

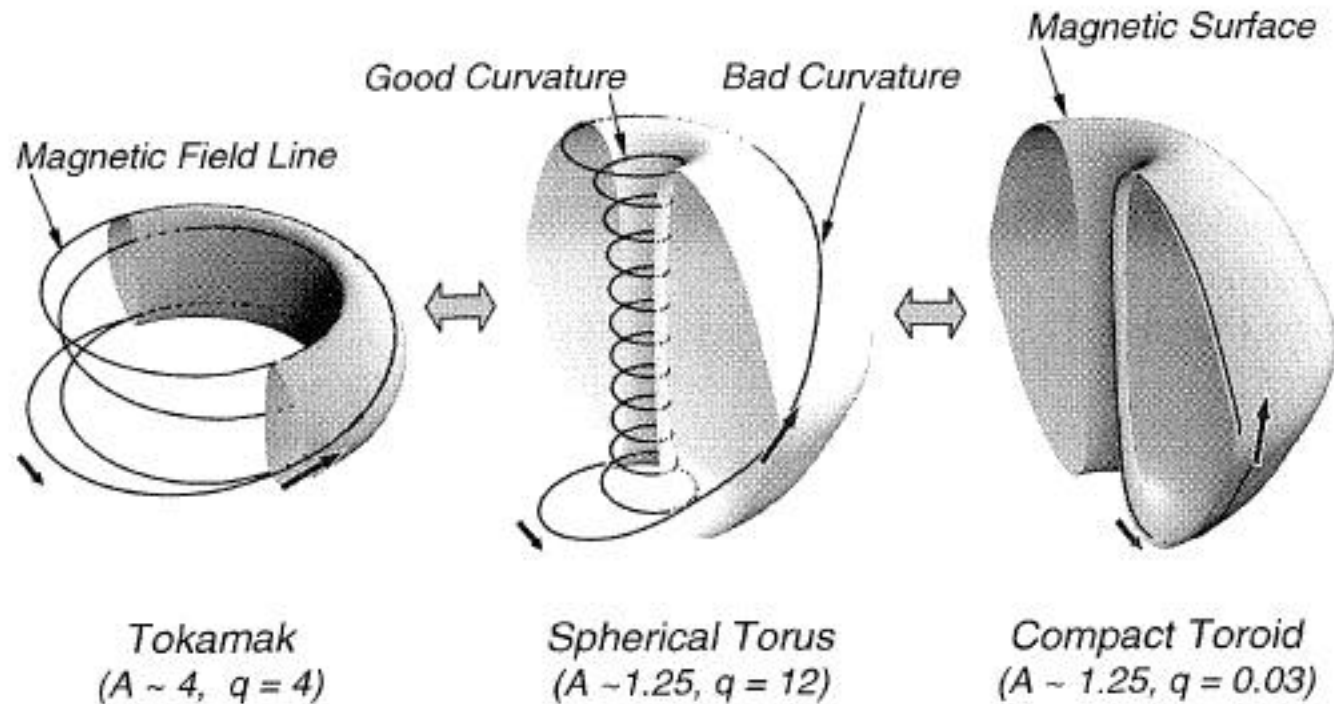
# プラズマ合体を用いた球状トカマク 立ち上げ方法の比較・検討

河森 栄一郎 <sup>a)</sup>、住川 隆 <sup>b)</sup>

a) 東京大学高温プラズマ研究センター

b) 東京大学大学院新領域創成科学研究科

# Introduction 球状トカマク (ST)



小型さ、プラズマ外側端部での磁場構造等コンパクトトラス(CT)との類似性。

トカマクの安定性、良好な閉じ込めを併せ持つ。

Natural elongation, 高三角度 ---> 高ベータ。

# ST燃焼プラズマにおける課題

中心部にスペースを確保できないことから中性子遮蔽体の設置が困難。

1. OHコイルを用いたプラズマの立ち上げ、電流駆動が行えない。 → 1. プラズマ合体を用いたSTプラズマの生成
2. 外部トロイダル磁場発生コイルに対して超伝導体を使用できないため通常導体による中心導体電流発熱量が非常に大きくなる。 → 2. プラズマの安定性を保ったまま中心導体電流(プラズマ端部q値)をどこまで小さくすることができるか?

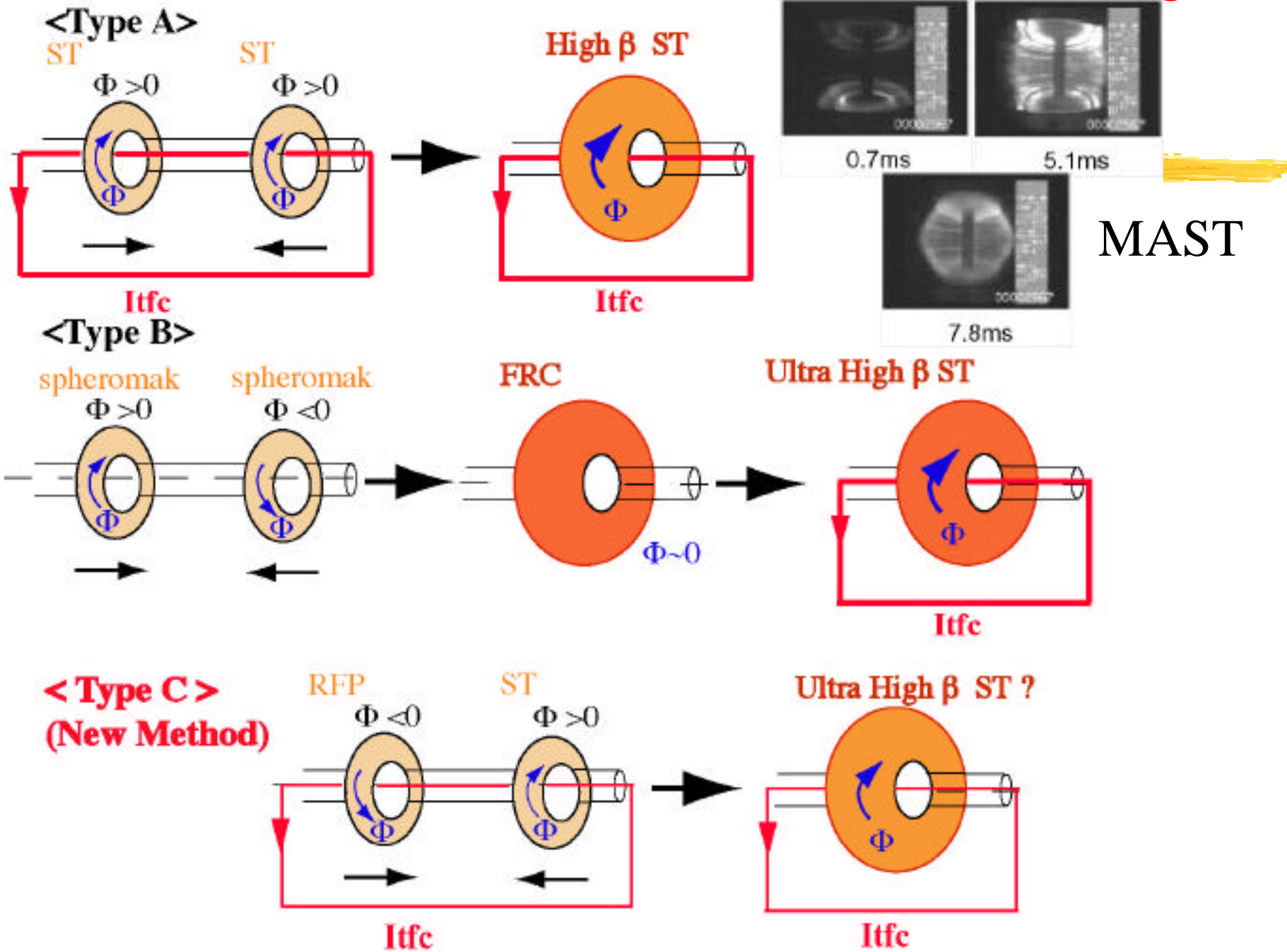
## 本研究の目的

新たなプラズマ合体ST生成法(**RFP-ST merging**)の提案・実証。

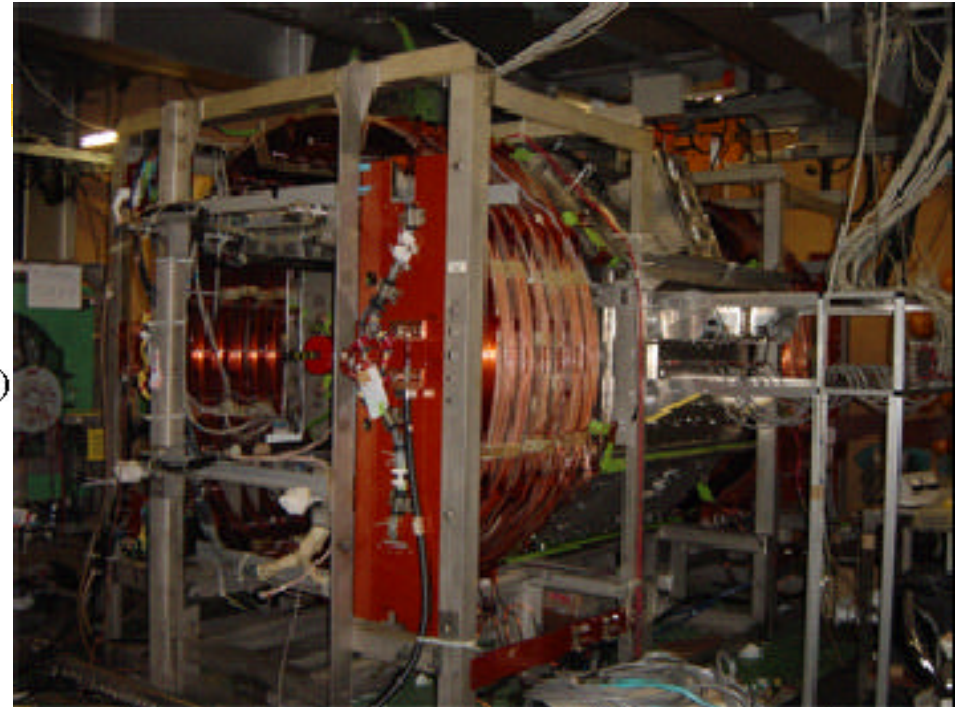
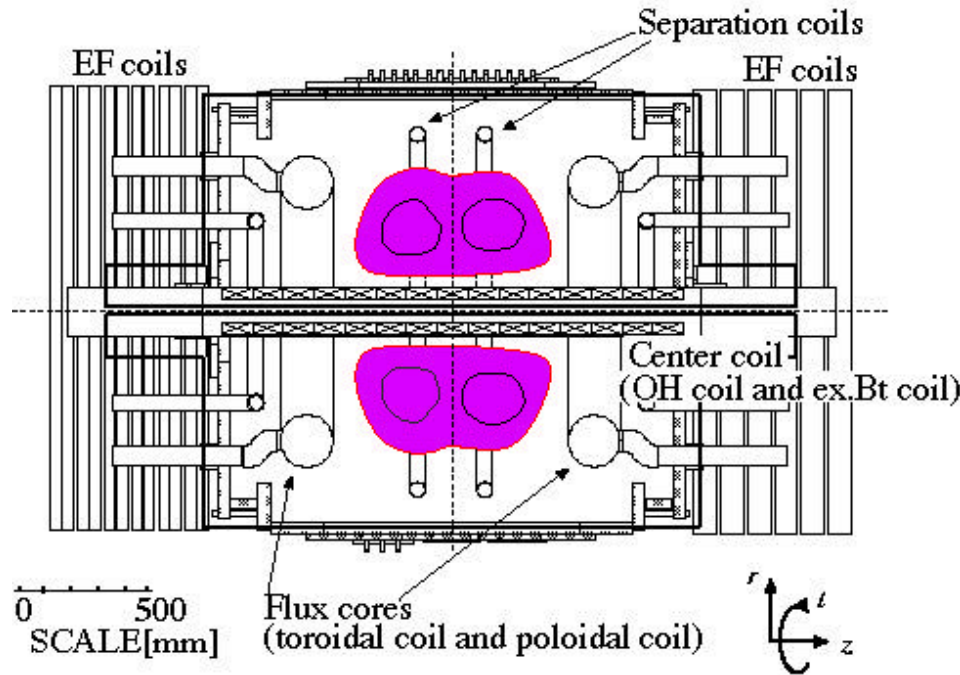
安定なST生成のための端部q値( $I_{tfc}$ )の下限を調べる。

プラズマ合体を用いた高 ST プラズマの立ち上げ法の比較。

# Methods of the ST Formation Using CT Merging



# TS-4 Merging/ ST Device

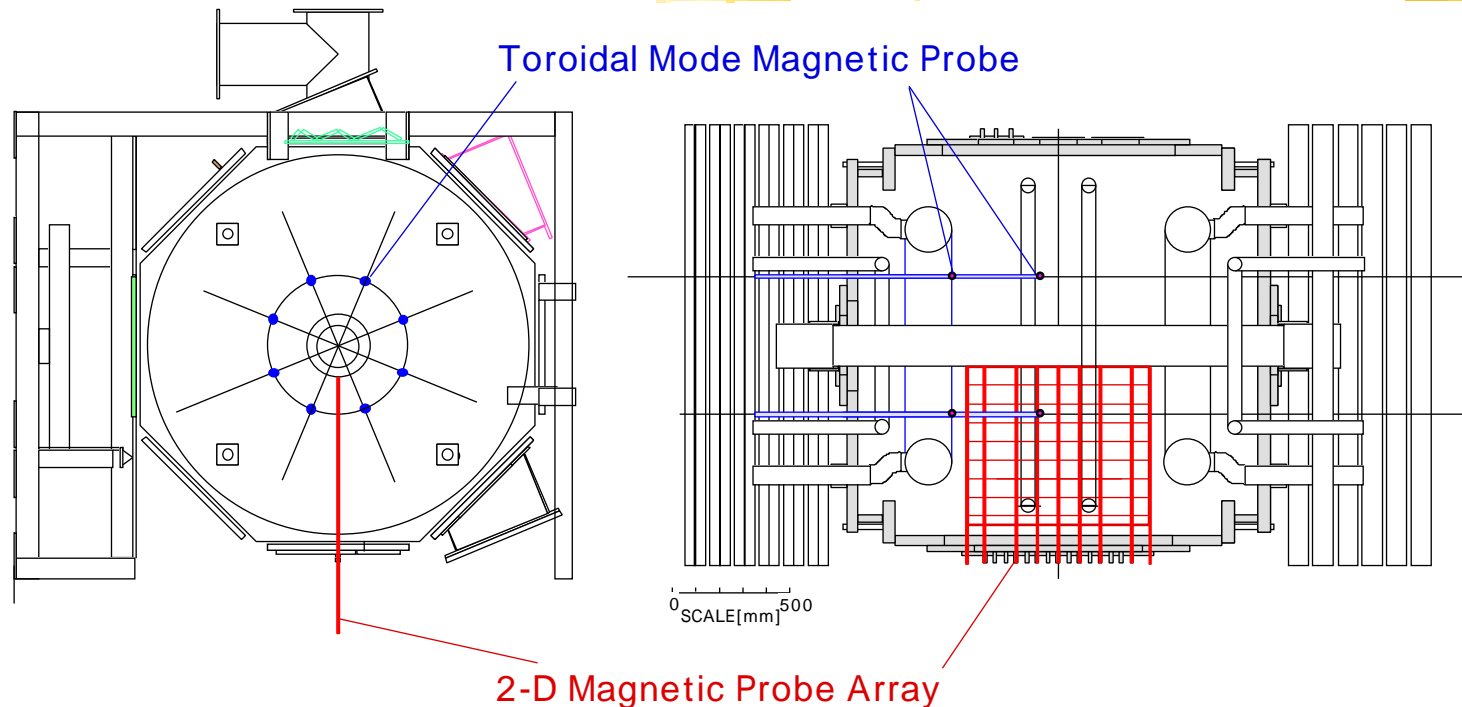


TS-4 utilizes a fluxcore with PF and TF coils for poloidal and toroidal flux injection.

All type of CTs/STs ( $q_0 \sim -0.7-9$ ) can be produced in a single device.

$R=0.4\sim 0.6$  m,  $R/a\sim 1.5$ ,  $B_{t0}\sim 0.05$  T .

# Magnetic Measurements

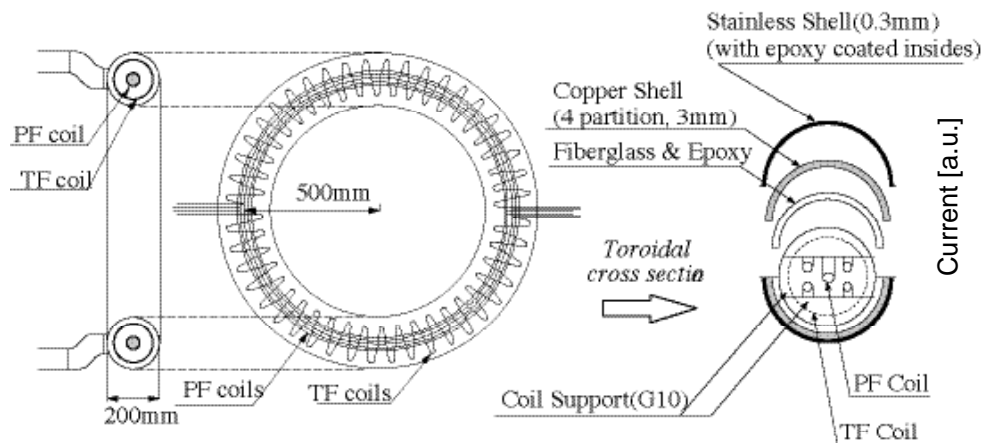


A 2-D array of magnetic probe was used to measure 2-D magnetic field profile for calculation of flux contour.

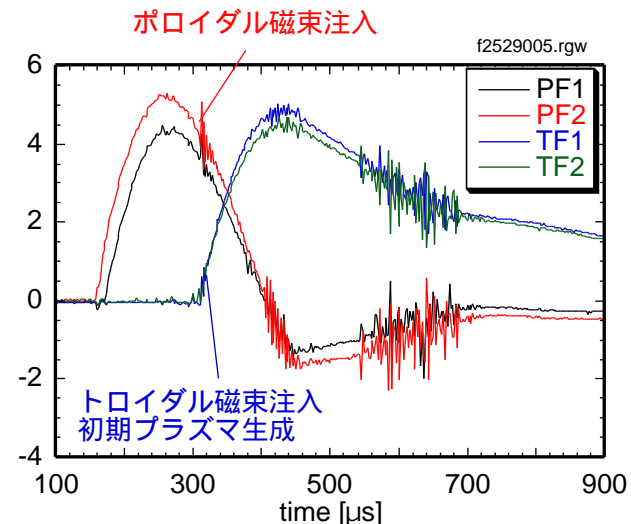
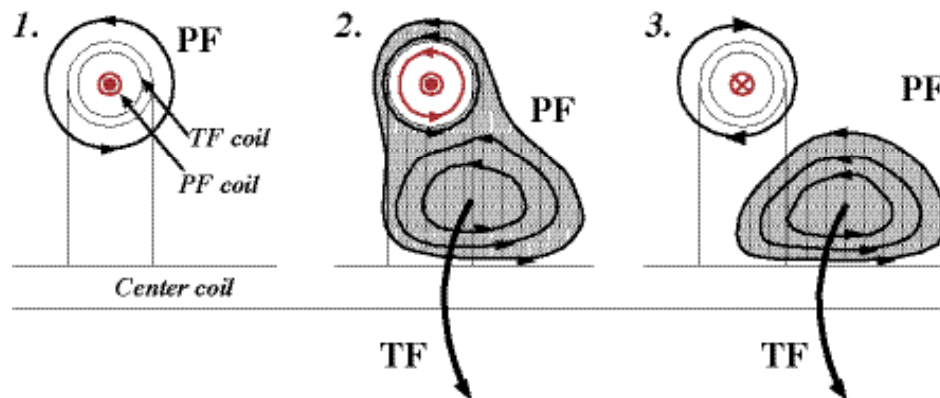
Another 8 magnetic probes were located toroidally around the separatrix on the midplane to measure toroidal mode.

# Flux Coreによるプラズマ生成

## Flux Core



Major radius = 500mm, Minor radius = 100mm  
 TF coil : 20 turn coil × 2 (parallel).  
 PF coil : 1 turn coil × 4 (parallel).



PF, TF coil 電流波形

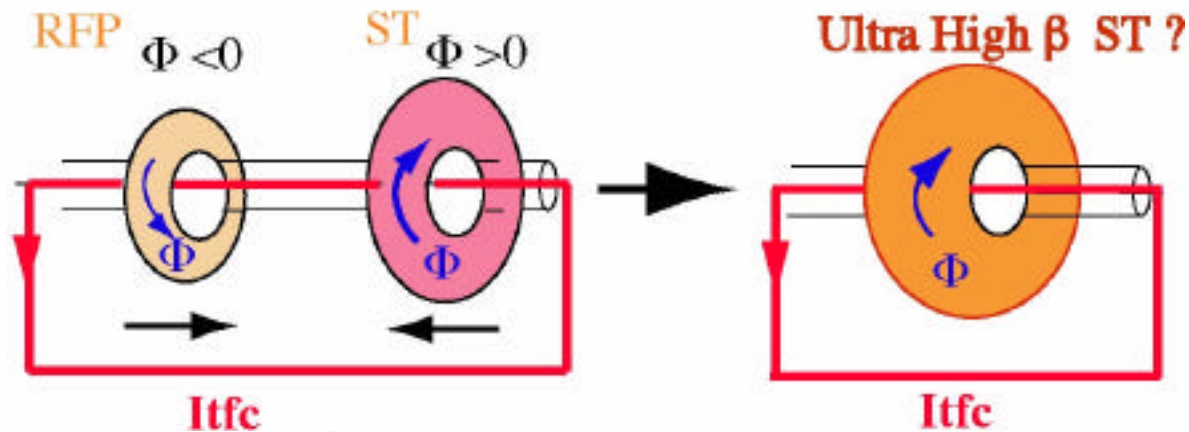
誘導によりFlux Core周りに生成されたプラズマは、PF電流の反転によりFlux Coreから切り離される。



-Type C (RFP-ST Merging)-

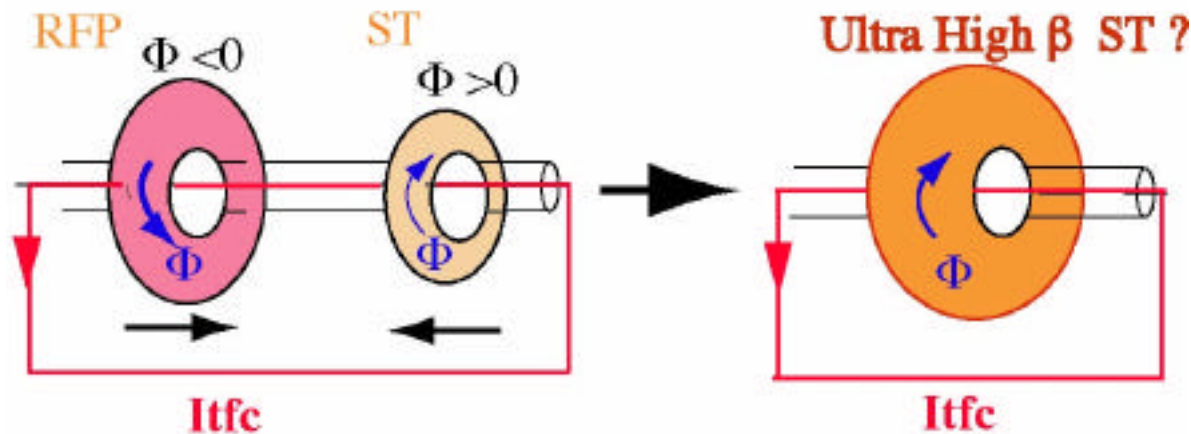
## RFP-ST合体のq領域

high-q merging



初期STに  
適した $I_{tfc}$

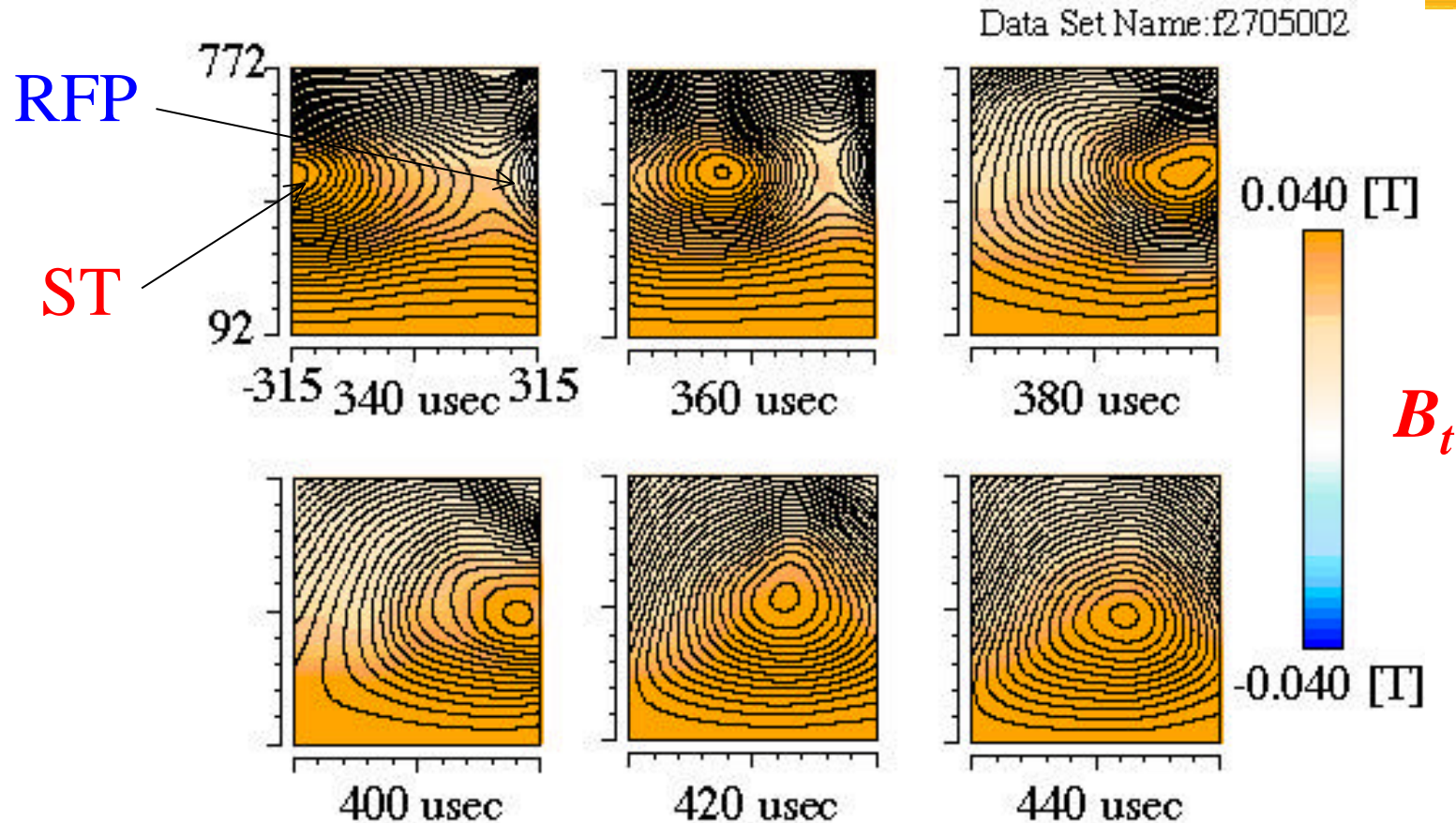
low-q merging



初期RFPに  
適した $I_{tfc}$

-Type C (RFP-ST Merging)-

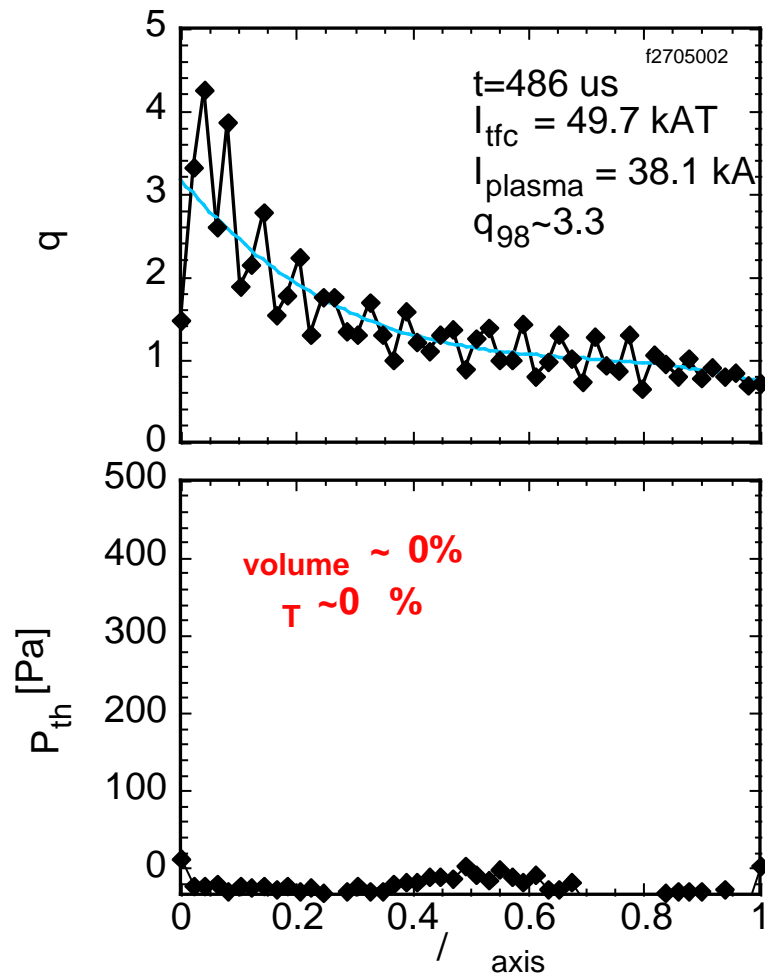
## 高q領域における Type Cによる ST生成



初期STが優位なexBt状況下での合体生成。

# -Type C (RFP-ST Merging)-

## 高 $q$ 領域 *Type C* 生成 *ST* は低



Data Set Name : f2705002

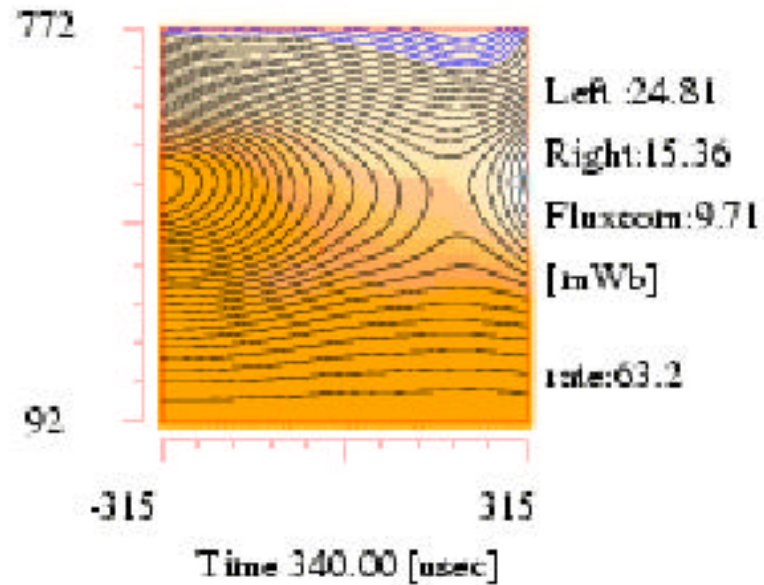
$\psi$ [Wb] : Contour Spacing 0.0010

$B_t$ [T] :

-0.0400

$B_t$

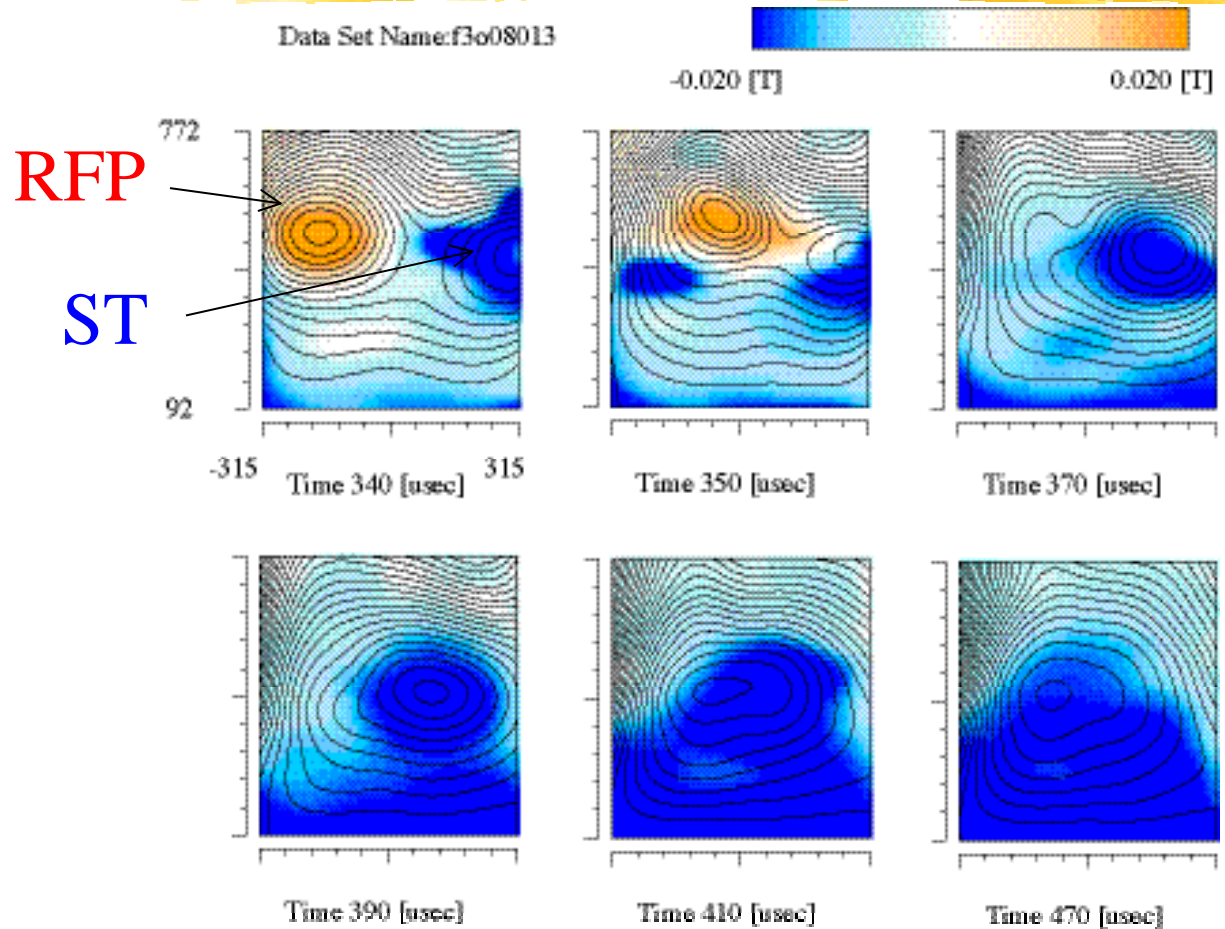
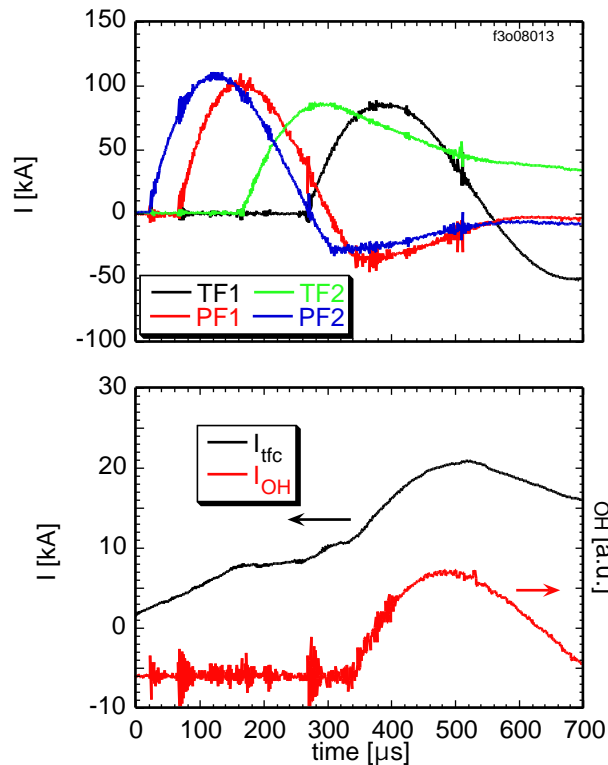
0.0400



-Type C (RFP-ST Merging)-

# 低 $q$ 領域における *Type-C ST* 生成

コイル電流波形



$I_{\text{tfc}}$  を緩やかに増加させながらの異極性合体

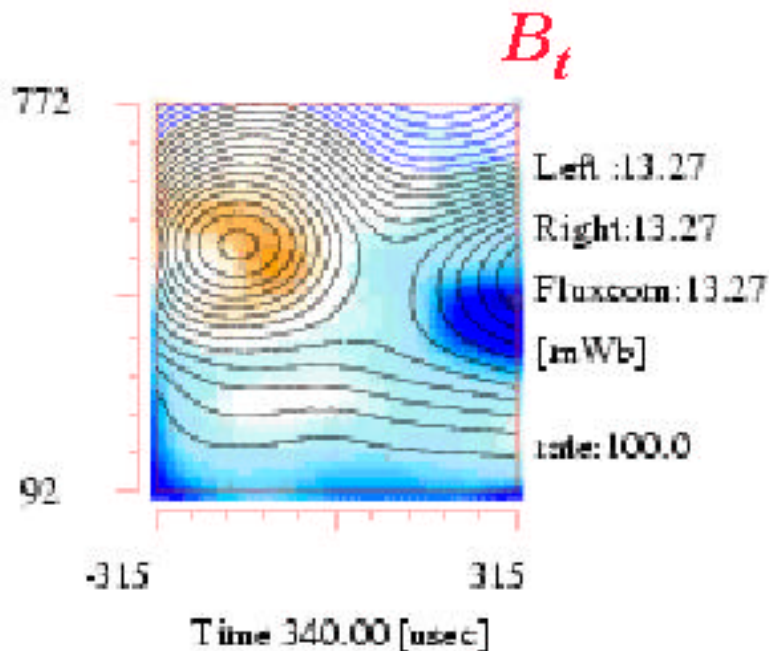
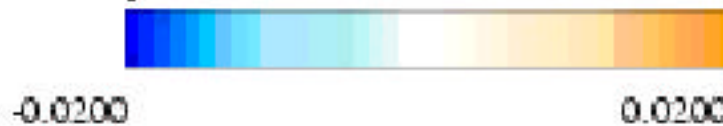
## -Type C (RFP-ST Merging)-

### *The time evolution of the ST formation*

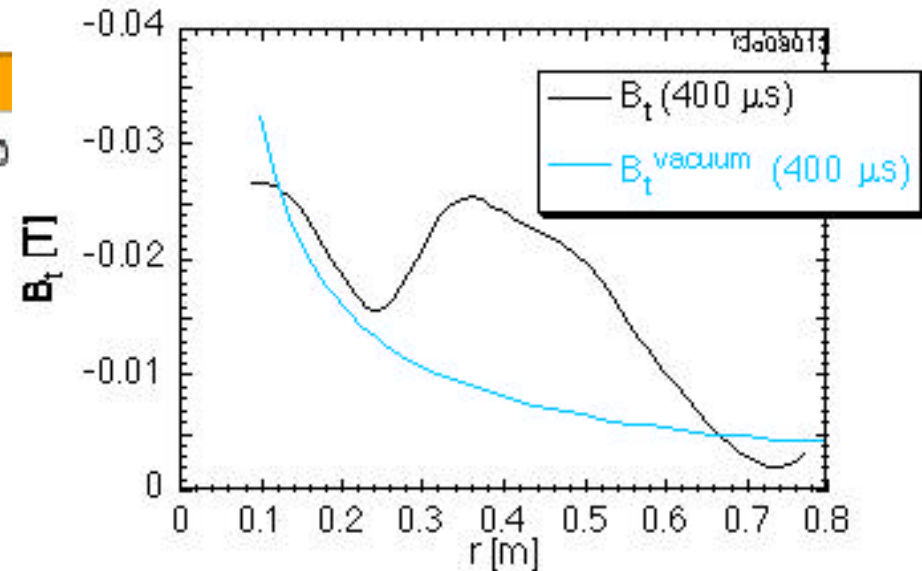
Data Set Name : f3c08013

psi[Wb] : Contour Spacing 0.0010

$B_t$ [T] :



The radial profile of  $B_t$



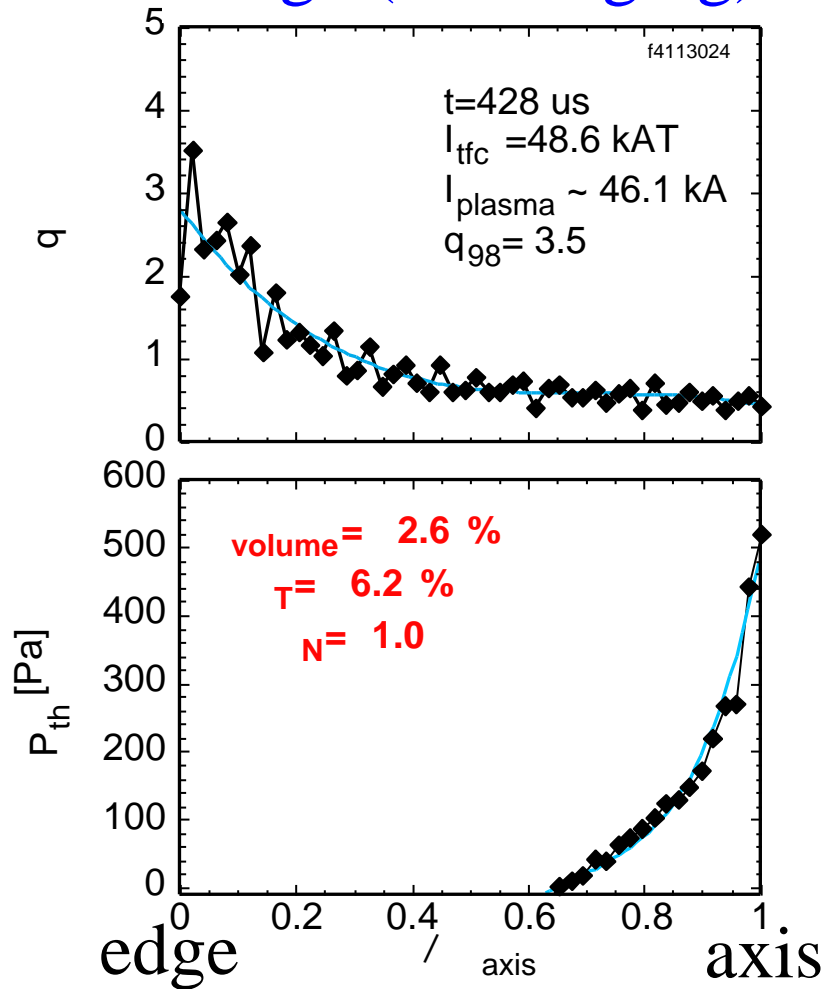
■ 生成されたSTは外部トロイダル磁場に対して強い常磁性を示す。

# -Type C (RFP-ST Merging)-

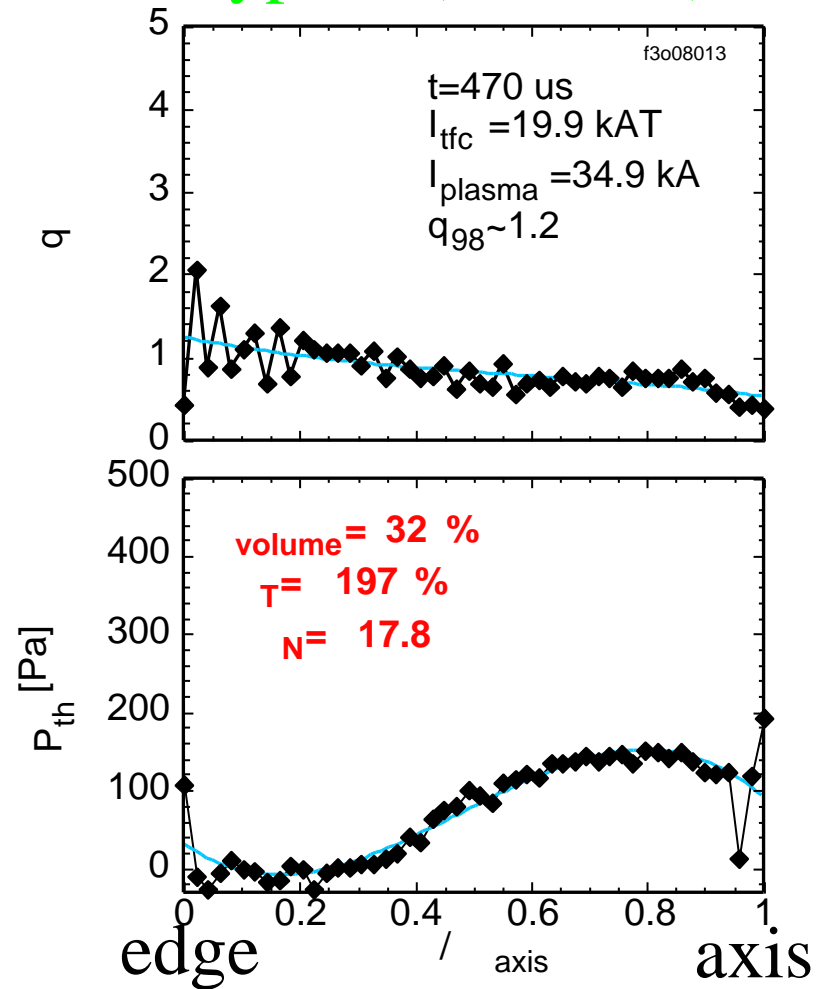
$\langle \rangle_{volume} \sim 30\%$ ,  $N \sim 18$ ,  $q_{98} \sim 1.2$

Single(no merging)

Type C (RFP-ST)



高 $q$ 、低

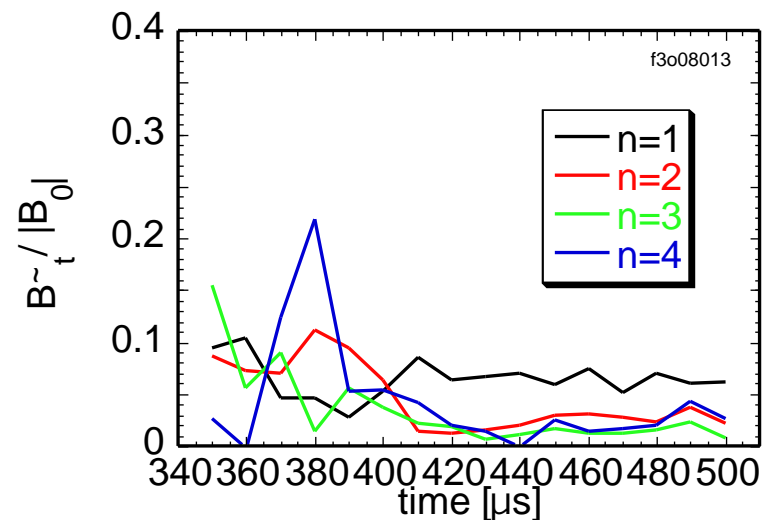


broadな圧力分布。高 だが、低 $q$

## Type C (RFP-ST合体) のまとめ

基本的に高q運転が実現できていないため  
プラズマの減衰が早い( $n=1$ )。

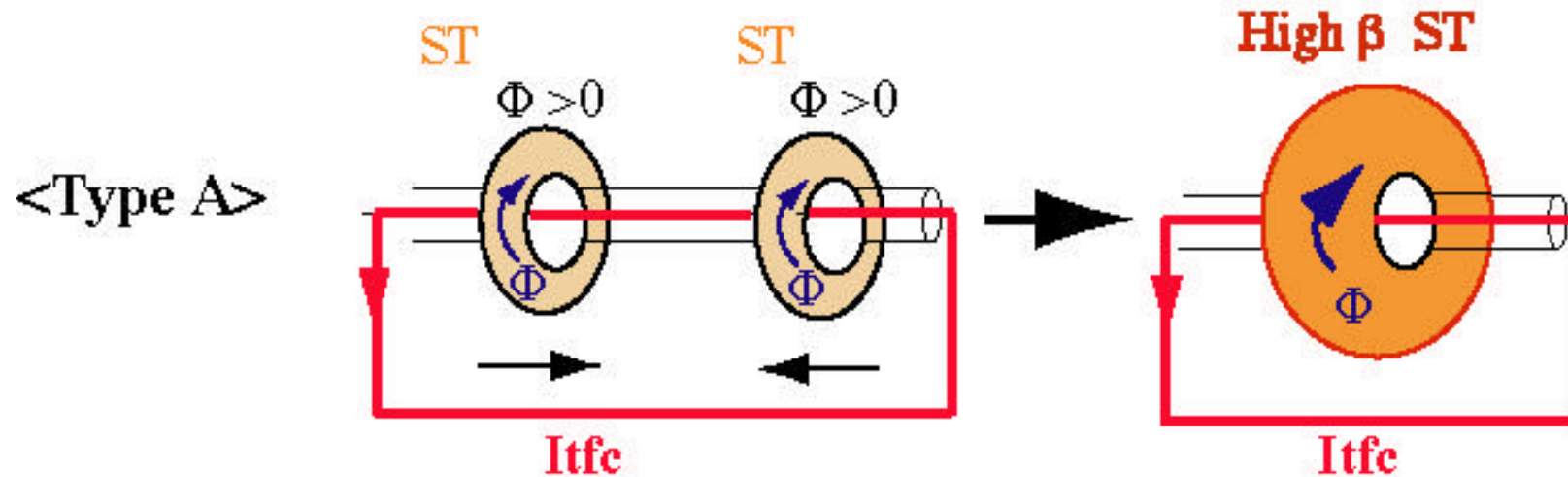
超高 反磁性ST  
は得られず。  
実験シーケンスの  
更なる最適化が必要。



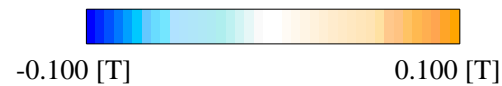
トロイダルモード振幅の時間変化

-Type A (ST-ST Merging)-

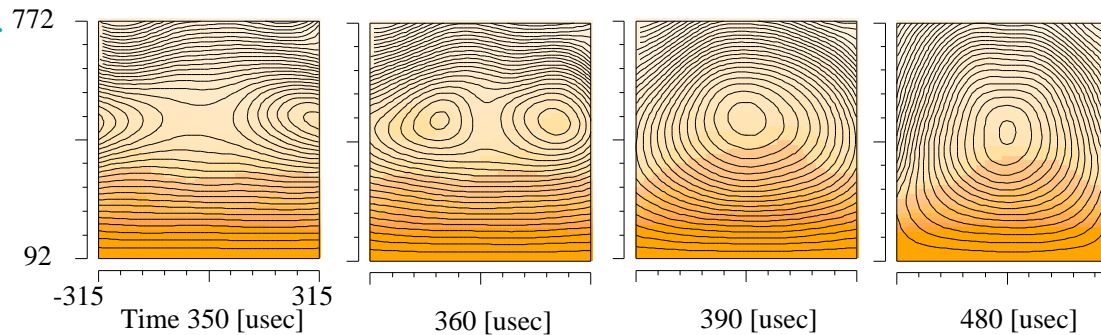
プラズマ端部  $q$  値をどこまで小さくすることができるか?



Data Set Name:f2d27014



The temporal evolution of the poloidal flux contour with Bt amplitude.

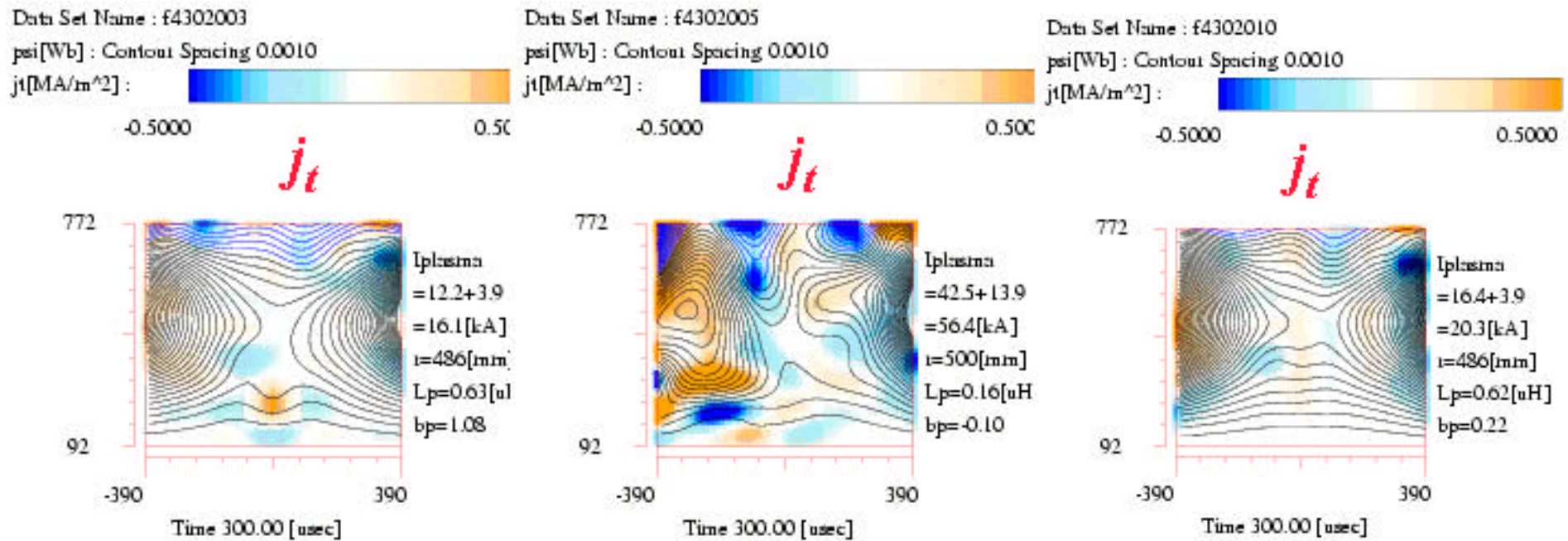


合体により駆動される  $I_{plasma}$  及び  $n$  モードの  $I_{tfc}$  依存性



-Type A (ST-ST Merging)-

# プラズマ電流の立ち上げ



$I_{tfc}=0$  kAT

$I_{tfc}=14.7$  kAT

$I_{tfc}=29.4$  kAT

初期CT生成の行えない  $I_{tfc}$  領域が存在。

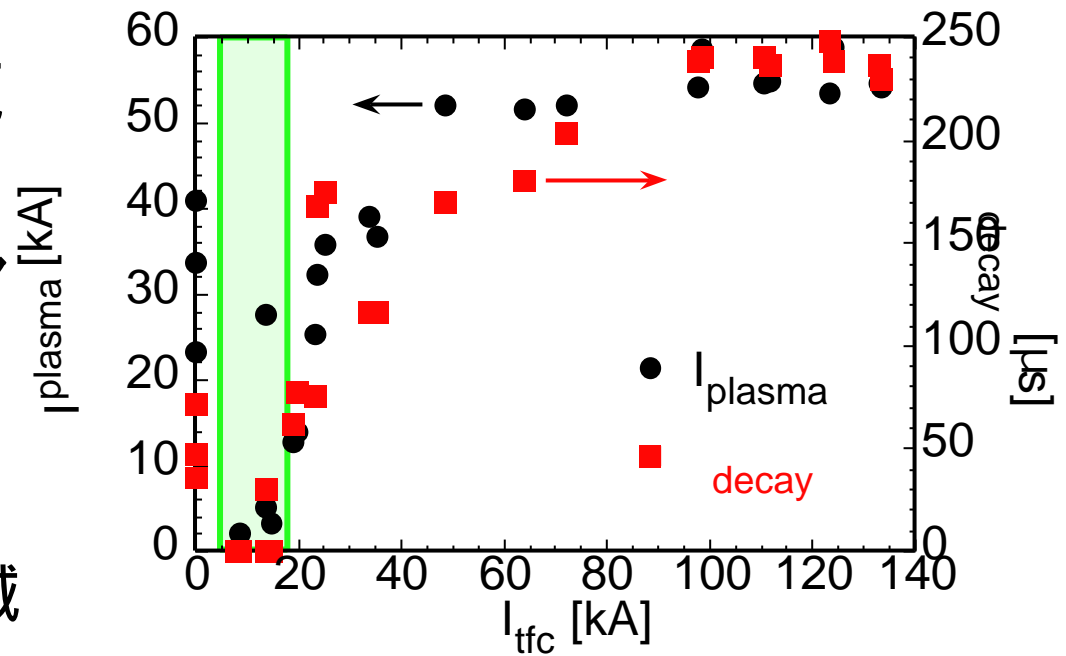
-Type A (ST-ST Merging)-

**$5\text{kA} < I_{tfc} < 20\text{kA}$ では初期CTの生成が困難**

$5\text{kA} < I_{tfc} < 20\text{kA}$ では  
ほとんどプラズマ電流  
の立ち上げが行えない  
( $I_{tfc} \sim 0\text{ kA}$ のスフェロマ  
ックでは可能)。

$I_{tfc} > 80\text{ kA}$ で $I_{\text{plasma}}$ , 配位減  
衰時間 は飽和

---  $q_{95} > 4$

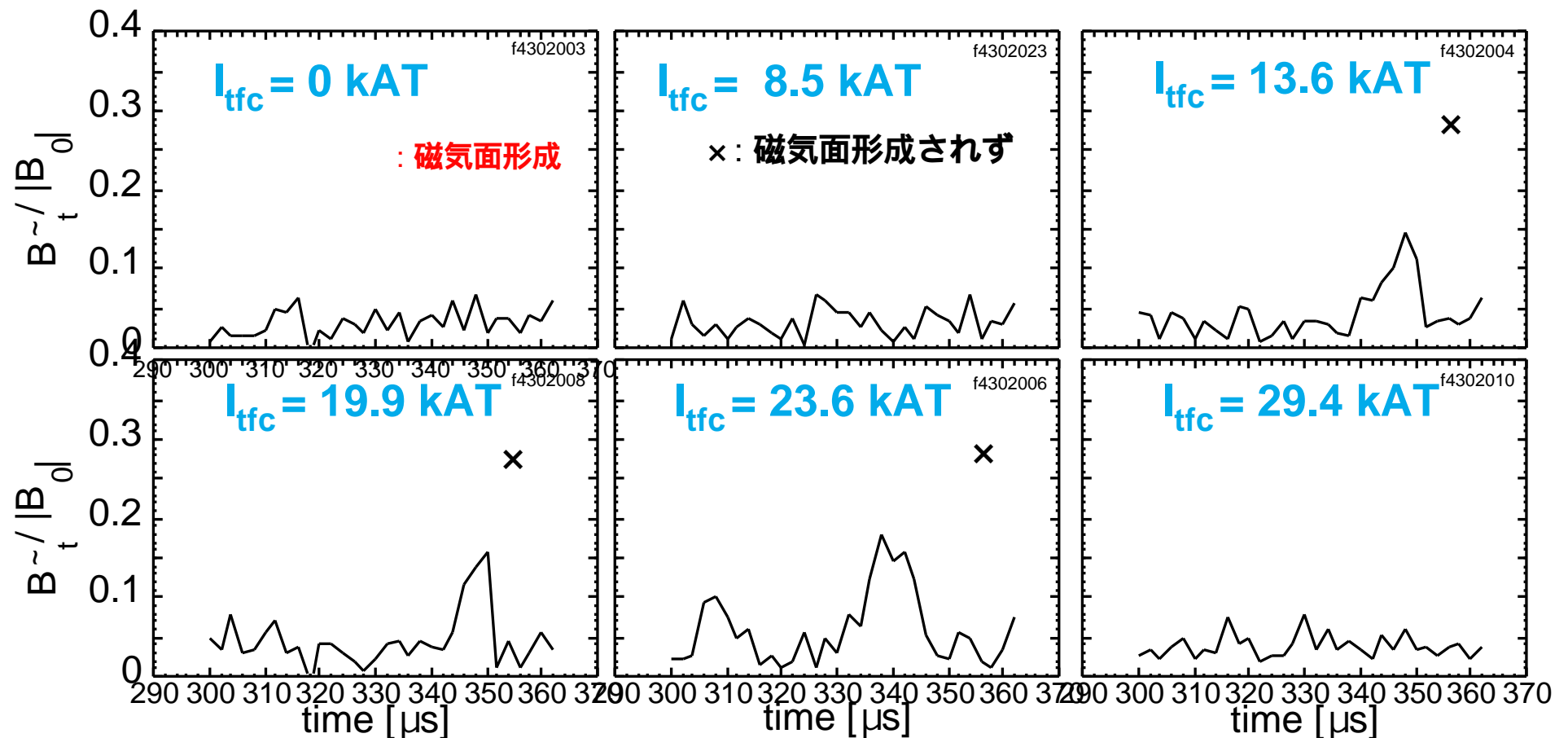


$I_{\text{plasma}}$ , 配位減衰時間 と  $I_{tfc}$  の関係

# -Type A (ST-ST Merging)-

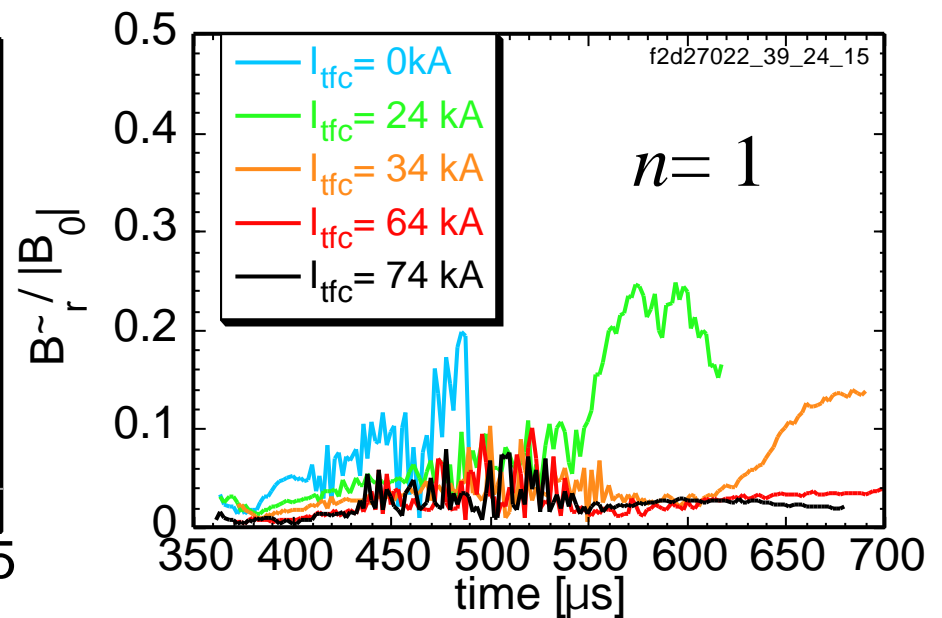
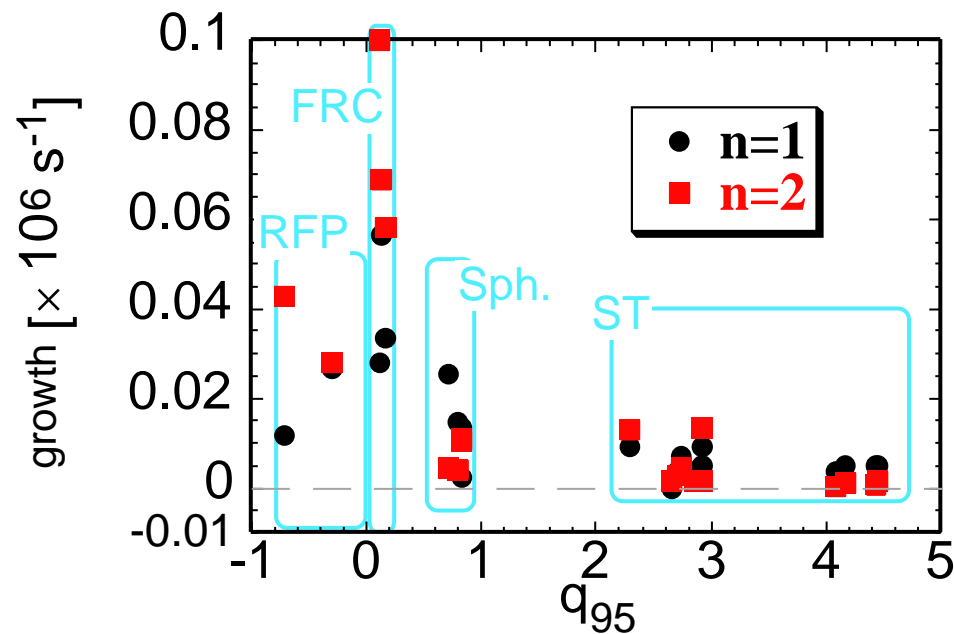
## 初期CT生成不能領域で $n=1$ 不安定を観測

Flux core付近における $n=1$ モード振幅時間発展



-Type A (ST-ST Merging)-

## $q \sim 1$ が初期CT生成不能の原因?

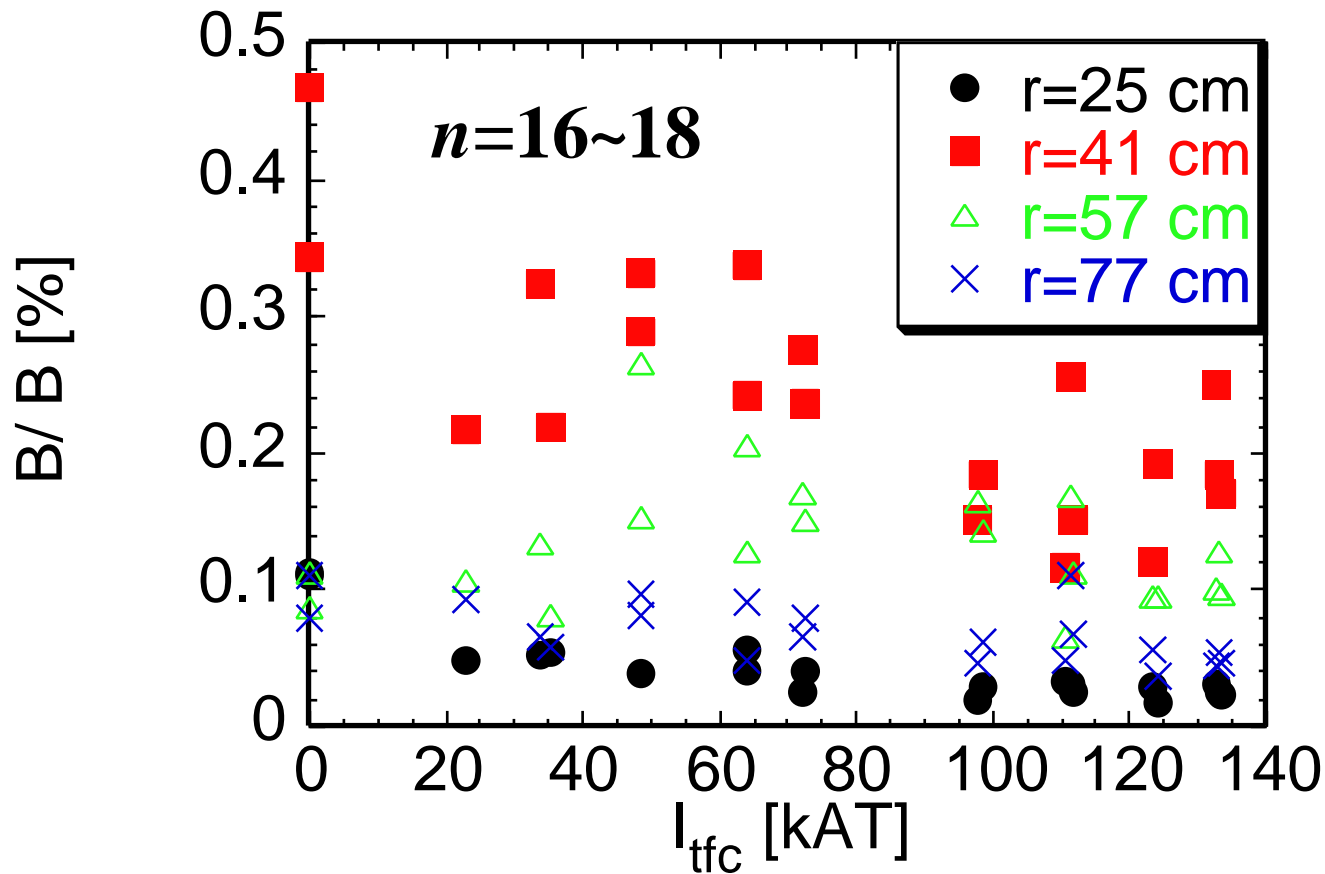


$1 < q_{95} < 2$  のSTは生成されない。  $q=1$  が初期ST生成困難の原因

生成されたSTの低 $n$ モードは $q_{95} > 4$ で安定化。

-Type A (ST-ST Merging)-

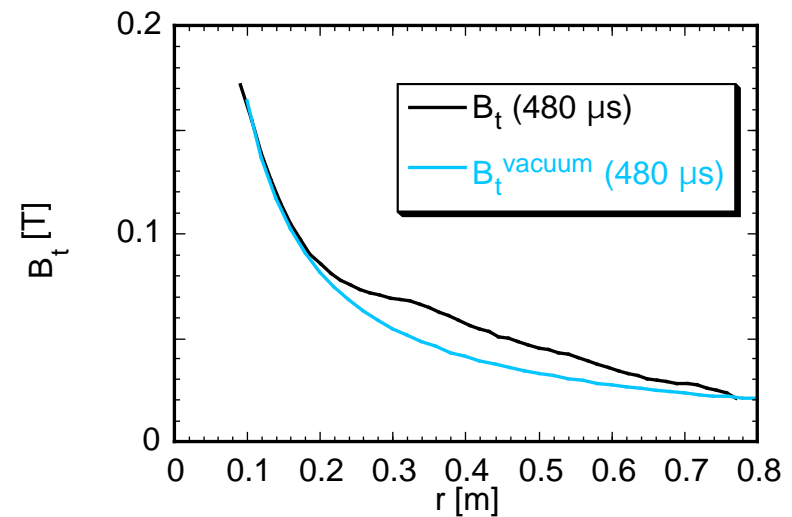
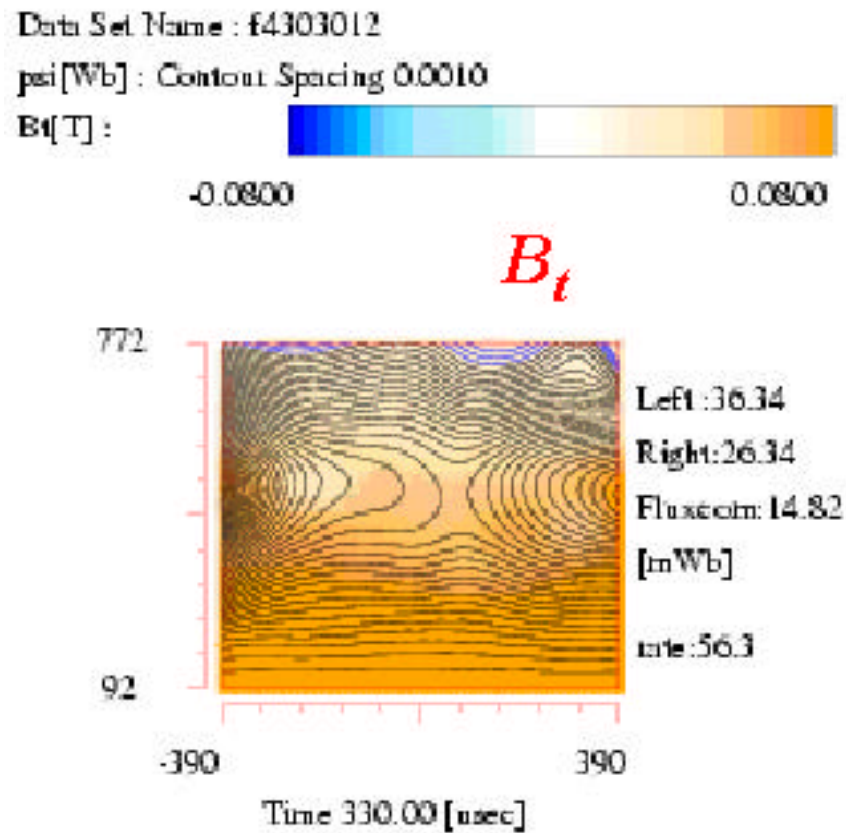
**高 $n$ モードは $I_{tfc} > 80kA$  で安定化される**



$I_{tfc} > 80kA \dashrightarrow q_{95} \sim 4$

-Type A (ST-ST Merging)-

# ST-ST合体による高 $B_t$ 生成

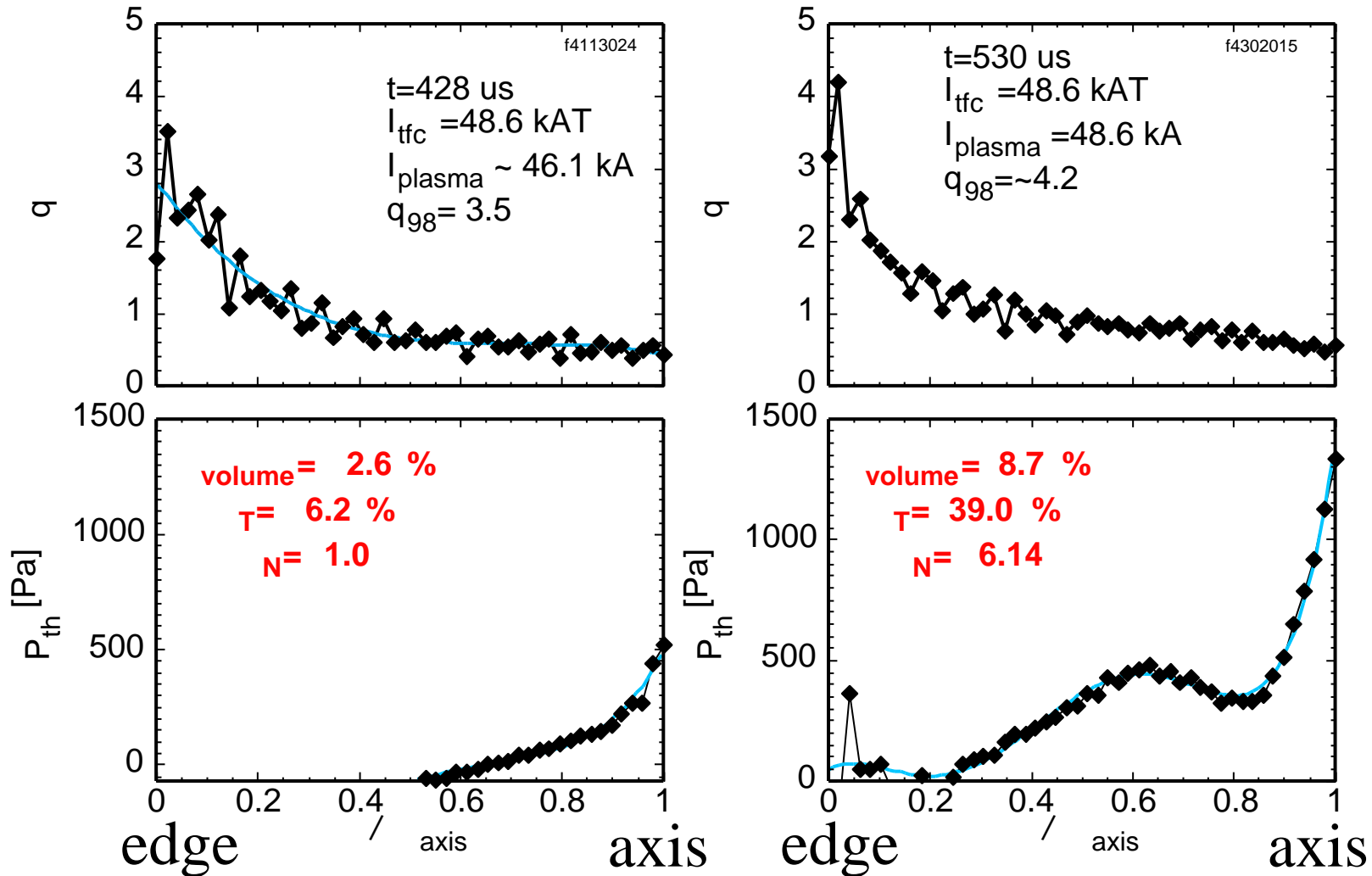


The ST was observed to have a paramagnetic toroidal field.

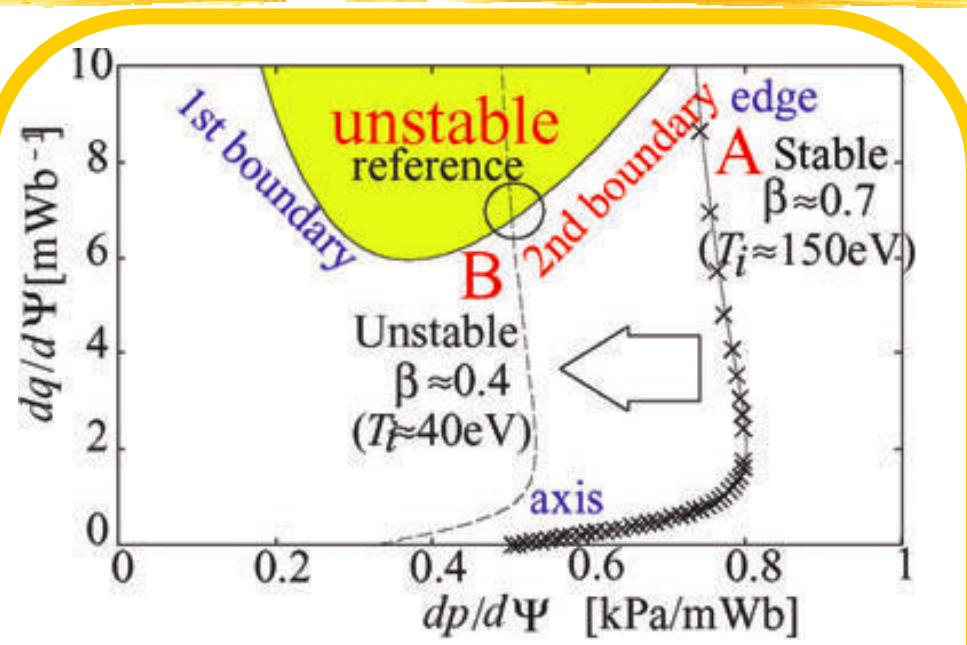
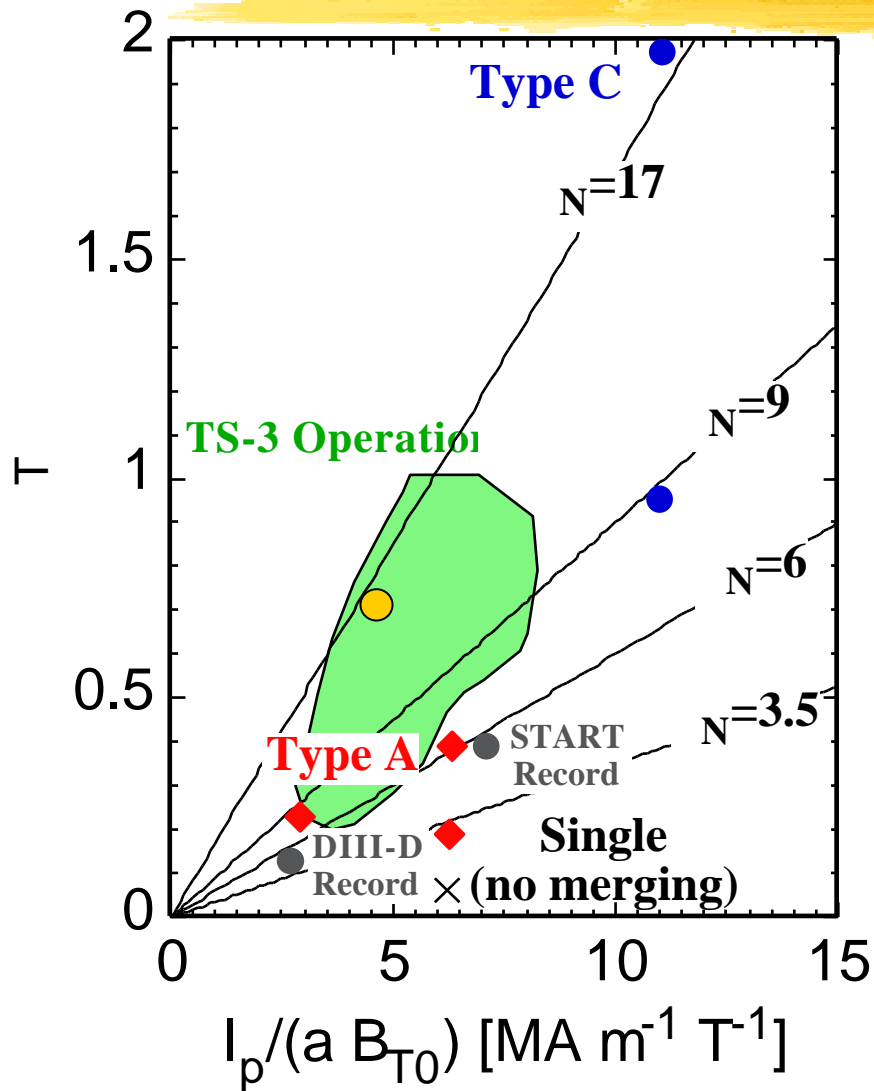
# -Type A (ST-ST Merging)-

$\langle \rangle_{volume} \sim 8.7\%$ ,  $N \sim 6.1$ ,  $q_{98} \sim 4.2$

Single(no merging) | -Type A (ST-ST Merging)-



# プラズマ合体生成 STの運転領域



cf. TS-3 Type-B(FRC-Bt) 生成STは第二安定領域に存在。



# まとめ

RFP- ST 合体 による高 ST生成の実証。

$\langle \rangle_{\text{volume}}$  30%、 $N \sim 18$ .

低 $q$ 運転に限られていることが課題。

Type A(ST-ST)合体により高ベータSTを安定に生成、維持するためのプラズマ端部 $q$ 値の下限 4。

$\langle \rangle_{\text{volume}}$  8%、 $N \sim 8$ .

クルスカルシャフラノフ限界により初期ST生成が困難な $I_{tfc}$ 領域を確認。

# 外部コイルを用いたプラズマ合体による高 ST 生成

