

一般講演 I

第15回若手科学者によるプラズマ研究会
日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所
2012年3月14 - 16日

**Current progress of the double-pass Thomson
scattering diagnostics on TST-2 spherical tokamak**
**TST-2球状トカマクにおける
ダブルパストムソン散乱計測の現状**

平塚 淳一、江尻 晶、長谷川 真¹、永島 芳彦¹、高瀬 雄一、東條 寛²、山口 隆史、
安保 貴憲、大迫 琢也、角田 英俊、加藤 邦彦、坂本 拓也、篠 遼太、新屋 貴浩、
曾根原 正晃、橋本 貴博、古井 宏和、若月 琢馬、渡邊 理

東京大学 ¹九州大学 ²日本原子力研究開発機構

発表内容

- 研究動機
- 球状トカマク装置TST-2
- ダブルパストムソン散乱計測システム
- 分布計測結果
- 誤差解析
- 電流分布計測の検討
- まとめ

研究動機

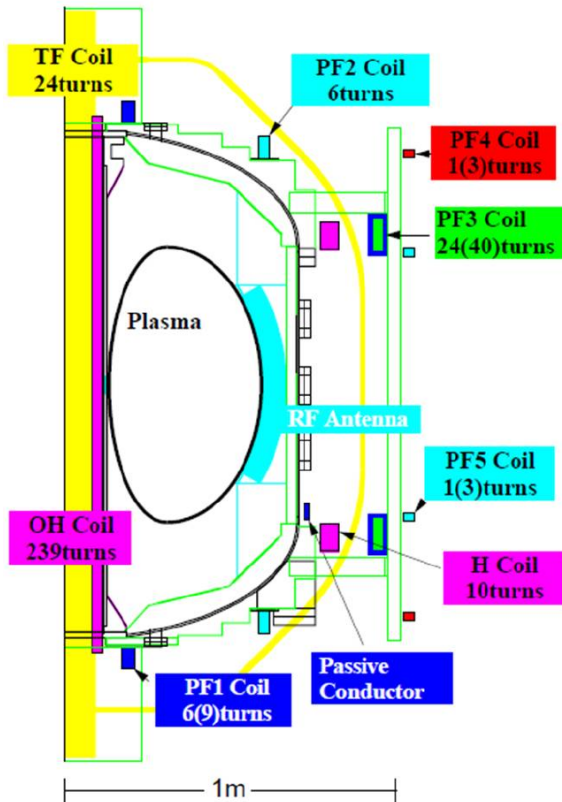
- トムソン散乱計測: 信頼性の高い T_e 、 n_e 計測手法
- 低密度プラズマ測定時: SN比の低下、プラズマ圧力非等方性
→ 正確な測定が困難
- マルチパストムソン散乱計測の利点
 1. 散乱強度の増強
 2. 圧力非等方性の直接測定→ 低密度プラズマ測定に適している

現在、TST-2装置のダブルパストムソン散乱計測システムを用いて

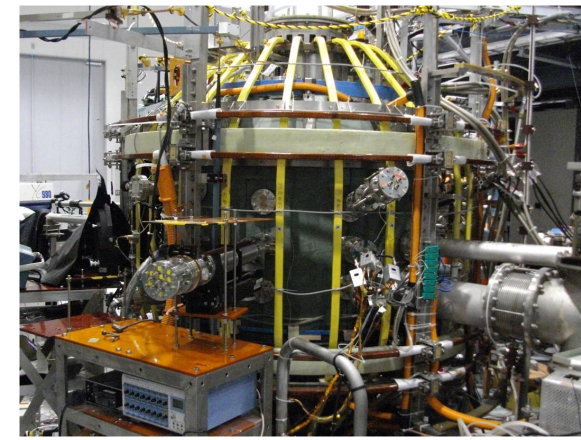
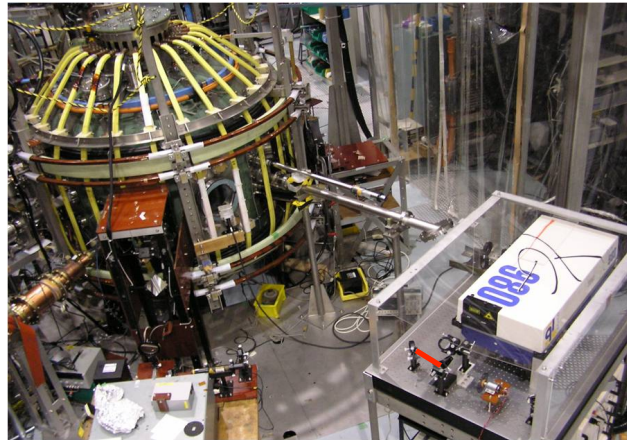
1. 圧力非等方性の直接測定の実証
2. 前方散乱・後方散乱を用いた測定誤差の減少の実証

を目指した研究を行っている

球状トカマク装置 TST-2



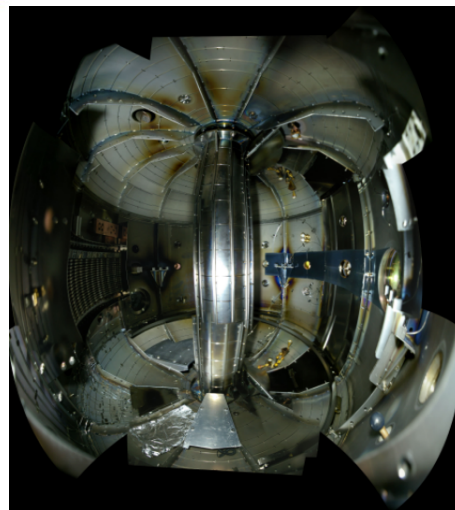
断面図



外観

<主なプラズマパラメータ>

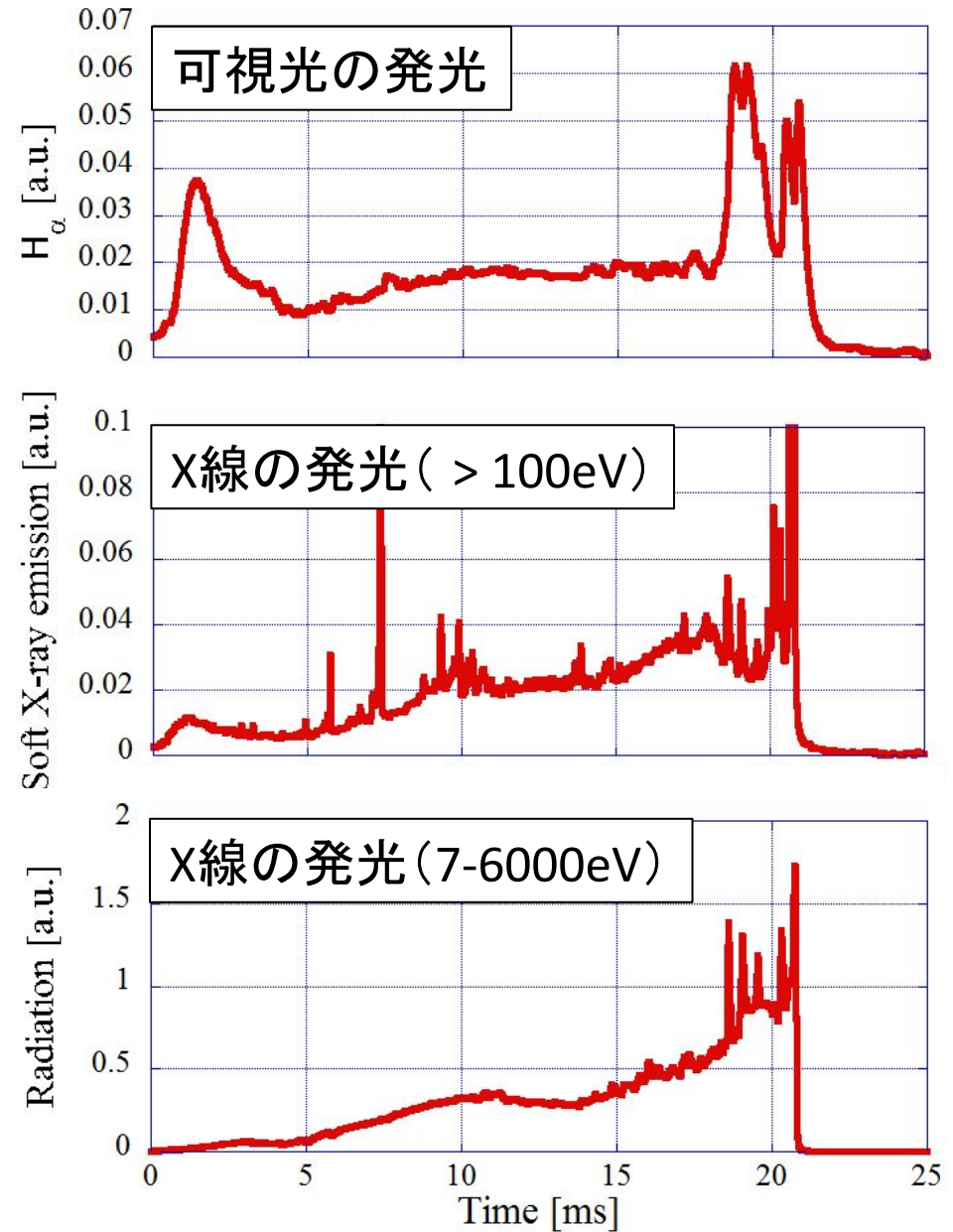
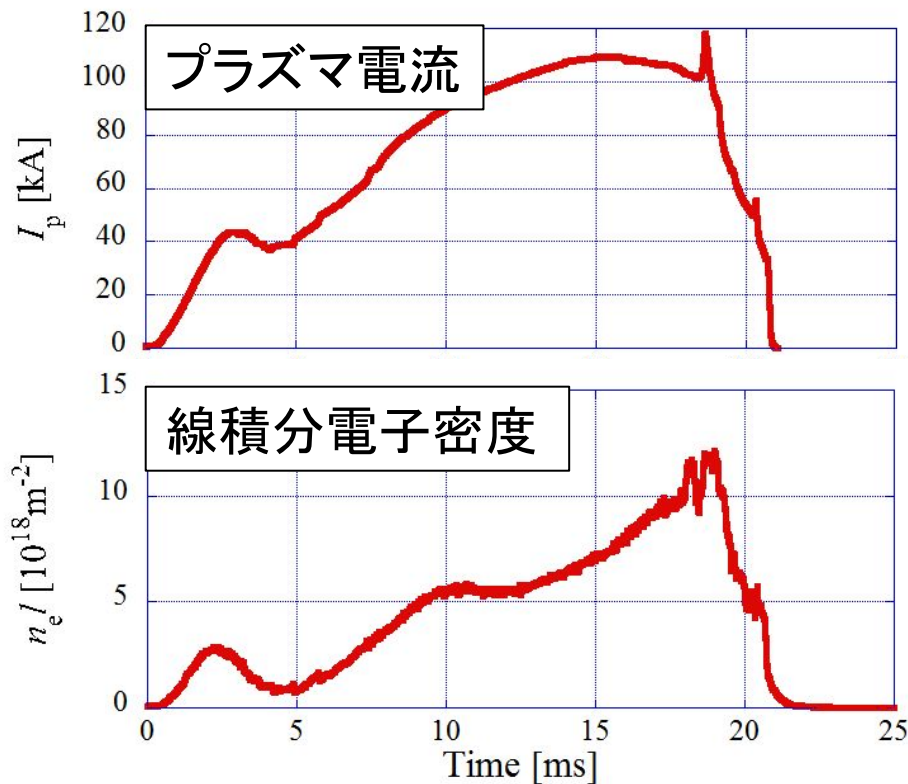
- ・ 大半径: $R < 0.38$ [m]
- ・ 小半径: $a < 0.25$ [m]
- ・ アスペクト比: $A = R / a \sim 1.5$
- ・ トロイダル磁場: $B_t < 0.2$ [T]
- ・ プラズマ電流: $I_p \sim 100$ [kA]
- ・ 放電時間: $\Delta t \sim 40$ [ms]
- ・ 電子密度: $n_{e0} \sim 10^{19}$ [m⁻³]
- ・ 電子温度: $T_e \sim 100$ [eV]



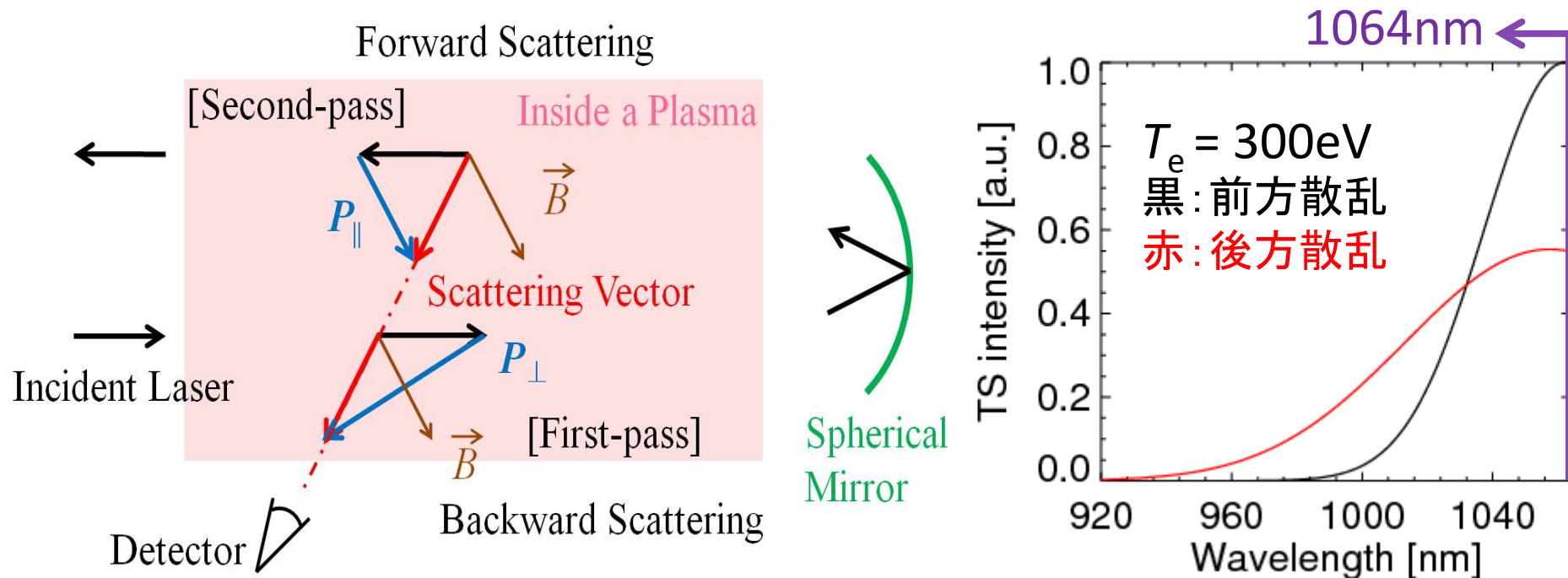
内部写真

TST-2装置:オーミック放電波形

典型的なオーミックプラズマ放電の時間発展

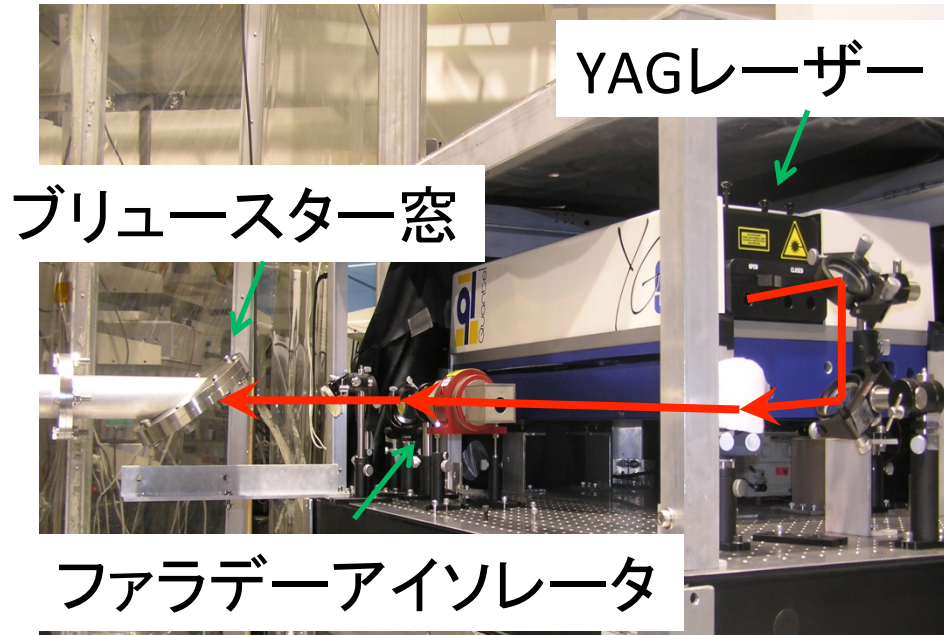


ダブルパス配位型トムソン散乱

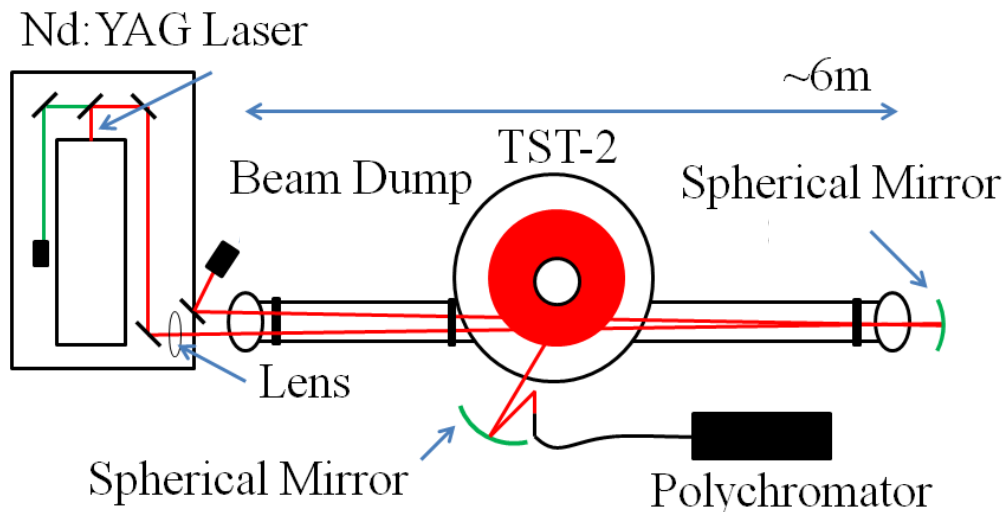


- レーザービームを球面ミラーにより1往復させる。
- 前方散乱と後方散乱でスペクトル波形が異なる。
- TST-2の配位では、後方散乱、前方散乱がそれぞれ P_{\perp} 、 P_{\parallel} に対応する。

ダブルパストムソン散乱計測システム

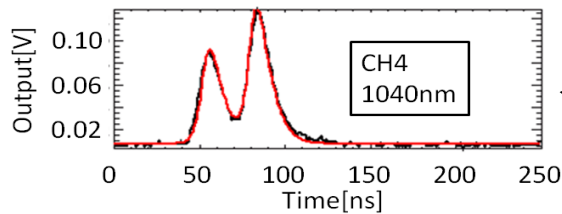
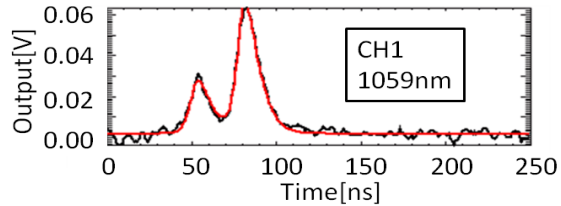


Nd:YAG レーザー (1064.14nm)
繰り返し周波数: 10 [Hz]
(プラズマ1放電に1回入射)
パルス幅: 10 [ns]
レーザーエネルギー: 1.6 [J]

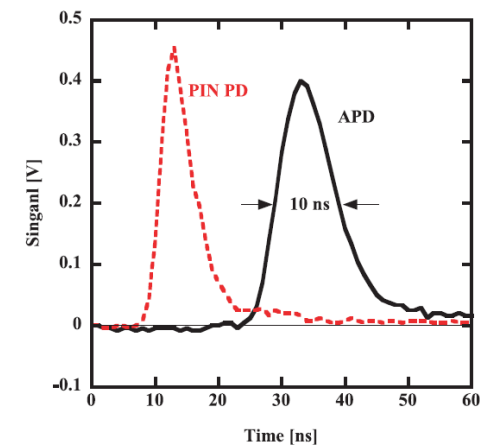
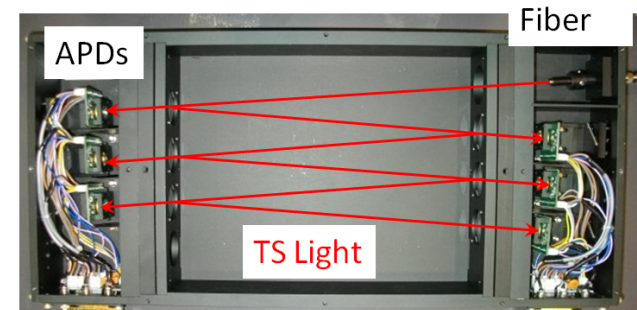
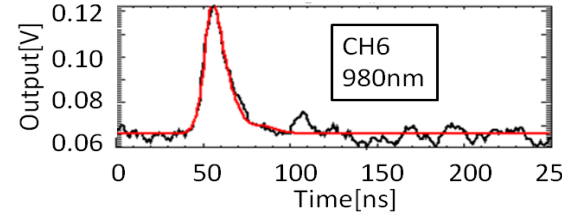
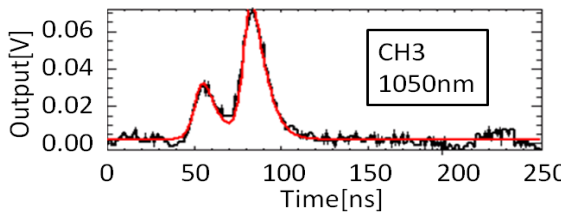
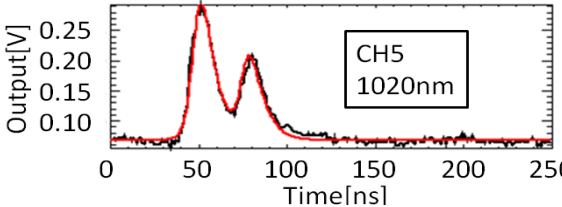
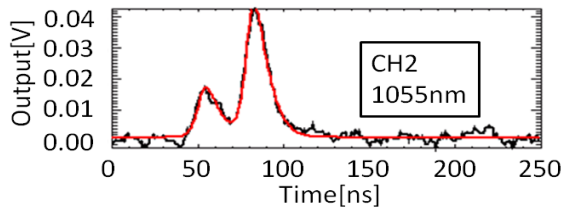


- 焦点距離2mのレンズでプラズマ内で集光させる。
- 戻り光による破損を避けるためファラデーアイソレータを使用。
- 往路と復路で測定位置が1cm程度ずれている。

典型的なダブルパストムソン散乱信号



黒: 生波形
赤: 波形フィッティング



- 高速低ノイズの検出回路
- 分光器: 波長6チャンネルのポリクロメータ
- 往復のトムソン信号2パルスをクリアに検出
- 往復の時間差は20-30ns
- ファイバー N.A. = 0.37 → S/N の向上

A. Ejiri, *et al.*,
Plasma Fusion Res. **5**, S2082 (2010)

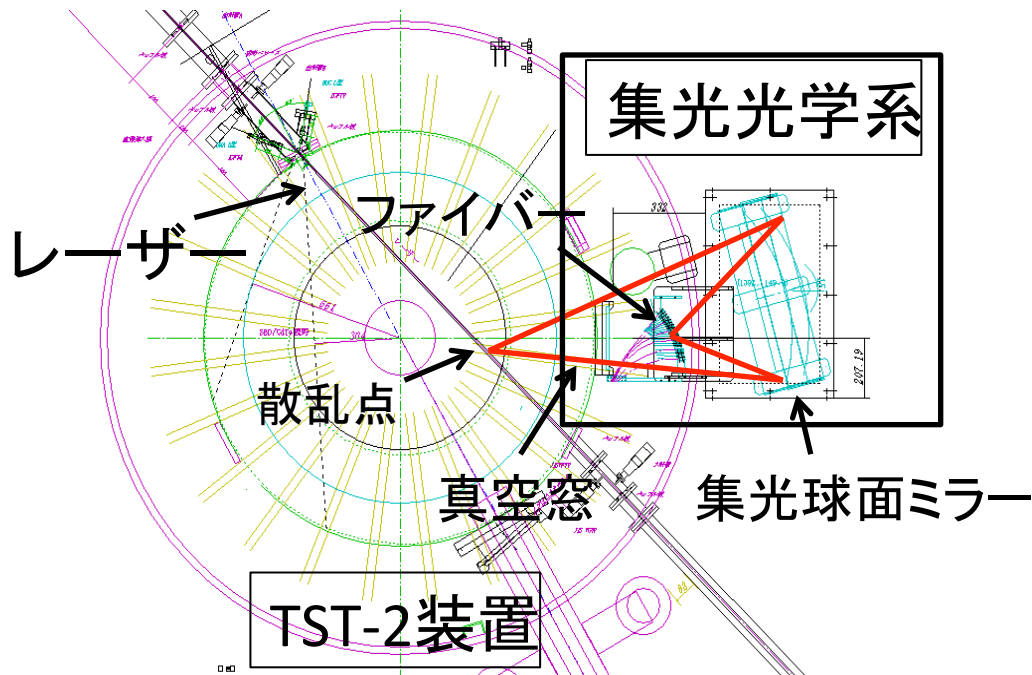
空間6点同時分布計測システム

ファイバー、ポリクロメータを増設 → 空間6点の同時測定
8chオシロスコープ3台: 6点測定の場合波長3チャンネルを使用

往路、復路の波長6チャンネルの信号: 12個の信号

↓ フィッティング

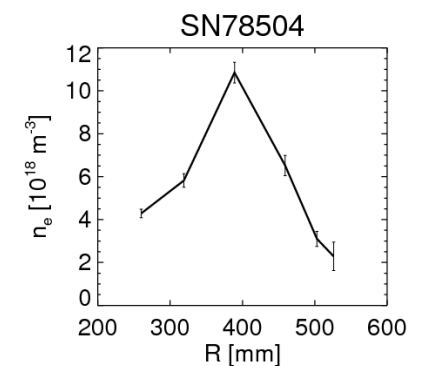
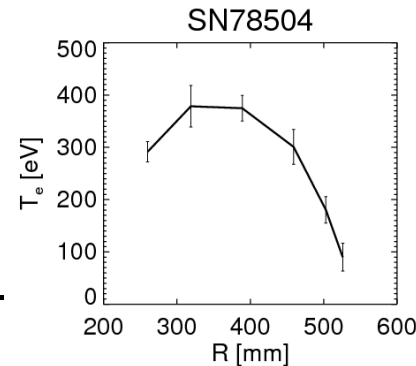
3変数: 電子温度 T_e 、電子密度 n_e 、光学系効率の比



6点同時計測

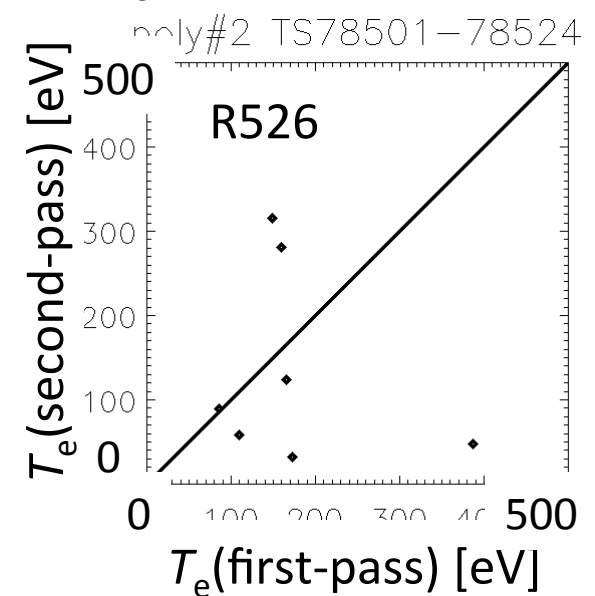
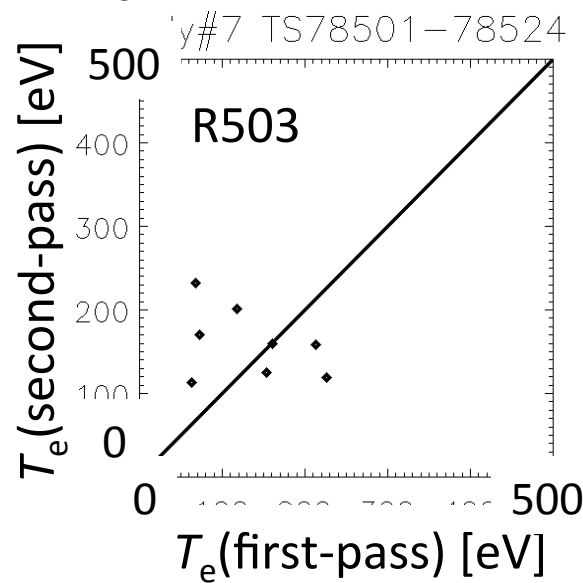
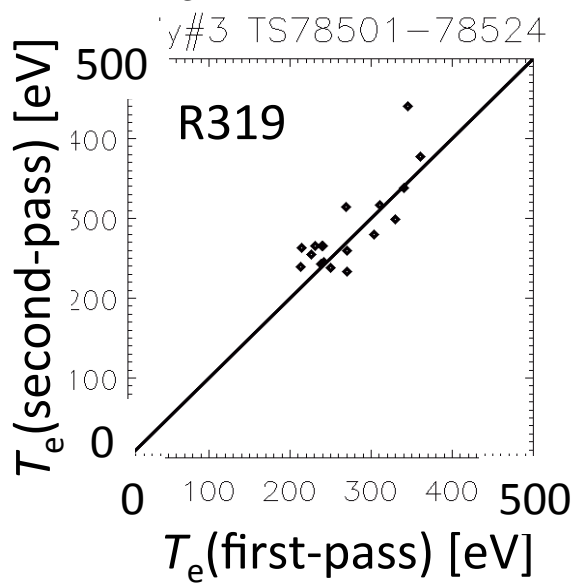
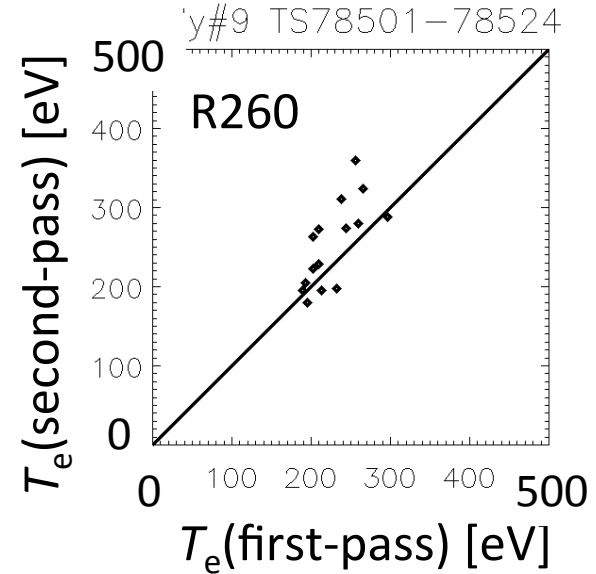
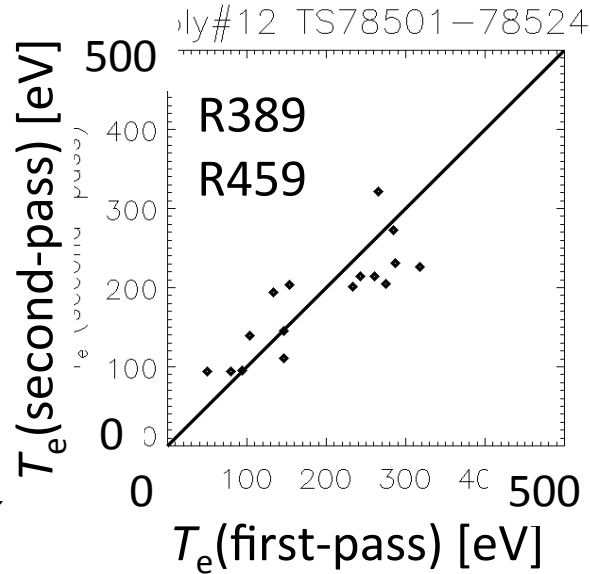
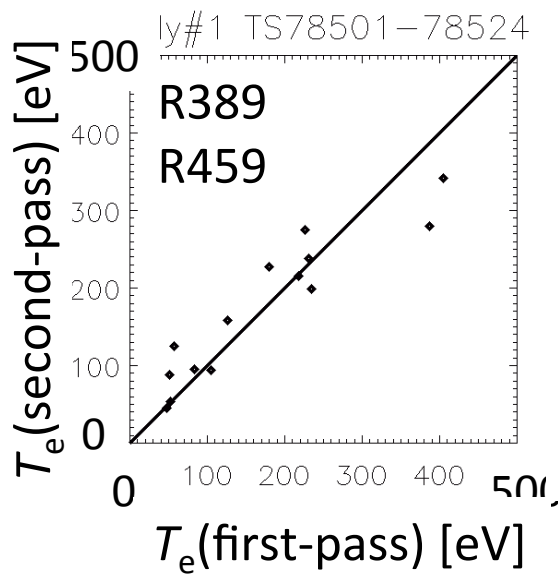
電子温度 T_e

電子密度 n_e



各点ともシングルパスに比べ
誤差が減る(15%→10%)ことを実証

衝突周波数 $\sim 20[\mu\text{s}] \rightarrow$ 非等方性なし



プラズマ外側ほど分散が大きいが、平均値は $T_{e,\text{first}} \sim T_{e,\text{second}}$

測定誤差の検討

測定される誤差について
光子数との関係を対数プロットした。

測定結果から

$$\frac{\delta N}{N} \propto N^{-1} \quad \frac{\delta T_e}{N} \propto N^{-2}$$

N: 検出された光子数

δN : Nの誤差

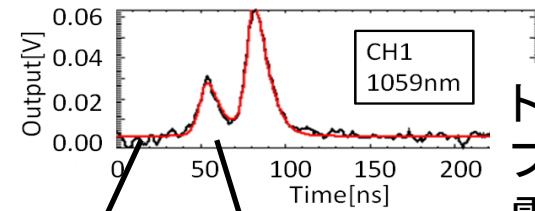
T_e : 測定された電子温度

現在の実験下では、支配的な
測定誤差は光子数によらない
固定ノイズ。原因として

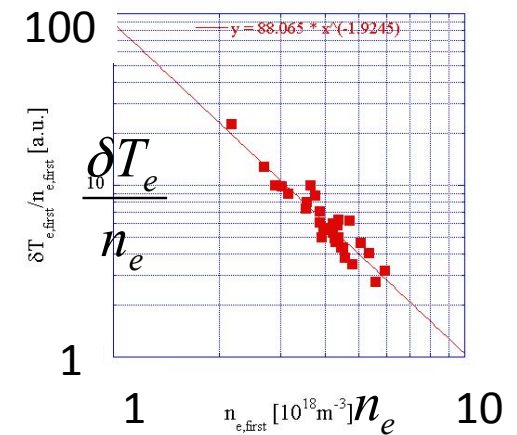
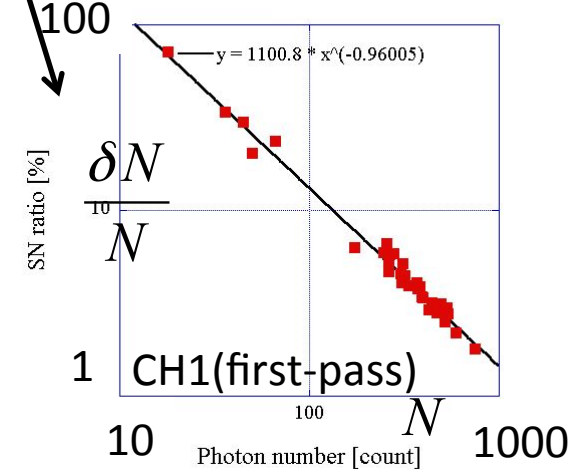
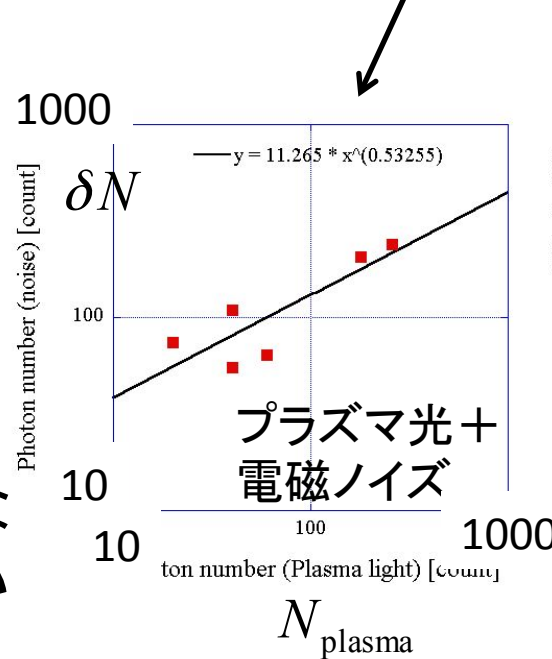
(i) プラズマ光の揺らぎ (ii) 電磁ノイズが支配的。

上記の固定ノイズとして

5-10[photons/ns] (20nsで100-200photons) 相当の
ノイズがあることがわかる。



トムソン光+
プラズマ光+
電磁ノイズ



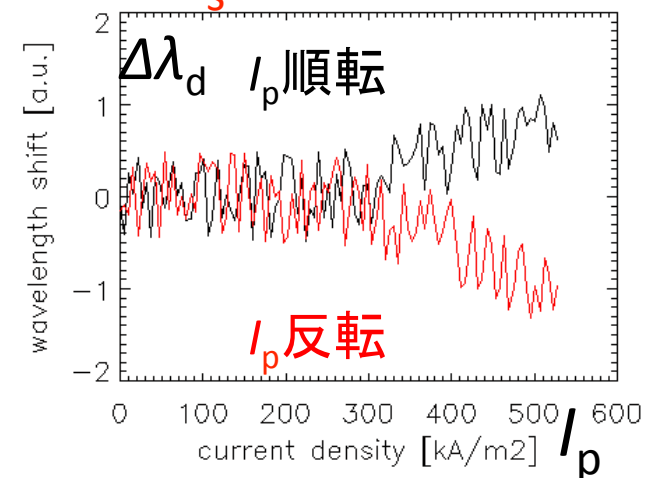
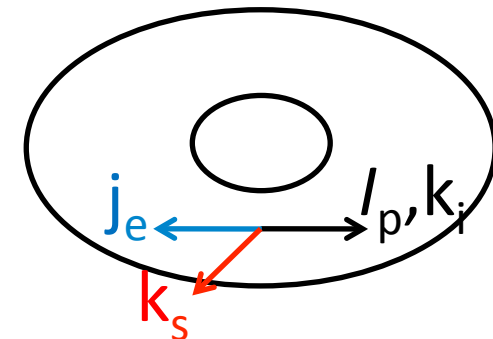
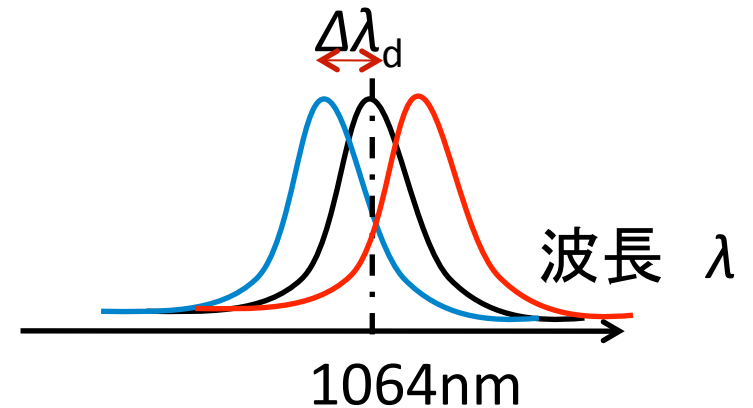
ダブルパストムソンによる電流分布測定の見直し

ダブルパスにより
測定パラメータ12個(波長6チャンネル×2)

以下の手順で波長シフト $\Delta\lambda_d$ を推定することを考える。

1. $\Delta\lambda_d = 0$ として後方散乱のみから $T_e \cdot n_e$ についてフィッティング
 2. 前方散乱について $\Delta\lambda_d$ を未知としてフィッティング
 3. 2.の $\Delta\lambda_d$ を使って後方散乱から $T_e \cdot n_e$ についてフィッティング
 4. 上記を繰り返す
- これを I_p 順転、反転について調べる

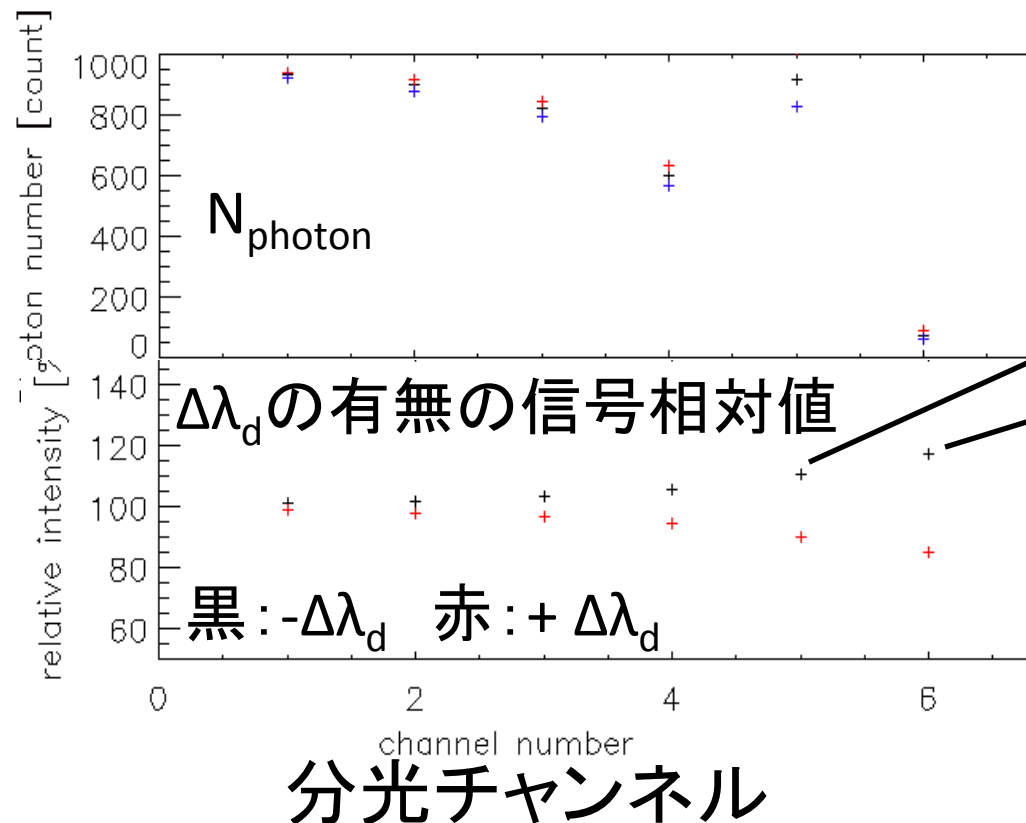
右図(シミュレーション)のような傾向があれば、波長シフトから電流を推定可能と考えられる



ダブルパストムソンによる電流分布測定の見直し

現在の測定環境において波長シフト1.5nm ($j_{e,max} \sim 1.5 [MA/m^2]$ に相当)があった場合の検出光子数と、波長シフトの有無による信号強度の違いをシミュレートした

条件: $n_e = 10^{19} [m^{-3}]$, $T_e = 300 [eV]$, $\theta = 122.3951$, $\Delta\lambda_d = \pm 1.5 [nm]$



CH5: 10.6%

CH6: 17.3%

測定誤差が10%以下であればCH5で検出可能と考えられる

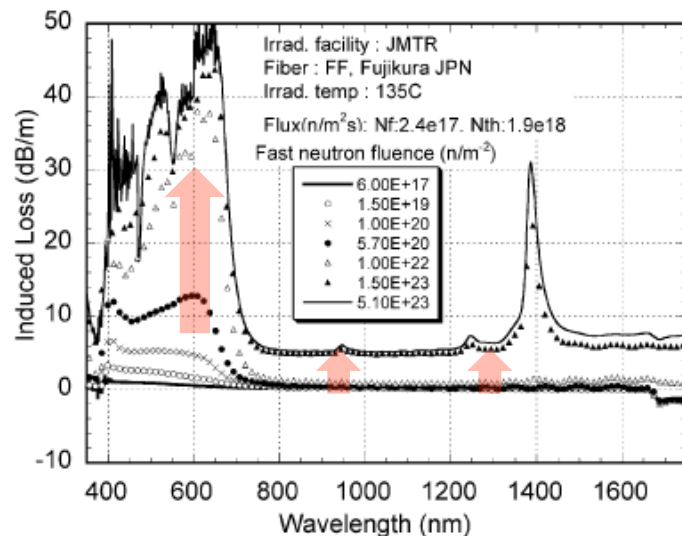
まとめ

- 球状トカマク装置TST-2において多点同時計測可能なダブルパストムソン散乱計測システムの開発を行っている。
- 現在、空間6点の T_e, n_e 同時計測が可能。
- 高密度オーミックプラズマにおいては往路と復路の測定温度はほぼ等しいと考えられる。
 - 温度非等方性は存在しない。
- 誤差解析の結果、このシステムの誤差は光子数によらず一定な 5-10 [photons/ns] 相当の電磁ノイズ、プラズマ光の揺らぎによると考えられる。
- TST-2装置のトムソンシステムを用いた電流測定可能性を検討したところ、測定誤差が10%以内であれば電流計測の実証が可能と考えられる。

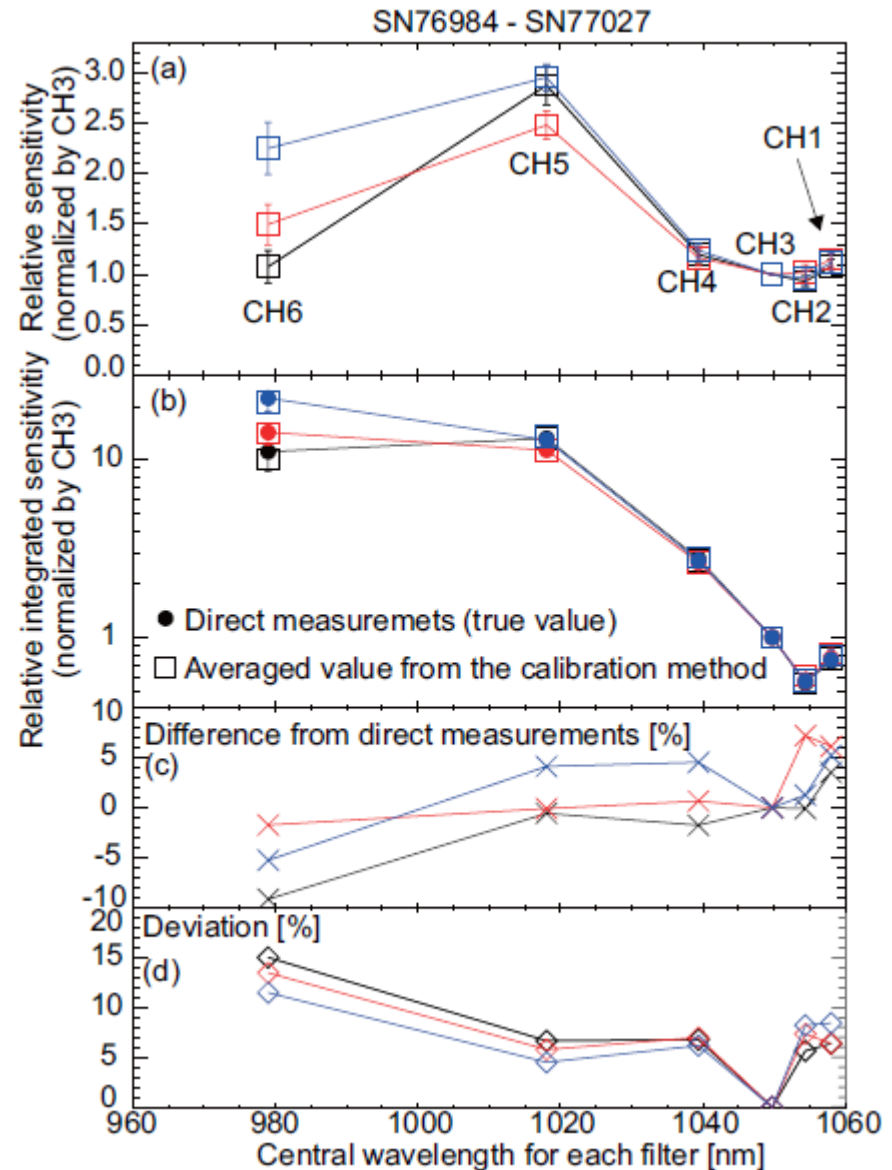
原型炉との関係

放射線環境下では、
光学系の透過率が
時々刻々と劣化していく
→ その場較正が必要

ダブルパスシステムによって
相対感度のその場較正に成功している
→ 原型炉においても
光学系のその場較正手法
が必要になる可能性



[T. Kakuta et al., J. Nucl. Mater. 1277 307 (2002).]



[H. Tojo et al., JINST to be published.]