mn}/B_t \sim 10^{-4}$ (LCFSより2cm内側)
 - \Rightarrow Hot electron閉じ込めへの影響？
- 高精度の閉じ込め磁場配位での実験：EFIT等の配位確認
 - ダブルヌル及び上側シングルヌルダイバータ配位（上方向に磁気軸移動）での実験

Back Up

トロイダル分割型ダイバータバイアス法による SOL電流駆動とRMP生成モデル



Method: Electric biasing of toroidally segmented divertor targets against the vacuum vessel with appropriate phasing



[Example] Inboard-outboard both-side biasing for generation of $n=3$ RMPs

One-side biasing
(Both-side biasing is also possible)

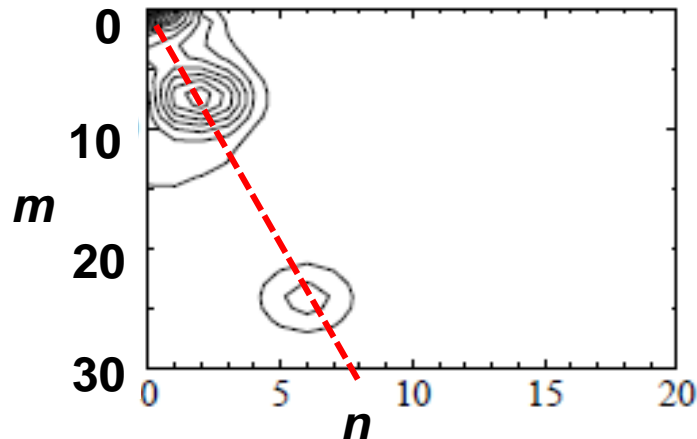
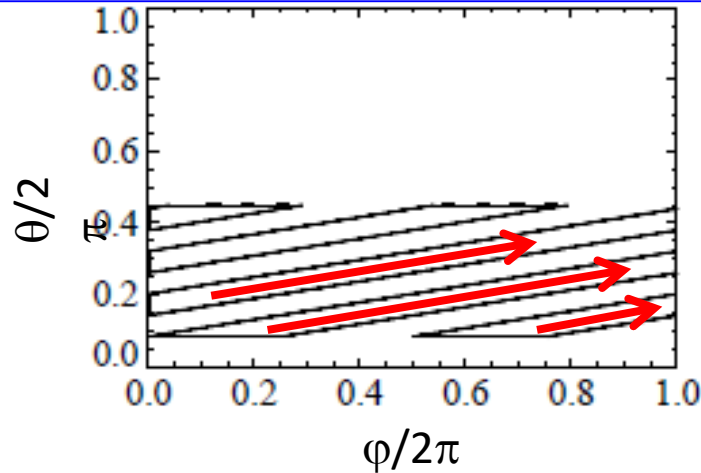
トロイダル分割型ダイバータバイアス法で生成される SOL 電流群のフーリエ成分

Example of Single Null Divertor on

$$L_{\parallel ec_el} < L_c$$

@ Single null divertor

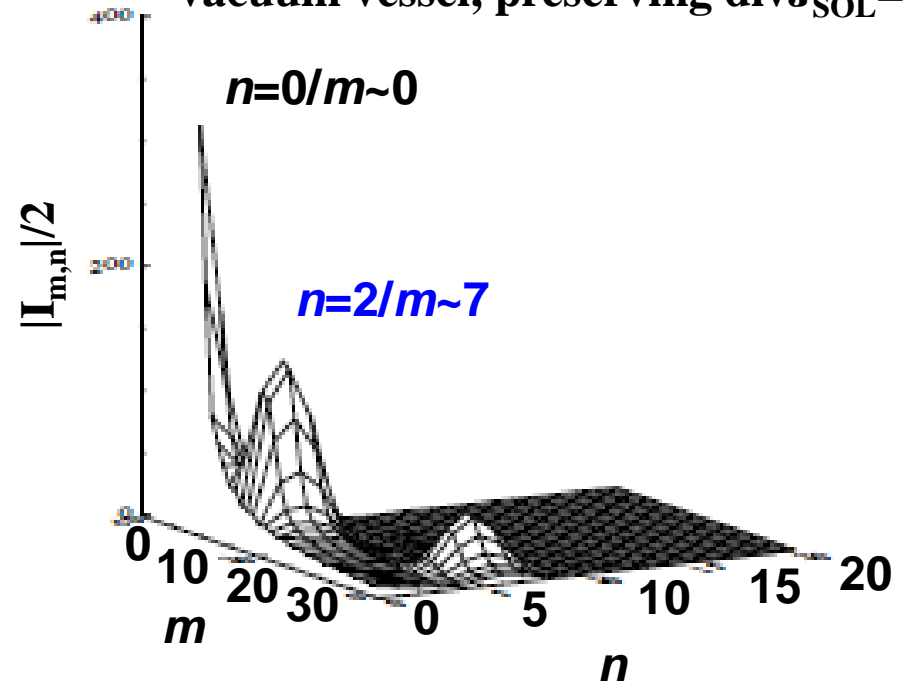
@ Outboard target biasing (PFPF)



$$q_{SOL} \sim 3.5$$

$$\text{Collisional SOL: } L_{\parallel ec}/L_c = 0.44$$

Assumption: Return current flows only radially toward the grounded vacuum vessel, preserving $\text{div} J_{SOL} = 0$



Fourier components are nearly dominated by the components with $m/n \sim q_{95}$, although appreciable $m=0$ component exists.

ダイバータバイアスで駆動される SOL電流値

Magnitude of SOL Currents

Ion saturation current: $i_{is} \cong 0.61 Z e n_i \sqrt{\frac{T_e + T_i}{m_i}}$ (Assump.)

Electron saturation current: $i_{es} \cong \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} i_{is} \sim 68 i_{is}$

SOL磁力線の浅い角度でのバイアス板との鎖交
 $\Rightarrow i_{es} \cong 2 - 3 i_{is}$

Biasing voltage: $V_{bias} \geq \alpha \mathcal{R}_{\parallel} I_{SOL} + \kappa T_e$, $\kappa = 4 \sim 5$
[Ohmic drop, $0 < \alpha < 1$]
[Potential drop in sheath]

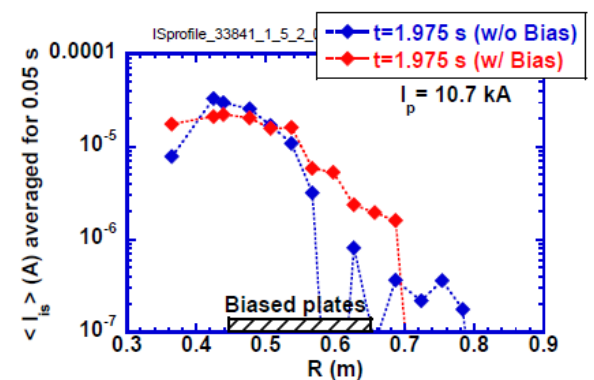
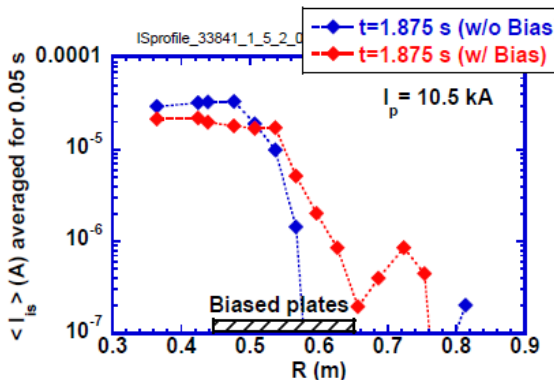
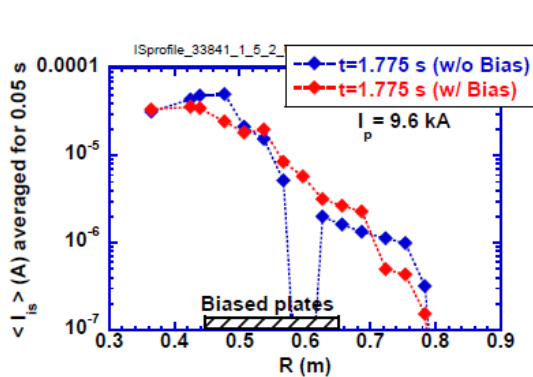
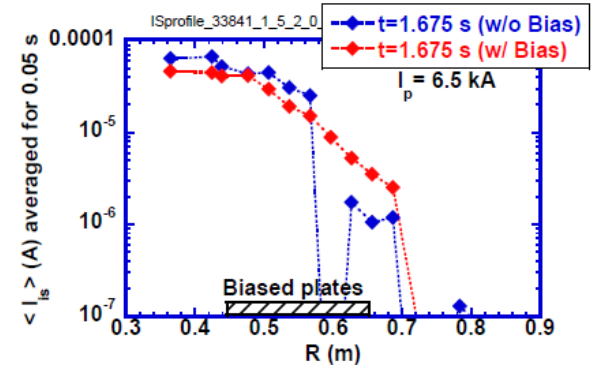
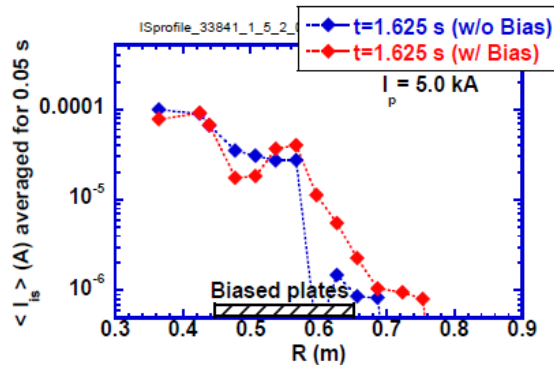
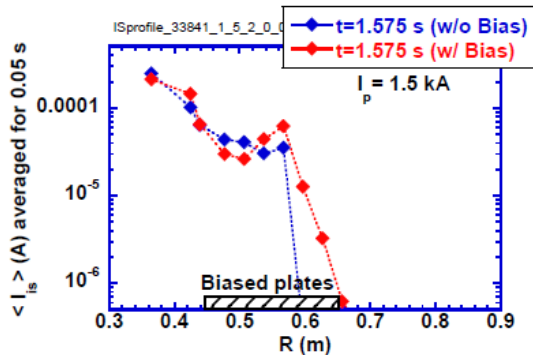
8.2 GHzRFによるプラズマで観測されたダイバータ バイアスによるダイバータ粒子束分布の拡張

Biasing off (#33841)

Biasing on (#33843)

$\langle I_{is} \rangle$: averaged over $t-0.025s$ to $t+0.025s$

Experiment
On Nov., 2016

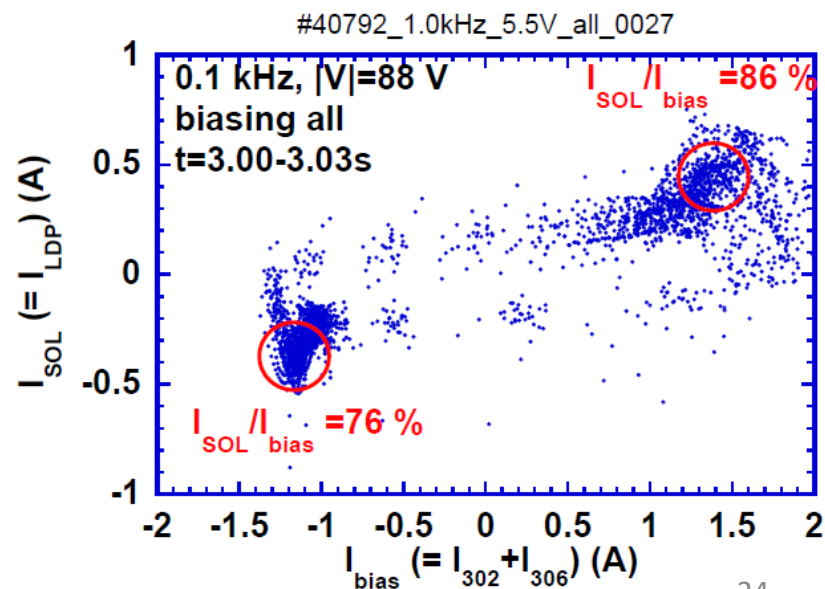
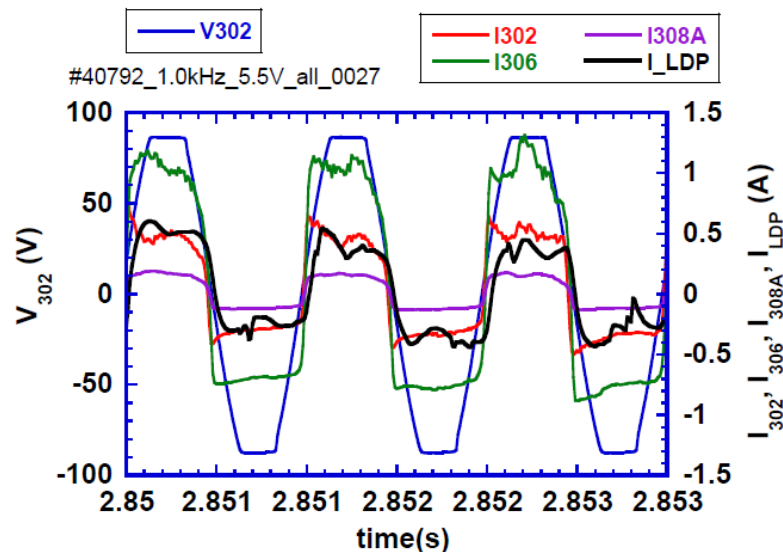
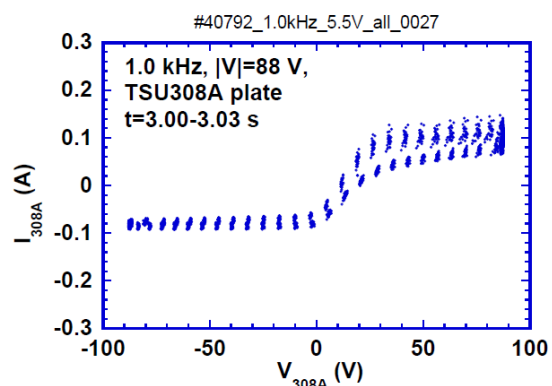
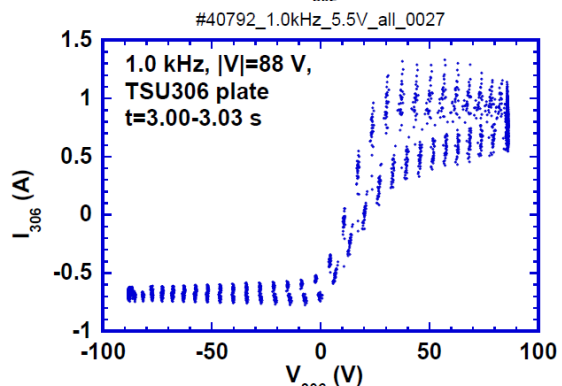
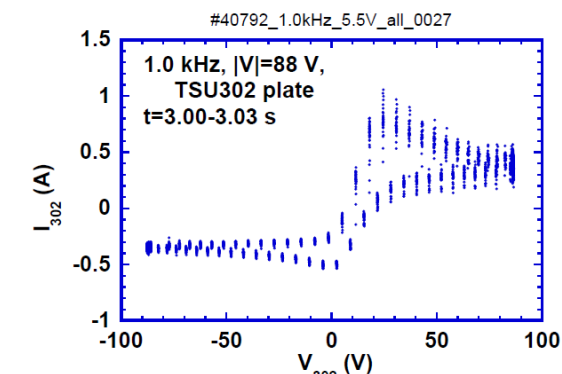


Divertor biasing in the upper divertor plates slightly expands the ion saturation current profiles measured at the upper divertor region.

Mechanisms: $E \times B$ effect or enhanced radial transport by convective cell ?

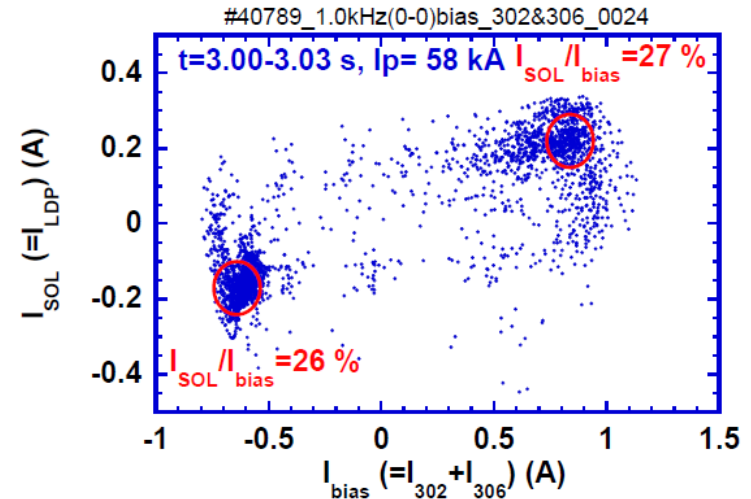
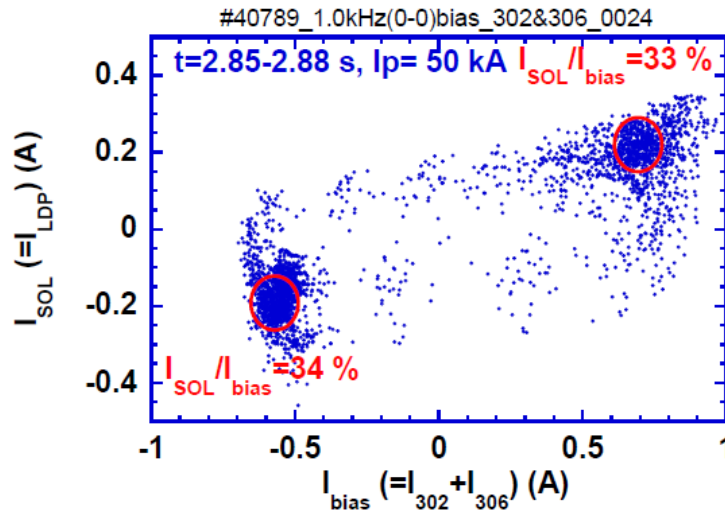
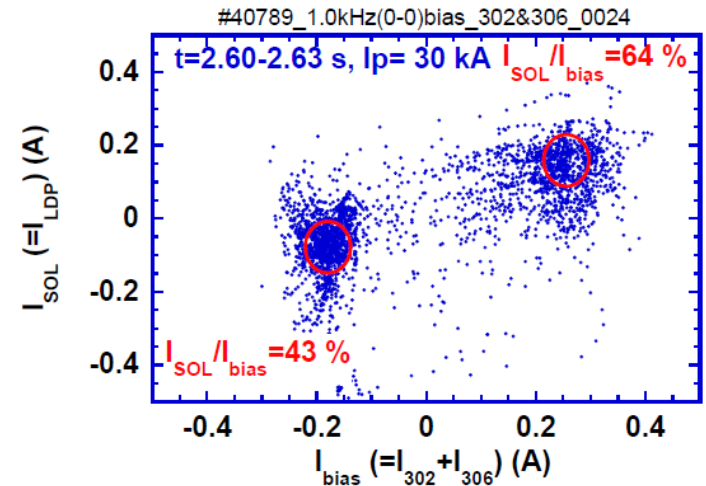
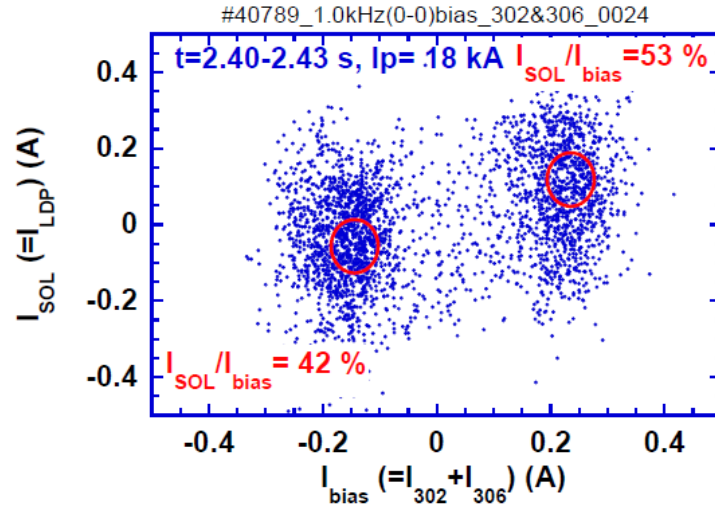
最高のSOL電流駆動効率

#40792
1.0 kHz
With
late gas puff
(high $\langle n_e \rangle$)



SOL電流駆動効率の I_p 依存性(2)

#40789
1.0 kHz
2-plates:
in-phase

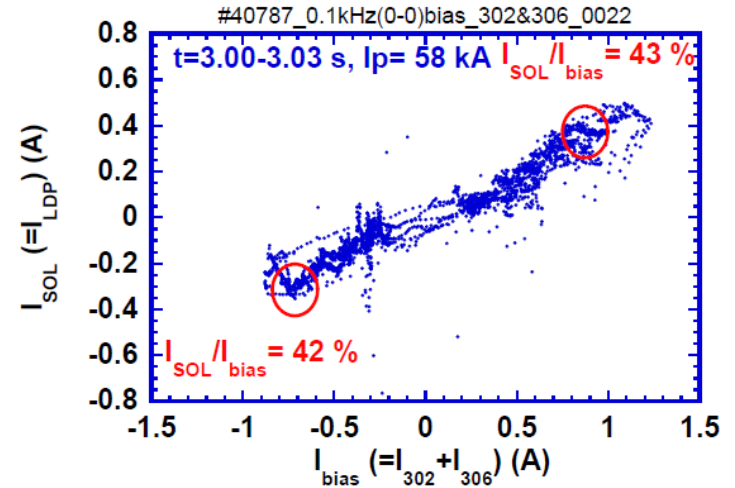
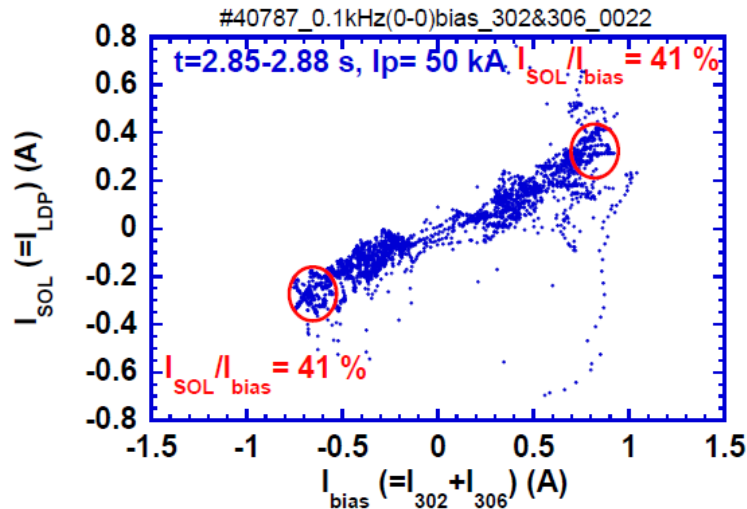
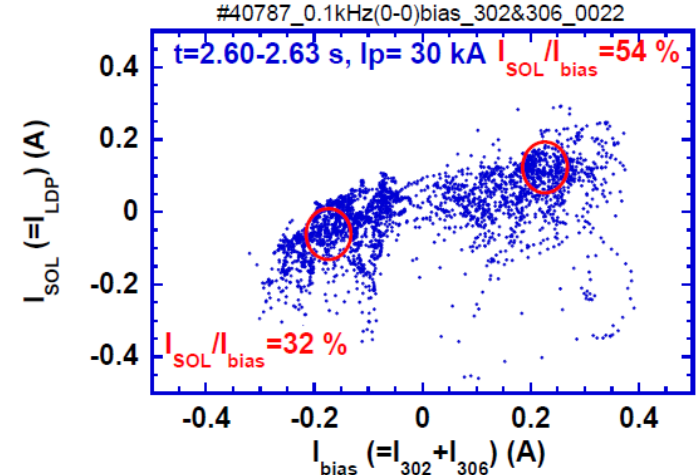
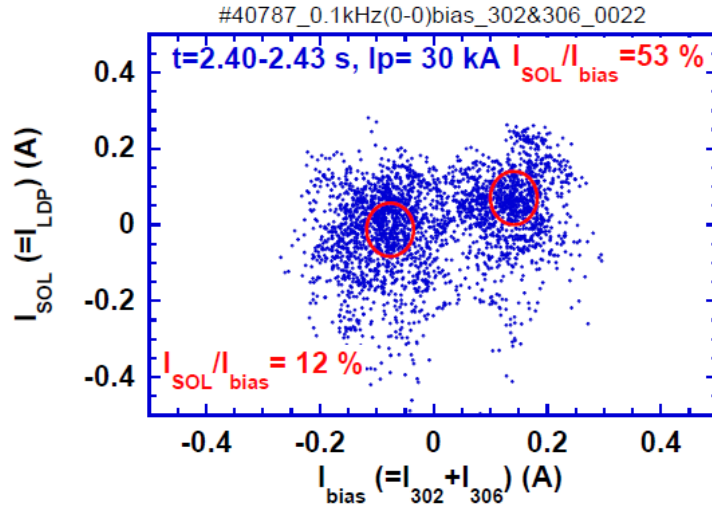


SOL電流駆動効率 $I_{SOL}/I_{bias} \sim 60\%$ where $q_{SOL} \sim 6-12$

(注) $I_{SOL}/I_{bias} \sim 10-20\%$: 8.2GHz 実験(2016 Nov.)の低 I_p (~ 5 kA)プラズマ where $q_{SOL} \sim 20-30$

SOL電流駆動効率の I_p 依存性(3)

#40787
0.1 kHz
2-plates:
in-phase



SOL電流駆動効率 $I_{SOL}/I_{bias} \sim 60\%$ where $q_{SOL} \sim 6-12$

(注) $I_{SOL}/I_{bias} \sim 10-20\%$: 8.2GHz 実験(2016 Nov.)の低 I_p (~ 5 kA)プラズマ where $q_{SOL} \sim 20-30$