

QUESTのCHIとJT-60SAのディスラプションにおける プラズマ電流減衰に伴う高速電子生成に関する研究

オンサイト・ラボの体験談

九州大学大学院卒業
元木巧将

目次

- 研究背景
 - ・ 研究内容
 - ・ 九州大学での研究内容
 - ・ オンサイト・ラボ参加の背景
- オンサイト・ラボの活動
 - ・ オンサイト・ラボ制度について
 - ・ 参加から修論作成までの流れ
 - ・ 実習期間中の1日のスケジュール
- オンサイト・ラボの成果
 - ・ JT-60SAの実験データを用いた研究
 - ・ 中性子観測モニタを使用した放電分類
 - ・ CHI実験とJT-60SAの比較
- オンサイト・ラボから得られた知見

研究背景

研究内容

研究テーマ：

- プラズマ電流減衰に伴い生成される高速電子について実験研究

背景：

- トカマクのプラズマ電流が瞬断し、蓄積エネルギーが放出されるディスラプションの発生が懸念
 - 急激な電流減衰に伴いトロイダル電場(E_{tor})が生じ逃走電子(RE)が生成
- ↓
- ドライサ電場(E_D)が存在
- $E_{\text{tor}} > E_D (\propto n_e/T_e)$ を満たすとき電子は常に加速される状態となる
→ REが生成



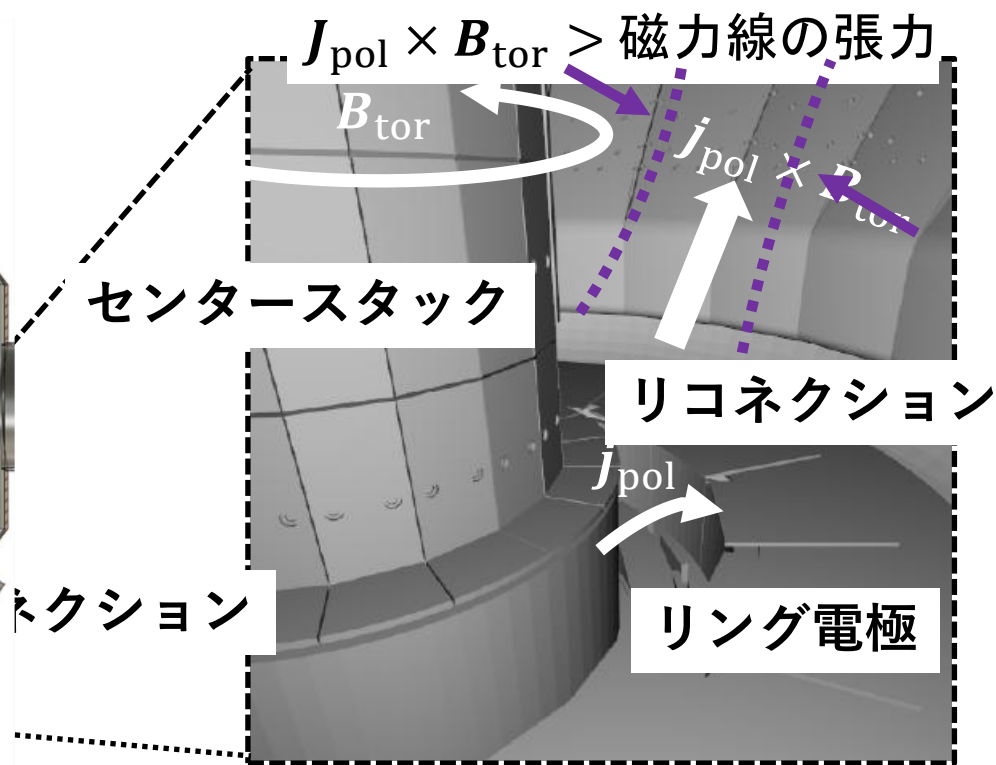
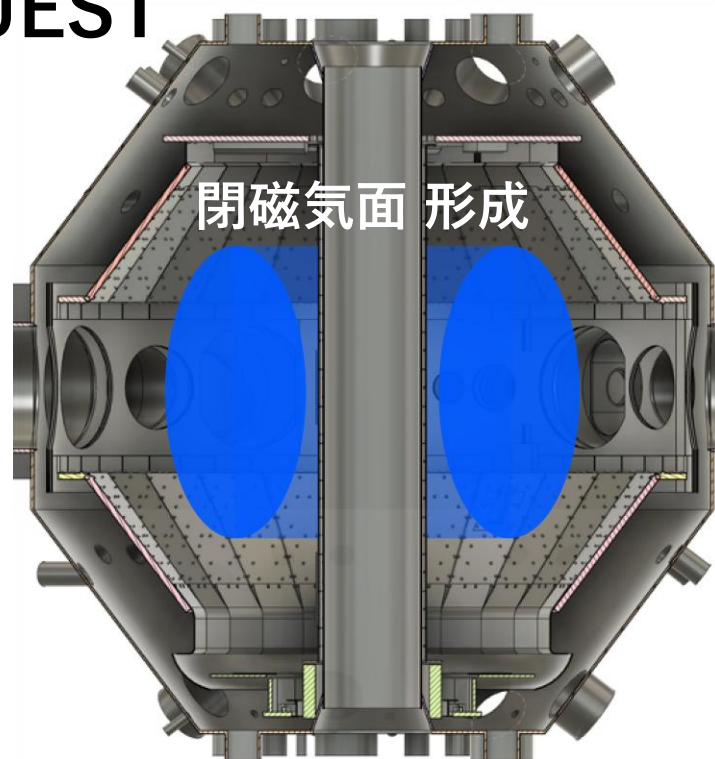
局所的な熱負荷により装置損壊の可能性

九州大学での研究内容

REを実験研究のためにディスラプションを積極的に引き起こすことは現実的ではない

→ QUEST(Q-shu Univ. Exp. with Steady-State Spherical Tokamak)で行われている非誘導電流立ち上げ手法の同軸ヘリシティ入射(CHI)を**模擬実験**として活用

QUEST

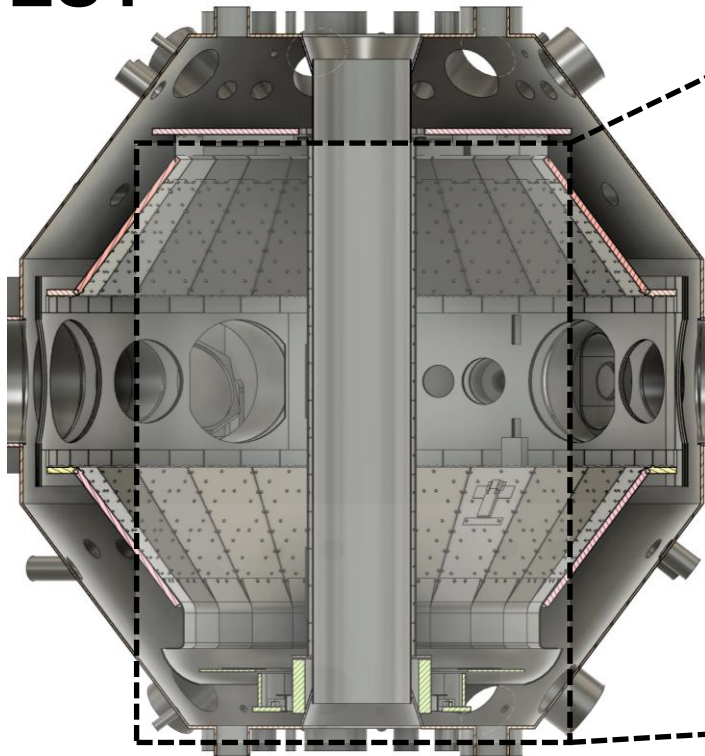


九州大学での研究内容

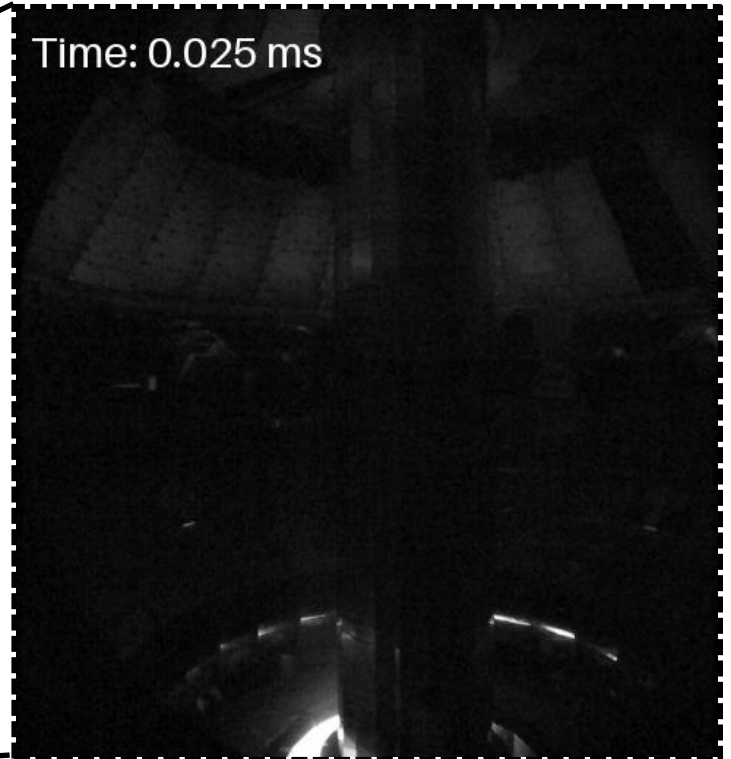
REを実験研究のためにディスラプションを積極的に引き起こすことは現実的ではない

→ QUEST(Q-shu Univ. Exp. with Steady-State Spherical Tokamak)で行われている非誘導電流立ち上げ手法の同軸ヘリシティ入射(CHI)を**模擬実験**として活用

QUEST



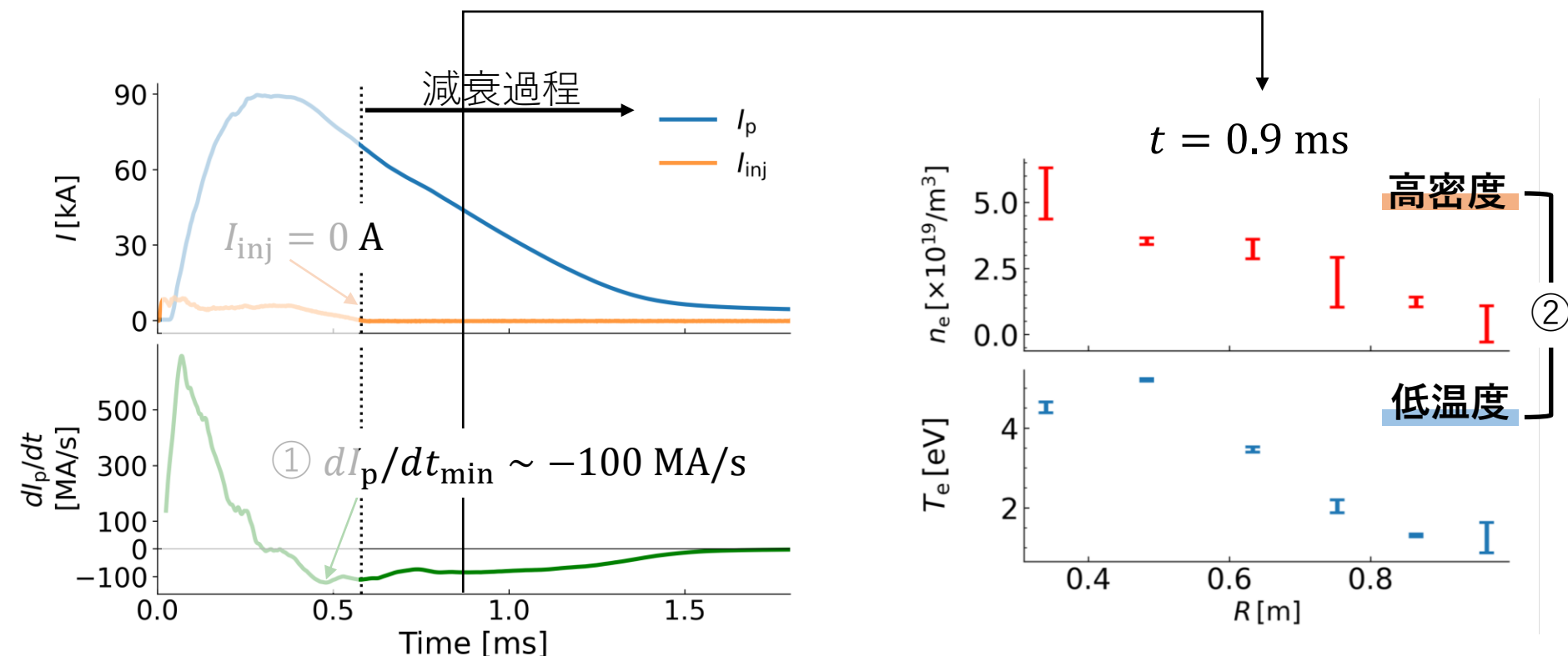
Time: 0.025 ms



九州大学での研究内容

なぜCHI？：

- ① 速い電流の時間変化→電流減衰率が大きい
- ② ディスラプションの熱崩壊以降の特徴的なパラメーター(高密度、低温度)と類似



オンサイトラボ参加の背景

オンサイト・ラボ参加目的：

- **スケールを超えた物理理解の探求**

CHI実験で得た知見をJT-60SAの実機スケールのディスラプションと結びつけ、スケールを超えた共通の物理を明らかにしたい

- **現場での学び**

論文調査では得られない実データの解析を行い、実践的なスキルと現実的な理解を深めたい



- **JT-60SAを用いた研究**

- **人材育成**

が可能なオンサイトラボに参加をし、目的達成を目指した

—— オンサイト・ラボの活動

オンサイト・ラボについて



JT-60SAへの研究参加フローチャート



量研 国内の大学等のより引用 (<https://www.qst.go.jp/site/jt60/onsite-lab.html>)

実習生としてオンサイト・ラボに参加

- 那珂研究所に滞在しより身近にSAの研究が可能
- 人材育成に重きを置いているため、自身のスキル深めることが可能

参加から修論作成までの流れ

CHIとJT-60SAの比較をモチベーションに
オンサイト・ラボ参加

実習テーマ決定

- 事前にQSTの研究者と議論
- JT-60SA試運転時のディスラプションデータ解析を行うことを合意

那珂研究所に実習(1ヶ月間)

- JT-60SAチーム統合解析Gと共に活動
- QSTの研究者と議論
- 研究に集中した環境 (学生一人だけ,,)

成果報告会 / 報告書作成

- 実習成果をJT-60SAチームの研究者へ発表&議論
- 次の実習生のために報告書を作成

修士論文に研究内容を記載

- 成果報告会での議論を基にさらに解析を行い修士論文にまとめた

実習期間中の1日のスケジュール

- 9:00 研究開始
- 10:00 指導教員と議論
- 14:00 JT-60SAの研究者と議論
- 15:00 データ解析
HP作成
- 18:00 退所
- 20:00 自由時間



議論の様子
(w/指導教員、SA研究者)



オンサイト・ラボ参加者へ
情報共有サイト



Tokai Mirai Base(宿舎)



宿舎の作業スペース

—— オンサイト・ラボの成果

JT-60SAの実験データを用いた研究内容

解析対象：

- JT-60SAの試運転時に観測されたディスラプション

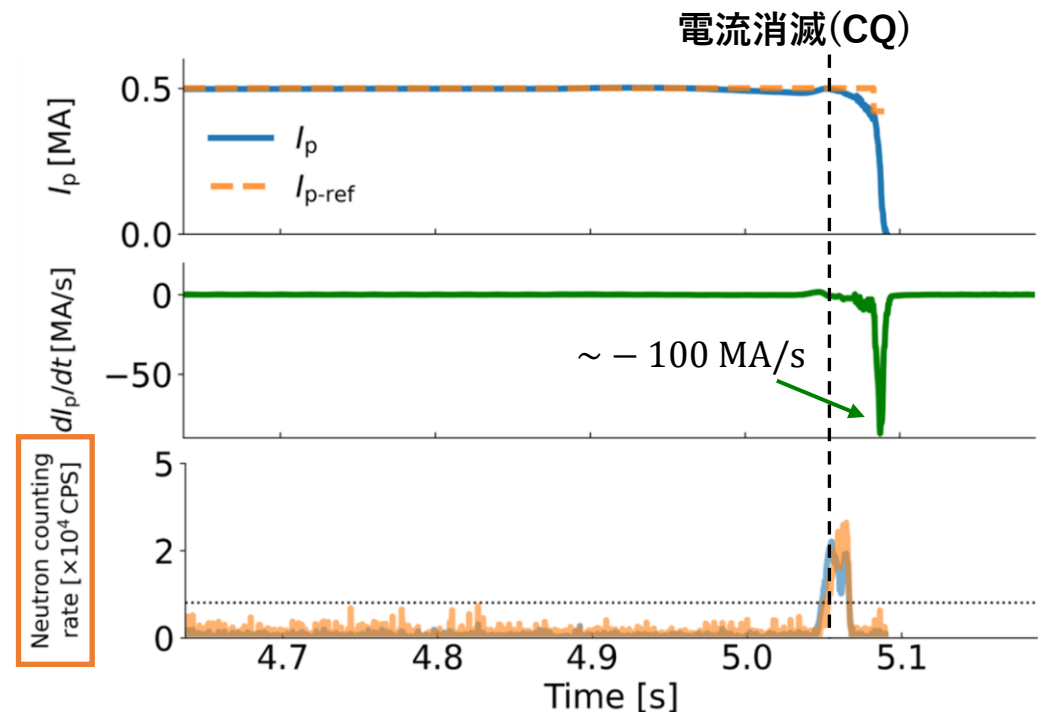
比較のための物理量：

- CHI実験で計測した I_p 、電流減衰率、**HXR**、周回電圧、 n_e 、 T_e を比較

JT-60SAにHXR計測装置が未設置

中性子計測装置(NFM)で代替

※10 MeV以上の高速電子が壁に衝突すると中性子が放出 [1]



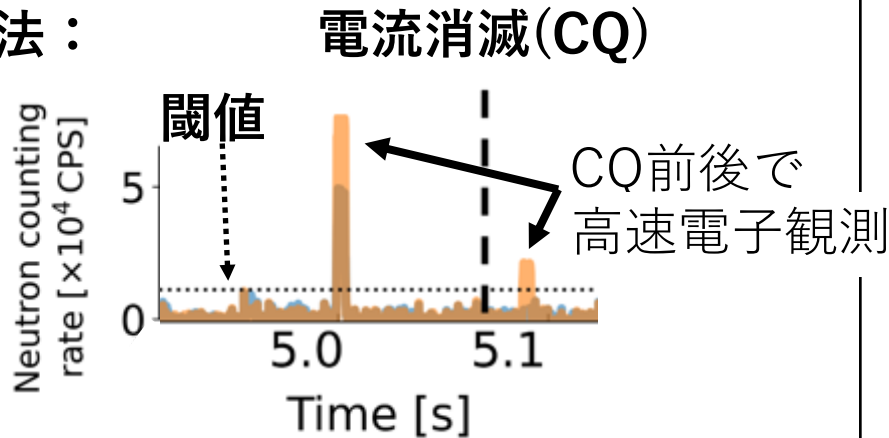
[1]: A. M. Sukegawa *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **136**, 1653 (2018).

中性子観測モニタを使用した放電の分類

新規分類方法を考案：

- NFM信号を使用し、REの生成状況を評価→ 放電ごとに分類

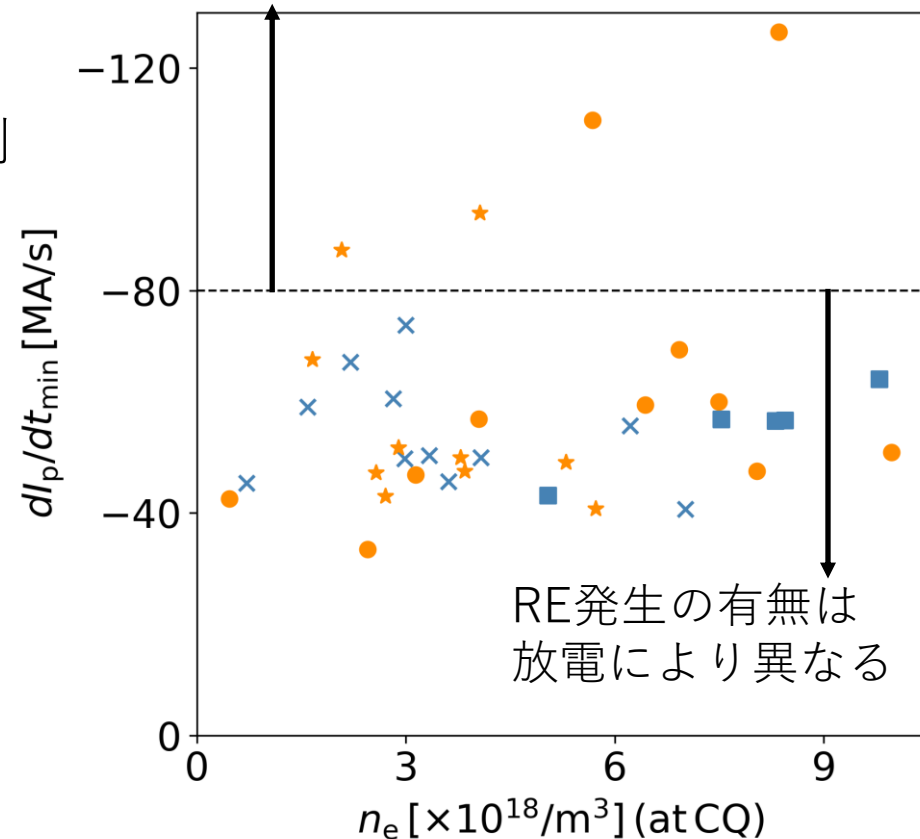
方法：



CQより前	CQ時	Type
×	×	A (×)
×	○	B (★)
○	×	C (■)
○	○	D (●)

REを観測

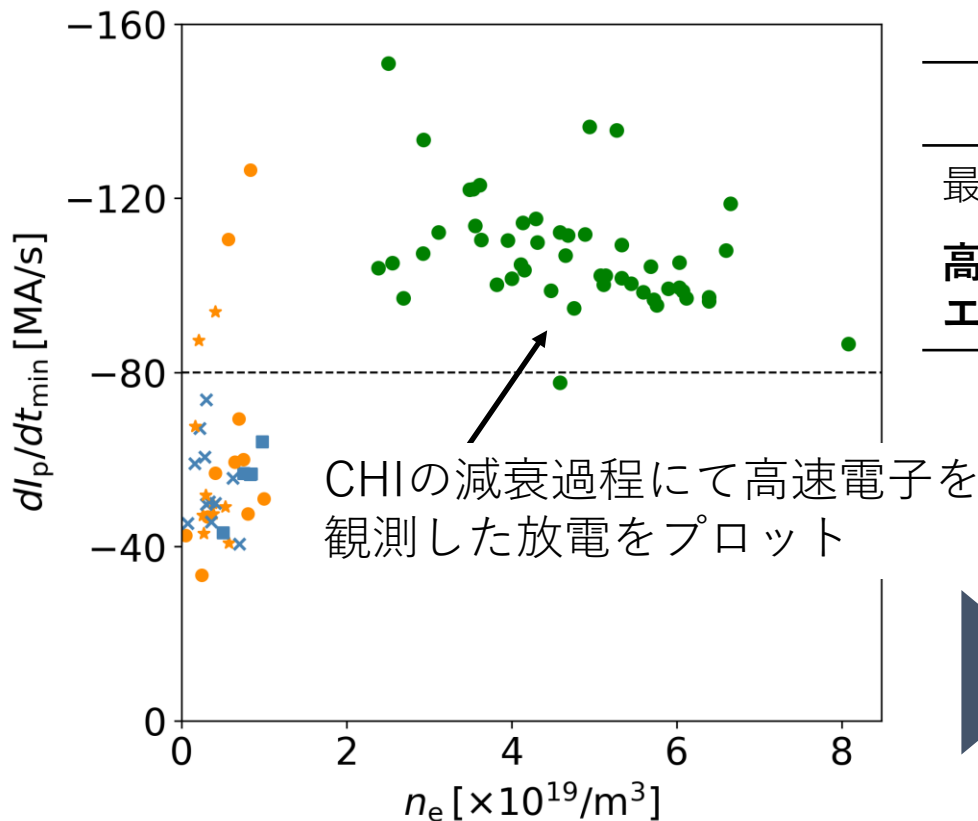
結果： $dI_p/dt_{\min} \leq -80$ MA/s ではすべての放電でRE発生



CHI実験とJT-60SAの比較

CHI実験とJT-60SAの比較：

- 提案した新規分類方法を用いて、CHI実験の結果を反映



装置間における相違点

	CHIプラズマ	JT-60SA
最大 I_p	~100 kA	~1 MA
高速電子のエネルギー	~20 keV ≤	~10 MeV ≤

両装置で共に


$dI_p/dt_{\min} \leq -80$ MA/s で
高速電子およびREを観測

—— オンサイト・ラボ参加により得られた知見

オンサイト・ラボ参加により得られた知見

Outcome（得られた経験・スキル）：

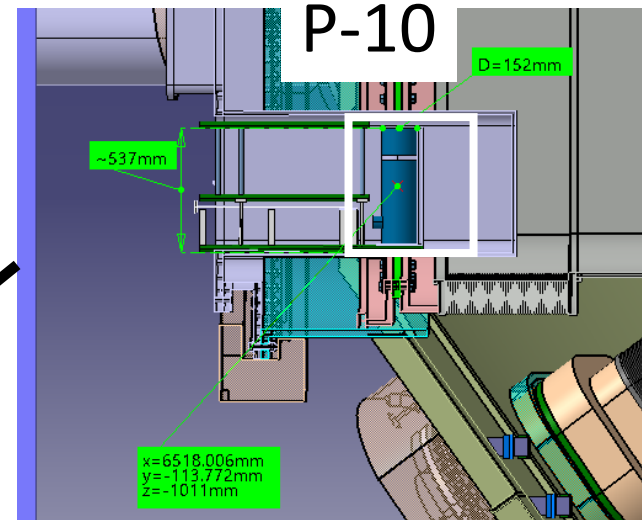
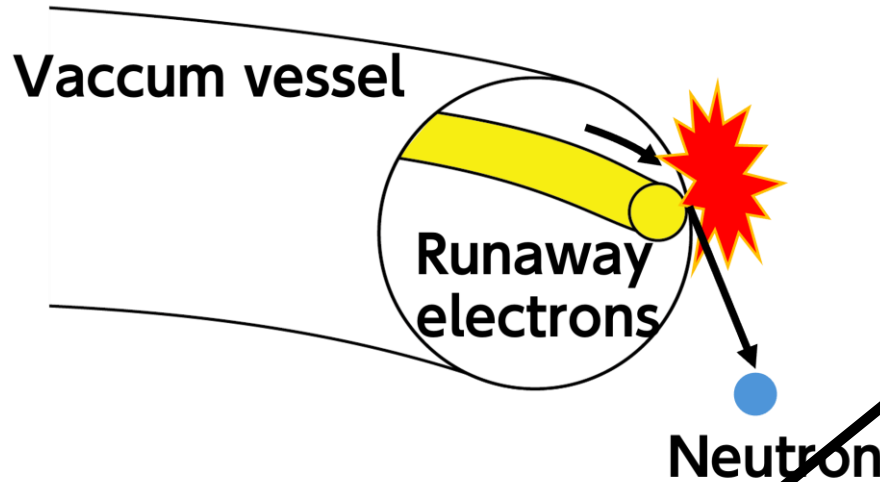
- データ解析から解釈まで一貫して行うことで、ディスラプションや計測機器の理解が深化
- 限られた期間で成果を出すための、効率的な作業プロセスを習得
- 日常的に議論する環境に身を置いたことで、論理的に説明し議論する習慣が定着
 - 社会人となった現在でも活かせる、普遍的なスキルを獲得



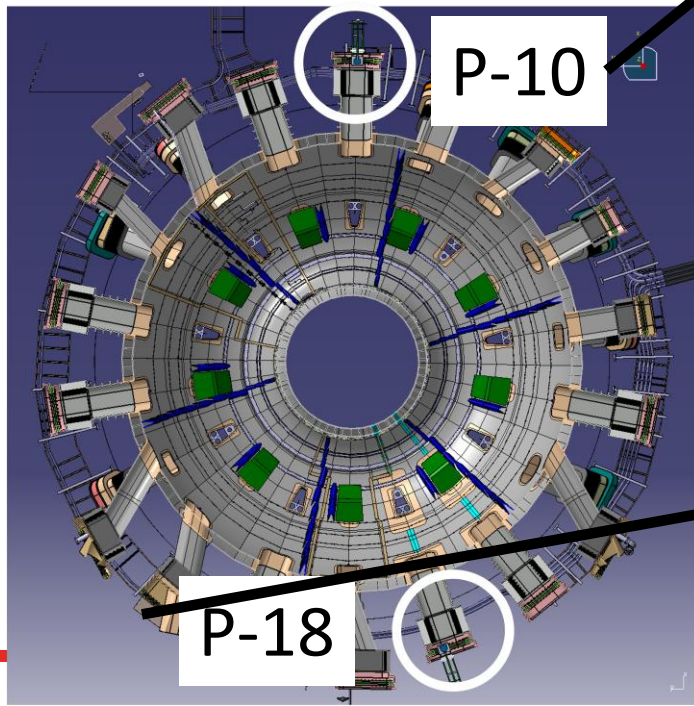
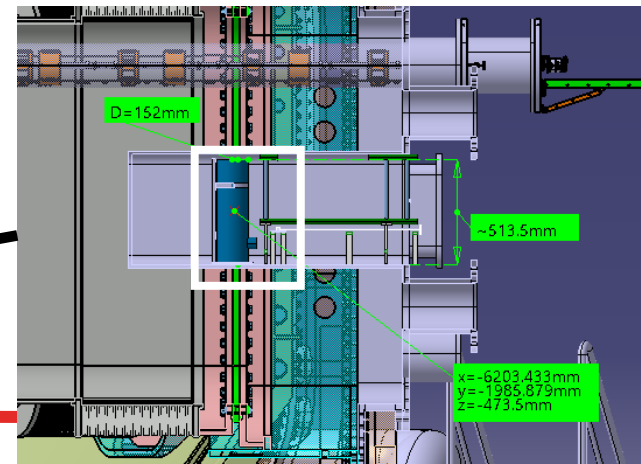
世界的な核融合装置JT-60SAに触れながら、
研究とスキルの両面で成長できる
オンサイト・ラボ制度をご活用ください

Appendix

Neutron Flux Mesurment



P-18

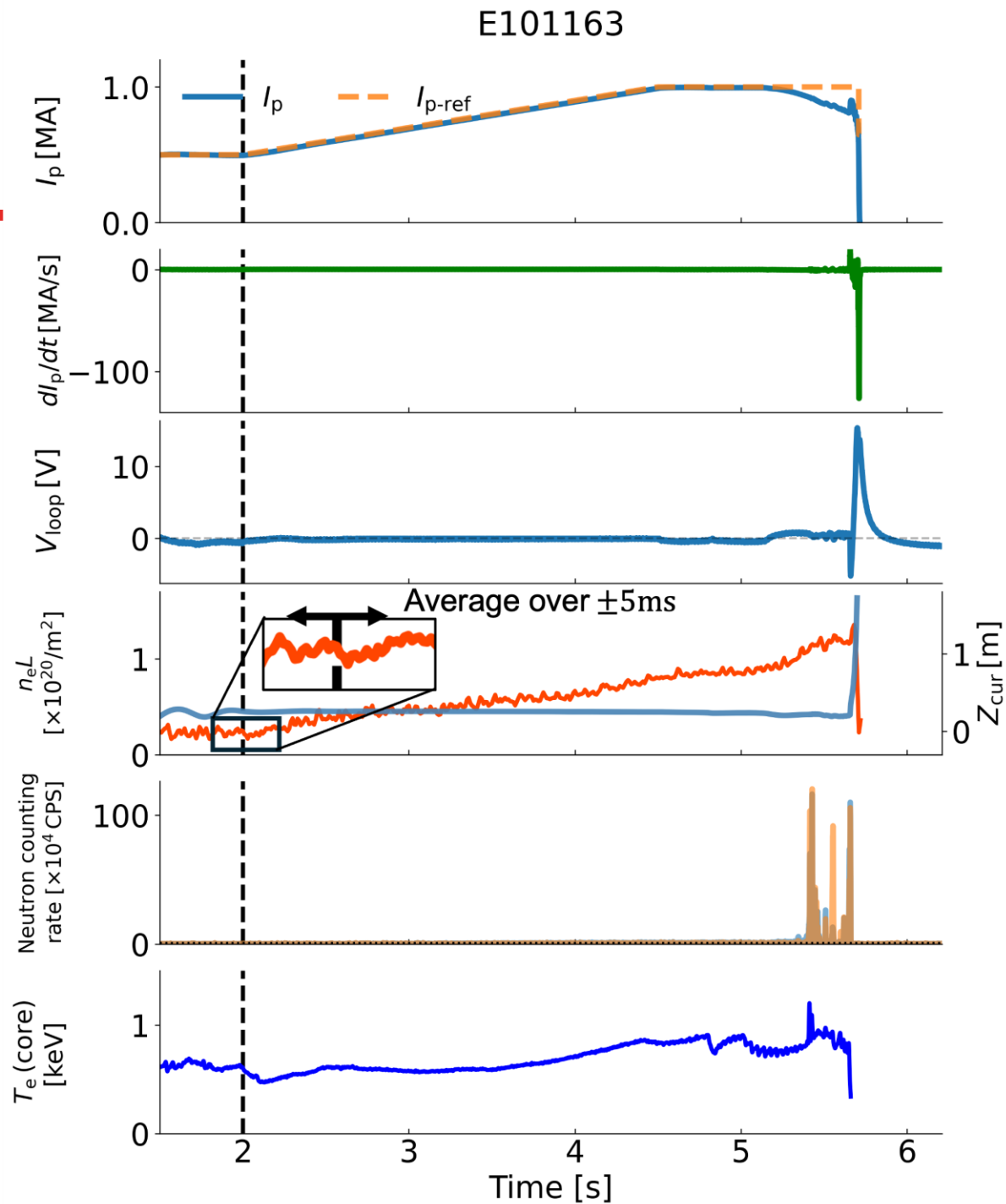


Type 観測数

Total 37: FT

NFM signal timing	Type	Discharge counts
No NFM	A	11
During CQ	B	10
Before CQ	C	5
Before and During CQ	D	11

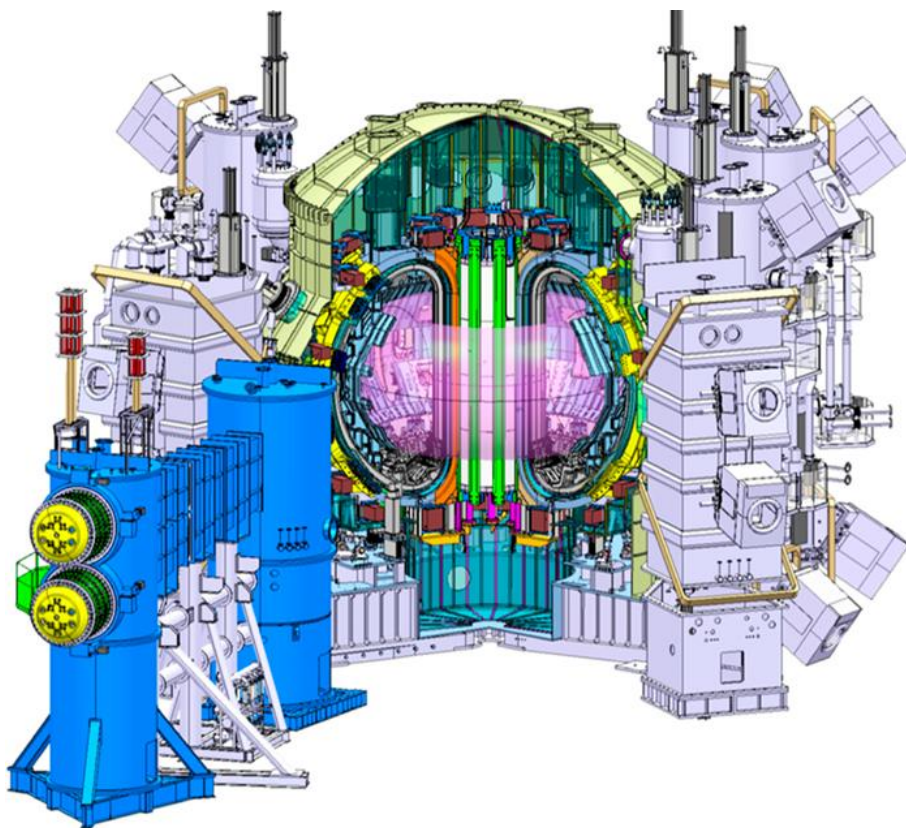
典型的な放電



放電映像

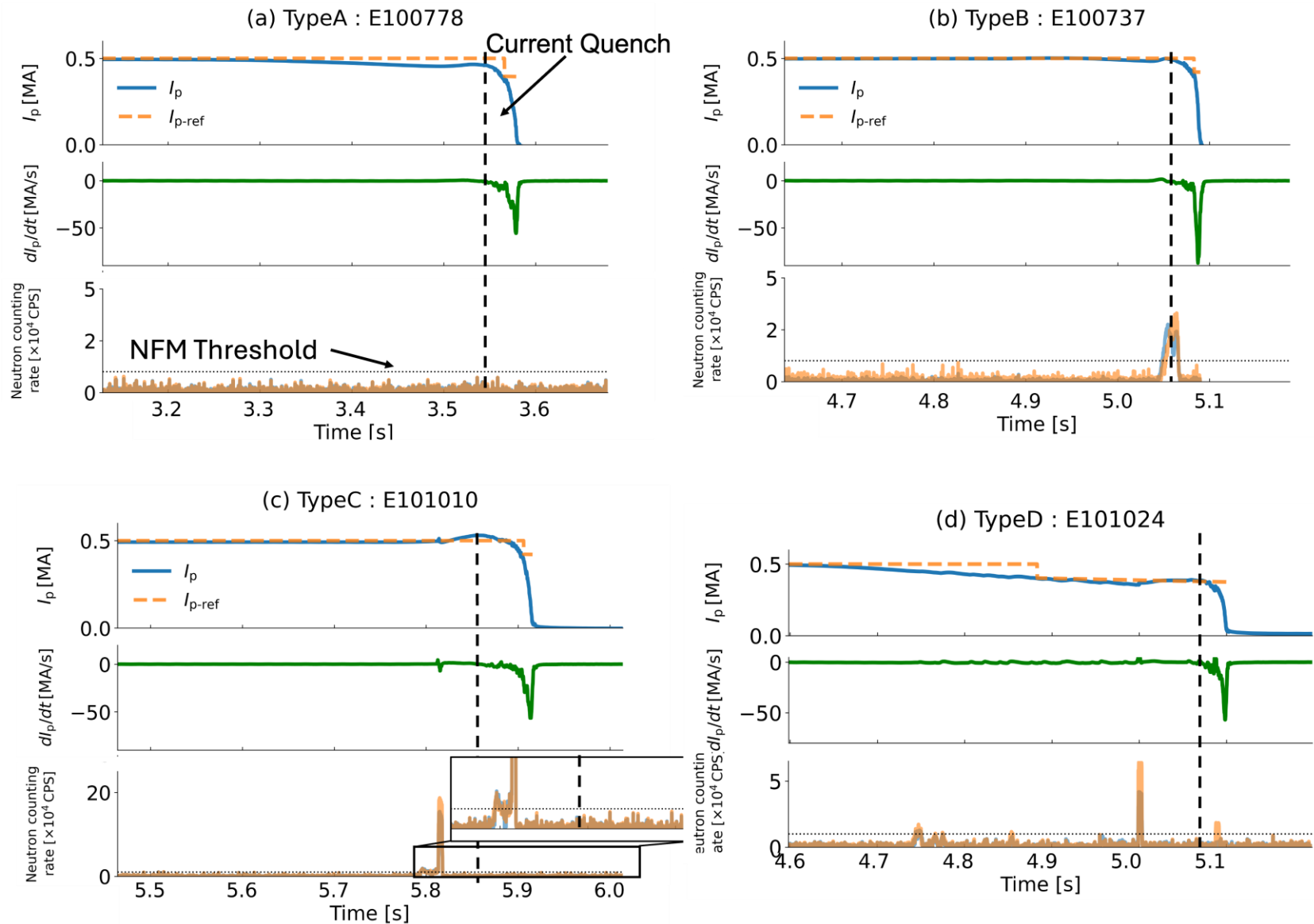


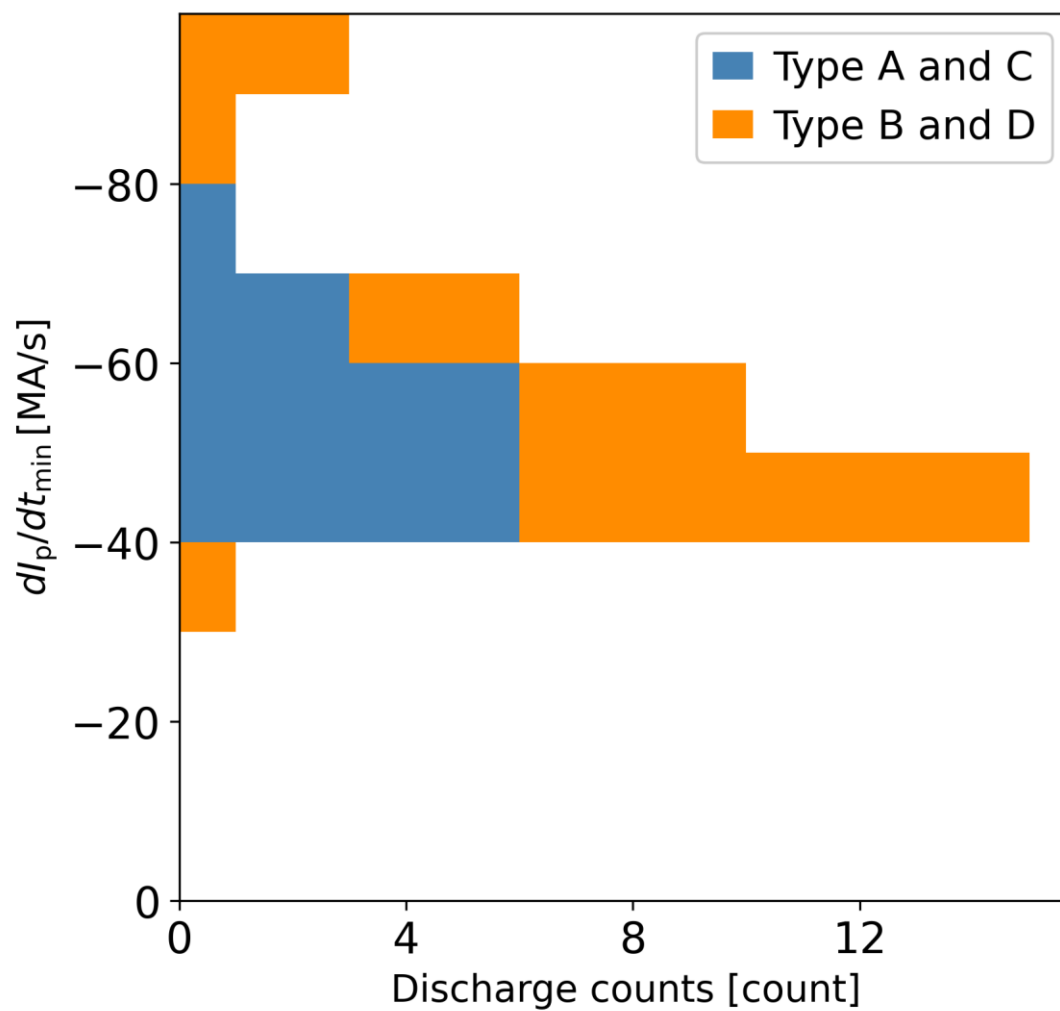
JT-60SA パラメータ

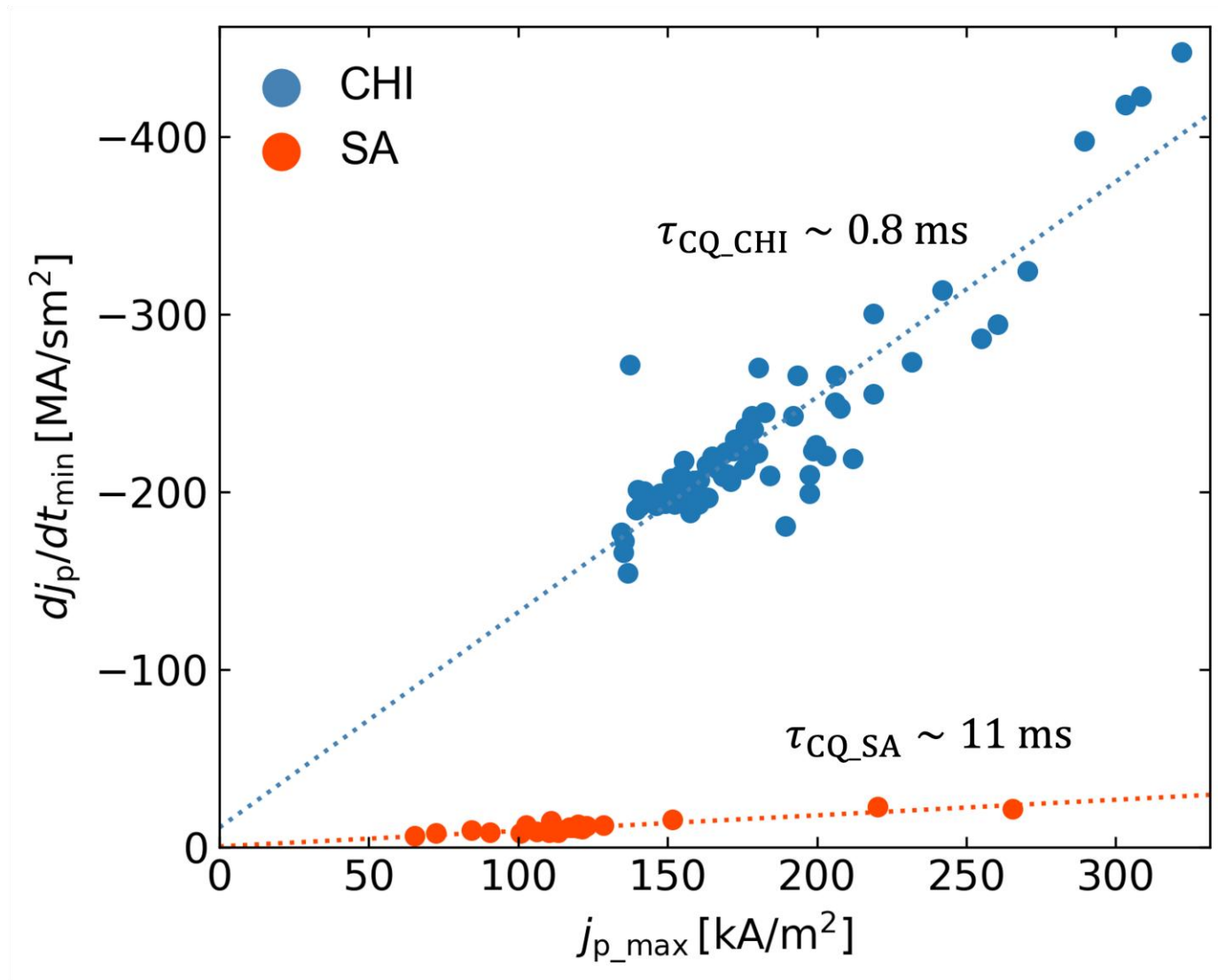


Parameters	Values
Plasma current	5.5 MA
On-axis toroidal field	2.25 T
Major radius	2.97 m
Minor radius	1.18 m
Aspect ratio	2.5
Flat-top duration	100 s

SA Type



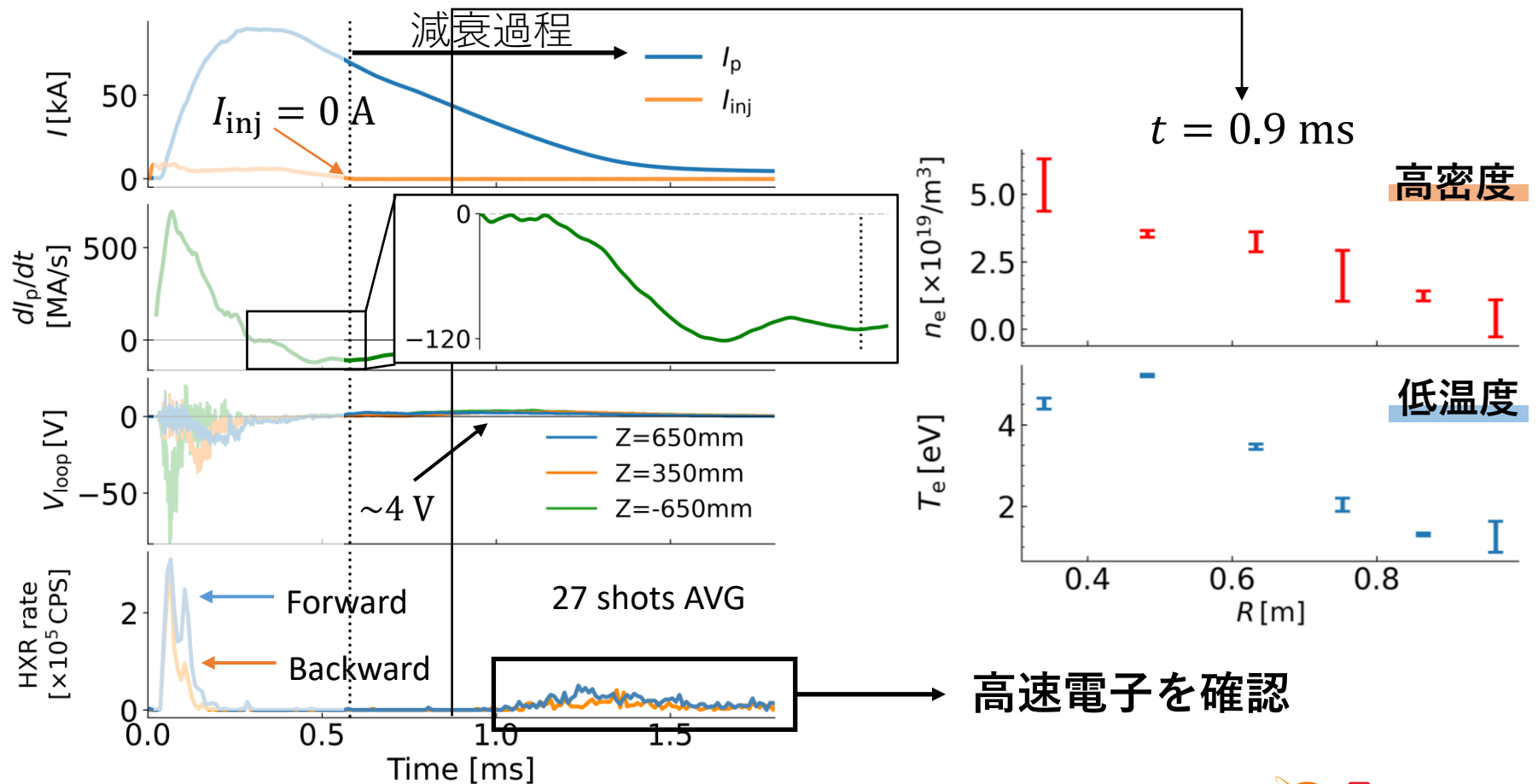




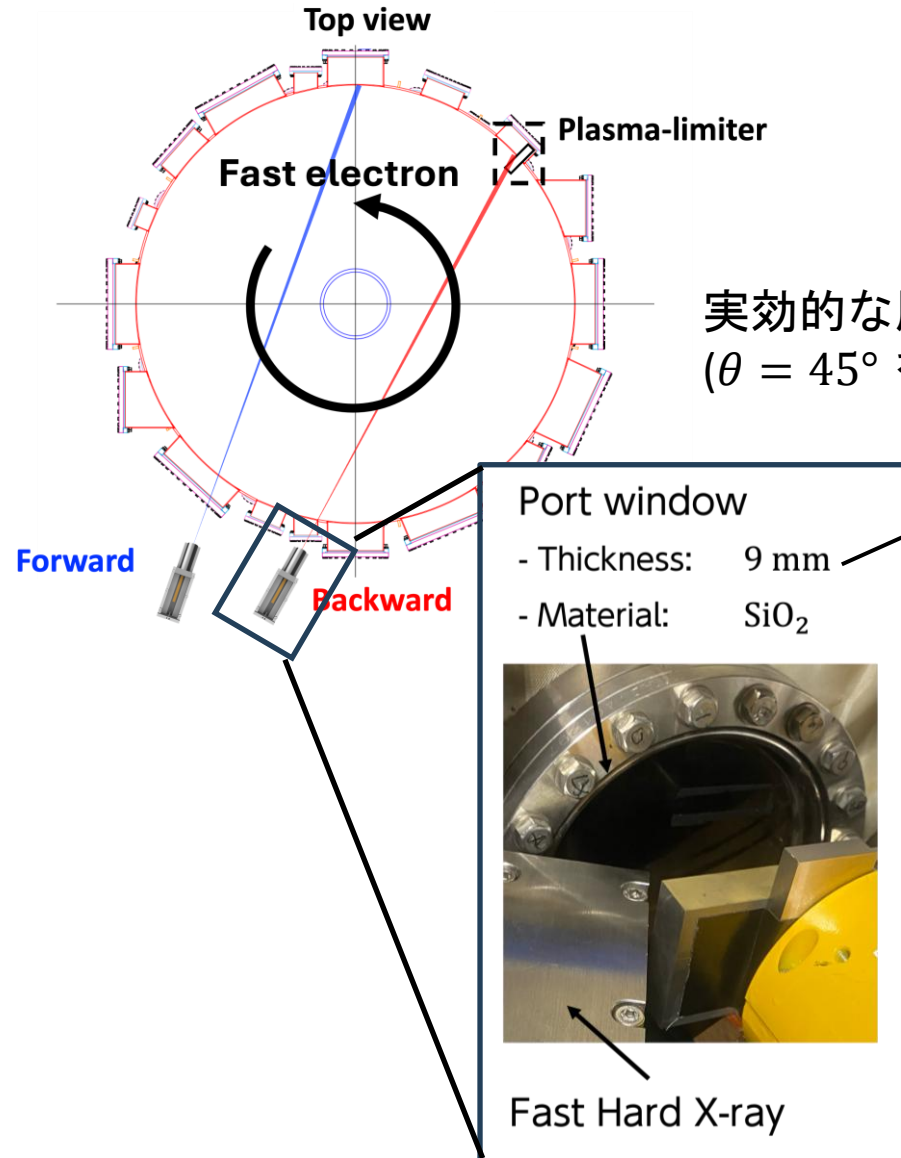
九州大学での研究内容

なぜCHI実験？（前提：減衰過程に着目）：

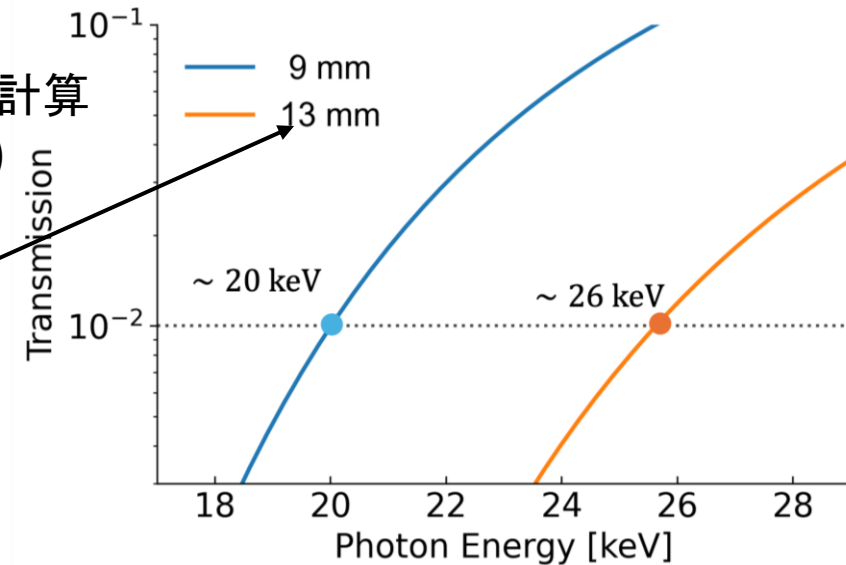
1. 速い電流の時間変化→電流減衰率が大きい
2. ディスラプションの熱崩壊以降の特徴的なパラメーター(高密度、低温度)と類似



電流減衰に伴う高速電子をHXR 検出器にて計測 概算の結果, 計測HXRは 26 keV



実効的な厚さを計算
($\theta = 45^\circ$ を想定)



▶ ポート窓の厚みから計測HXRは
26 keV 以上

まとめ

背景：

- プラズマ電流減衰に伴い生成される高速電子について実験研究
 - 九大：CHI実験
 - オンサイトラボ：JT-60SA
- CHI実験とJT-60SAの比較を目的にオンサイト・ラボに参加

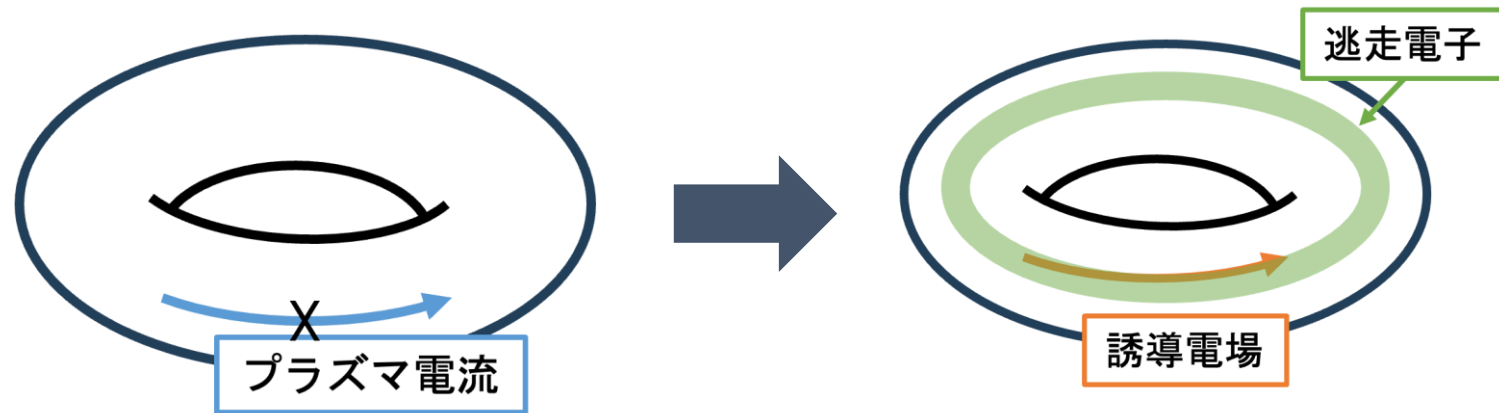
成果：

- 中性子観測モニタを使用し、REの生成を評価
 - 電流減衰率と電子密度に着目し、放電を分類
- 両装置共に $dI_p/dt_{\min} \leq -80 \text{ MA/s}$ で高速電子 / REを観測した

 **この値が電流立ち下げ時に
逃走電子生成の目安となる可能性が示唆**

逃走電子

- トーラス周回方向電場により加速され続ける過程により、そのエネルギーが数MeV~数10MeVにまで高められた電子[1]
- JETでは、 $I_p = 2 \text{ MA}$ のディスラプションが発生した際には、 0.6 MA の電流が逃走電子によって駆動されたことが報告[2]



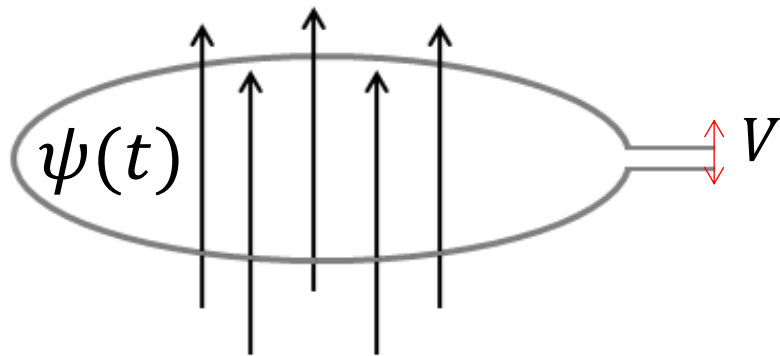
[1]H. Knoepfel and D.A. Spong, *Nucl. Fusion* **19**, 785 (1996).

[2]J.A. Wesson *et al*, *Nucl. Fusion* **29**, 641 (1989).

誘導電場仕組み

ファラデー・マクスウェルの式

$$\oint_C E = -\frac{d\psi}{dt}$$



$$V = -\frac{d\psi}{dt}$$

ψ 減少 \rightarrow V 増加

