

2010.03.11

第13回 若手科学者によるプラズマ研究会

JT-60Uにおける デジタル信号処理を用いた 中性子プロファイル計測システム の自動解析化

石井啓一、篠原孝司^A、磯部光孝^C、
馬場護^B、岡本敦、北島純男、笹尾眞實子

東北大学大学院 工学研究科 量子エネルギー工学専攻

日本原子力研究開発機構^A

東北大学 サイクロトロン・RIセンター^B

核融合科学研究所^C

1.1 背景

- ▶ JT-60Uでは重水素プラズマによる実験が行われ、以下に示すような放射線が主に発生する
 - DD反応による2.5 MeV中性子
 - DT反応による14 MeV中性子(2次反応)
 - 壁材料との核反応による γ 線
 - 荷電粒子による制動放射線

- ▶ 中性子発生率の空間分布計測を行うことにより、様々な情報を得ることができる
 - JT-60Uのように、中性粒子ビームとバルクプラズマによる核融合反応が支配的な環境における高速イオンの挙動
 - ITERなどのDTプラズマにおいて、中性子発生率の空間分布から自己加熱源となる α 粒子の発生分布

1.2 中性子分布計測

- ▶ ITERなどの次世代の核融合実験炉に向け、既存の装置で高速イオンの挙動を明らかにすることは重要

DD中性子



↓ $\sim 100 \text{ keV}$ まで減速



DT中性子

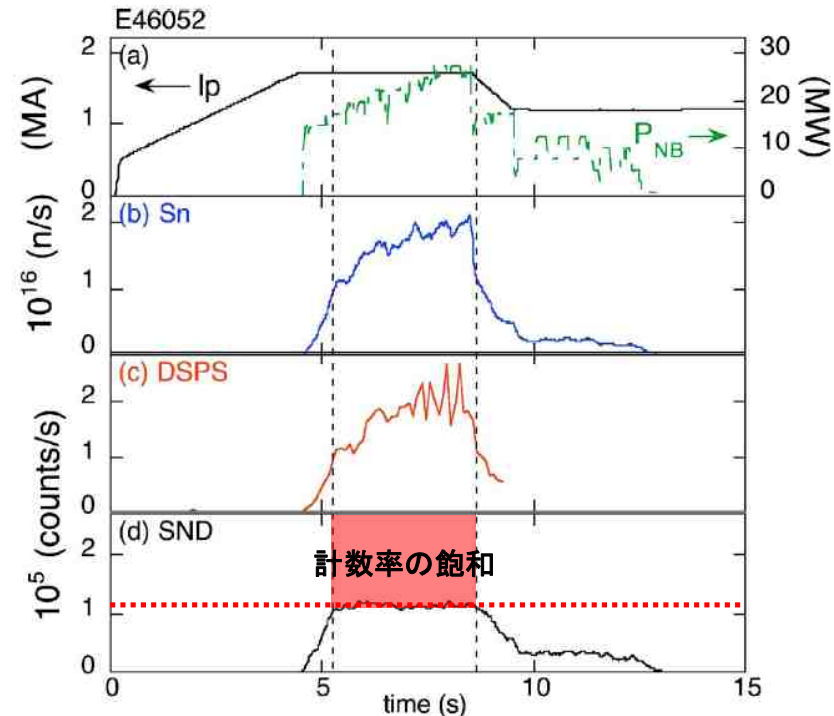
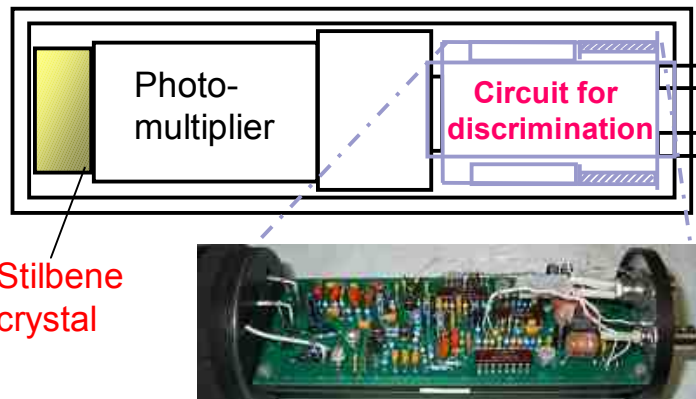
- ✓ DD中性子：NBIによる高速イオンおよびトリトン発生率の情報
- ✓ DT中性子：1 MeVのトリトンの閉じ込め・減速過程の情報

中性子空間分布計測は高速イオンの輸送・閉じ込め研究のために必要な計測手法

2.1 アナログ回路を用いたn- γ 弁別

有機シンチレータを用いた中性子検出器
は中性子に加えて γ 線も検出

中性子- γ 線弁別(n- γ 弁別)が必要

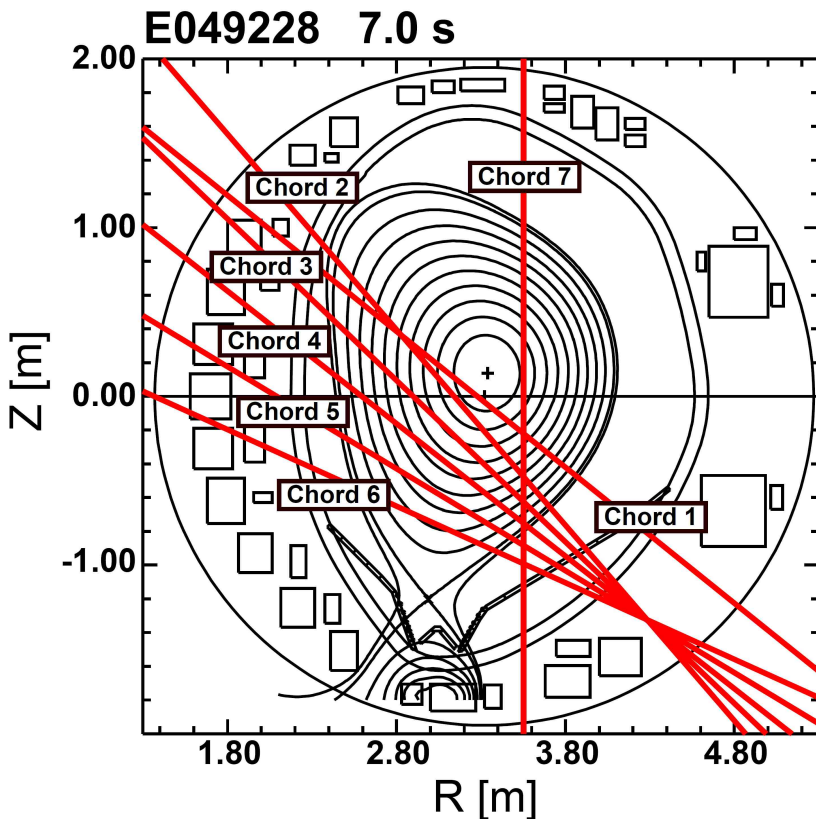


[1] M. Ishikawa et al., Rev. Sci. Instrum. **77**, 10E706 (2006).

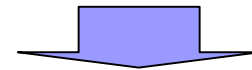
- 光電子増倍管の下流に設置されたアナログ回路を用いたn- γ 弁別
⇒ $\sim 1 \times 10^5$ cpsで計数率が飽和
- この問題を解決するため、**デジタル信号処理**を用いた中性子計測を開始[1]

2.2 JT-60Uにおける中性子プロファイル計測

- ▶ 7本のコリメータアレイを用い、中性子発生率の線積分値を計測
ポロイダル断面に対して斜め視線6本、垂直視線1本



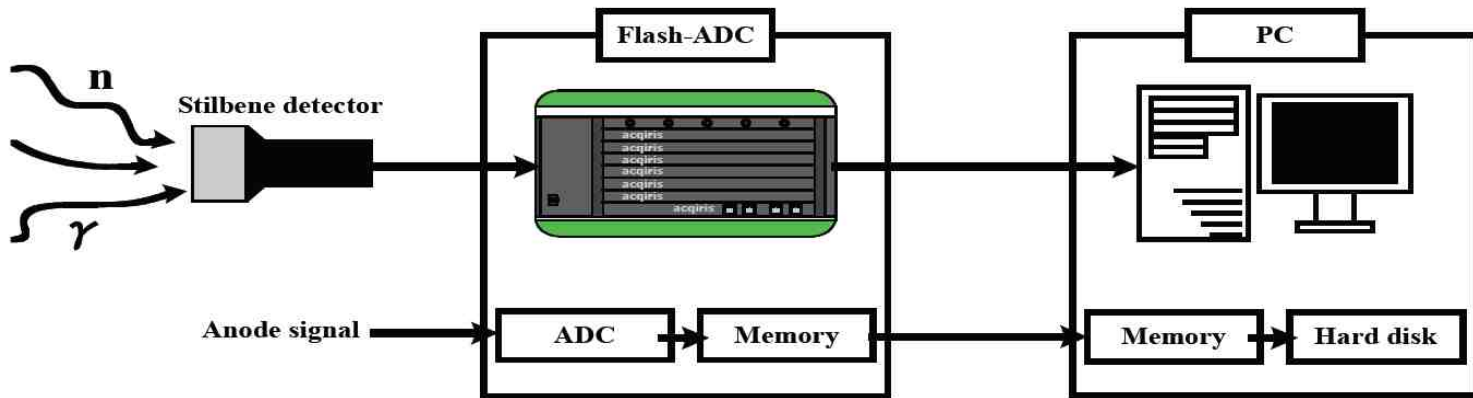
- ▶ 発生する中性子はDD反応による
2.5 MeV中性子が支配
 $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$ (2.5 MeV)
- ▶ 中性子検出器にはスチルベン結晶
(ϕ 25.4 mm \times t 25.4 mm)を使用
- ▶ 2006年に導入されたデジタル信号処理
システムを7視線に拡張[2]



高計数率環境下における中性子
空間分布計測が可能

2.3 Digital Signal Processing system

光電子増倍管のアノード信号を高速のアナログ-デジタルコンバータ (Flash-ADC)に直接取り込む(縦軸分解能10 bit)

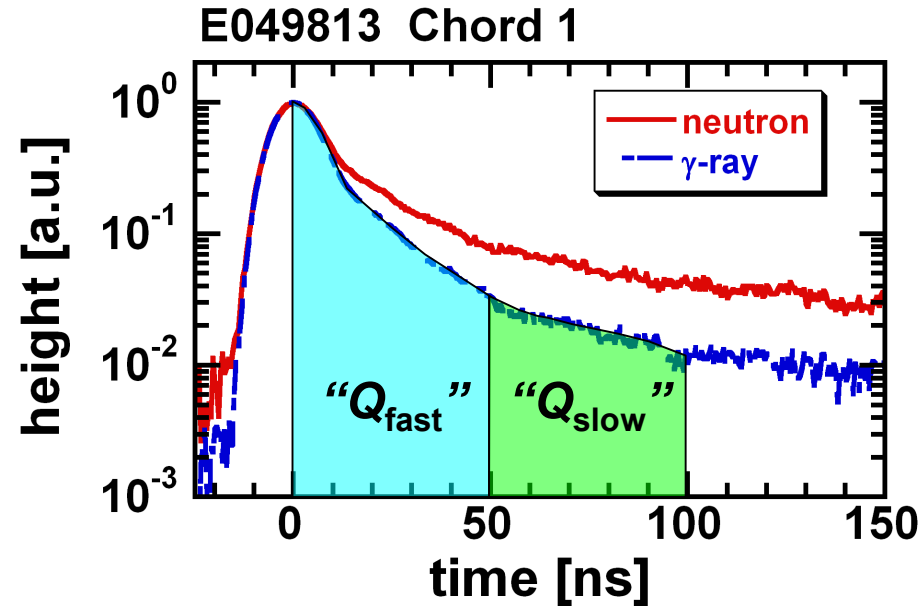
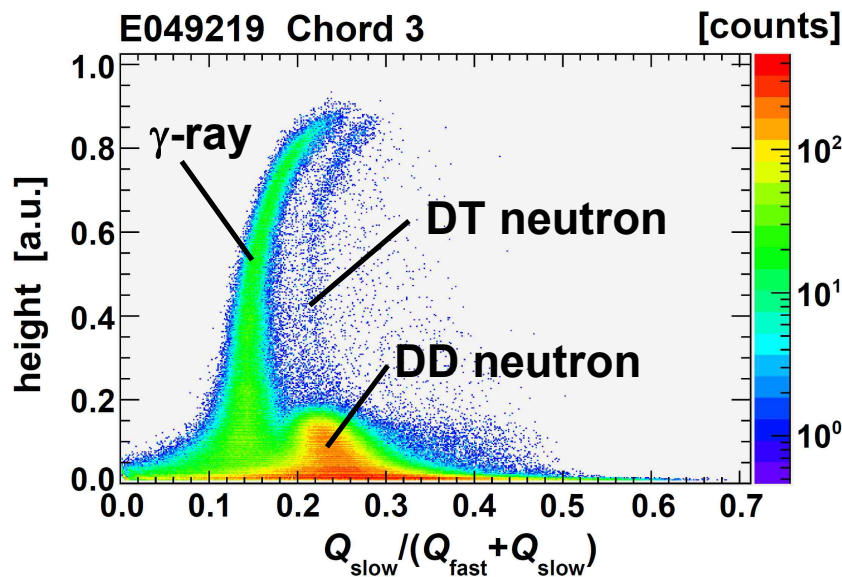


- アノードからのアナログ信号を一定のサンプリングでデジタル化
- Flash-ADCのメモリにデータが蓄積され、計測終了後にPCへ転送

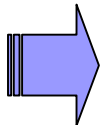
JT-60Uにおける通常の計測時

- データサイズ : 7 GB (1 GB × 7 chord)
- サンプリング : 200 MS/s (最大8 GS/s)
- 計測時間 : 約2.7 s (200 MS/s 時)

3.1 中性子- γ 線弁別(1)

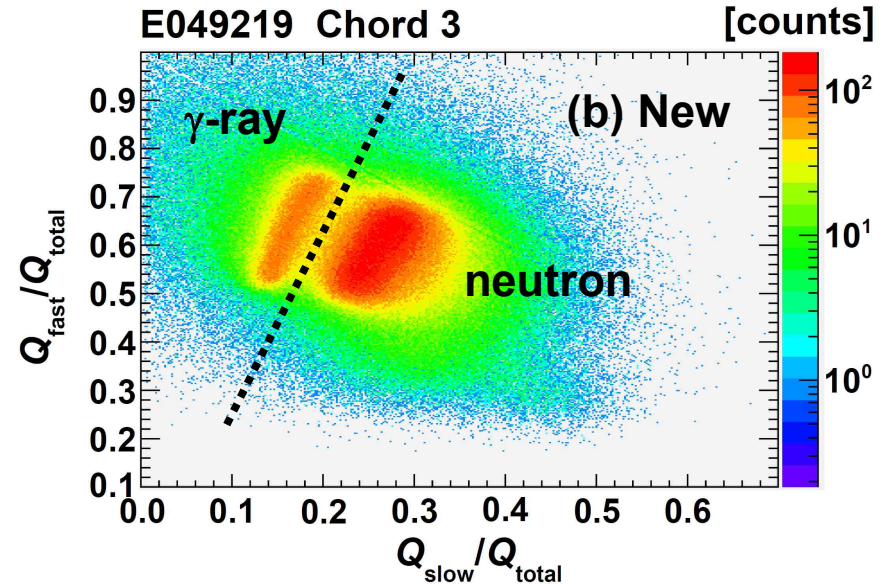
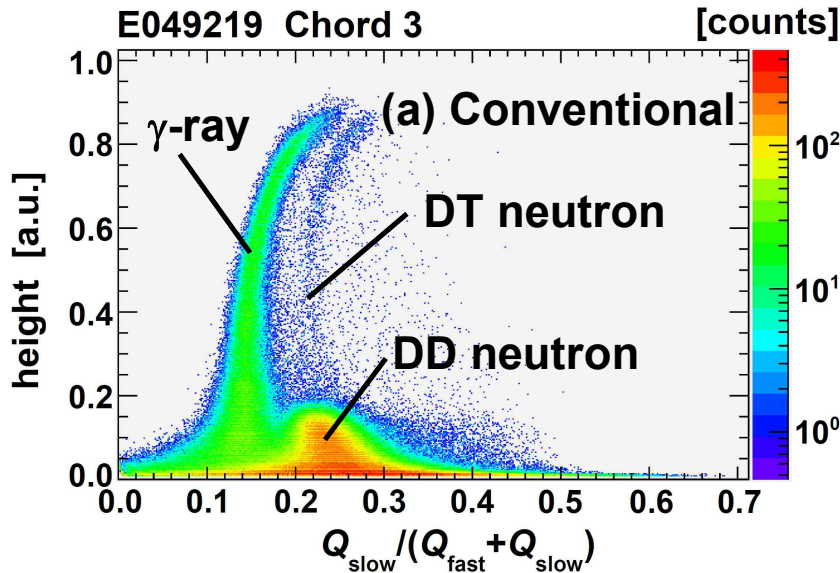


- 中性子- γ 線(n- γ)弁別には電荷積分法を採用
⇒各パルスに対して2つの領域で積分
- 各パルスの波高および積分値を用いて2次元プロットを作成
 - ✓ 中性子ピークと γ 線ピークとに分離
 - ✓ DD中性子ピークの上部に、少数のパルスが分布

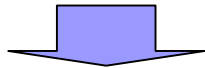


トリトン燃焼により発生したDT中性子

3.2 中性子- γ 線弁別(2)

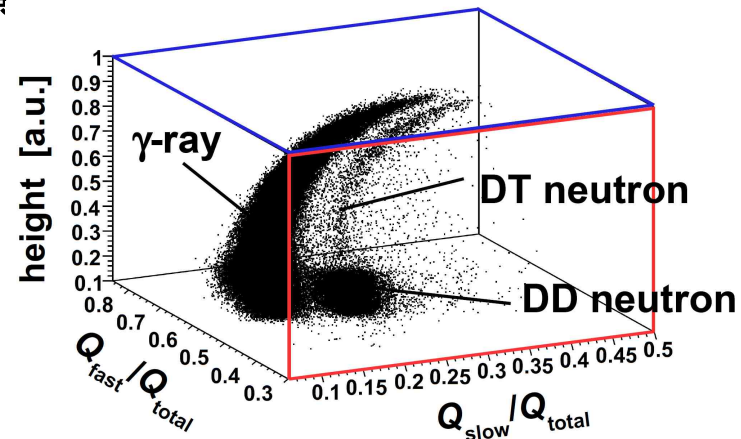


従来方式では、DD中性子と γ 線の境界が不明瞭



パルスの立上りを含めた全積分値 Q_{total} を用いて低波高部の弁別が容易な新方式を提案[3]

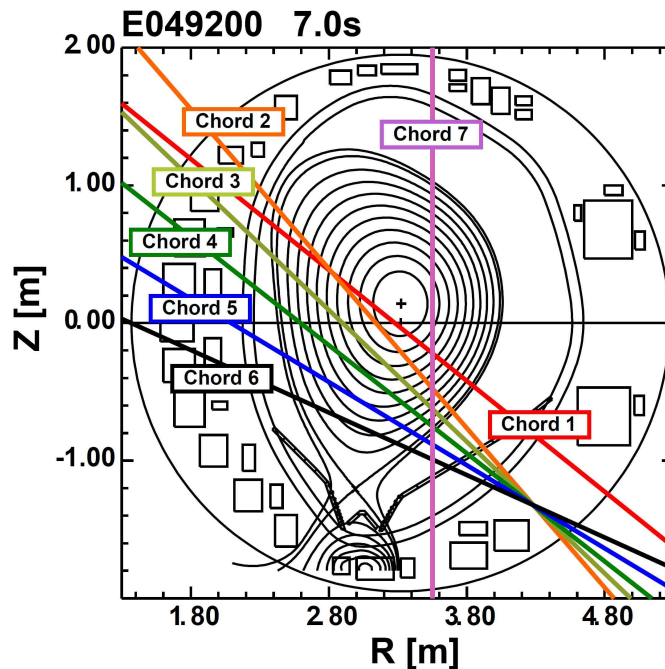
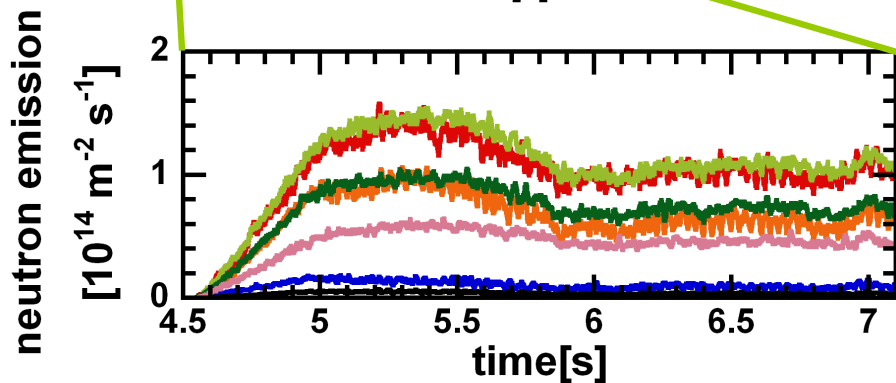
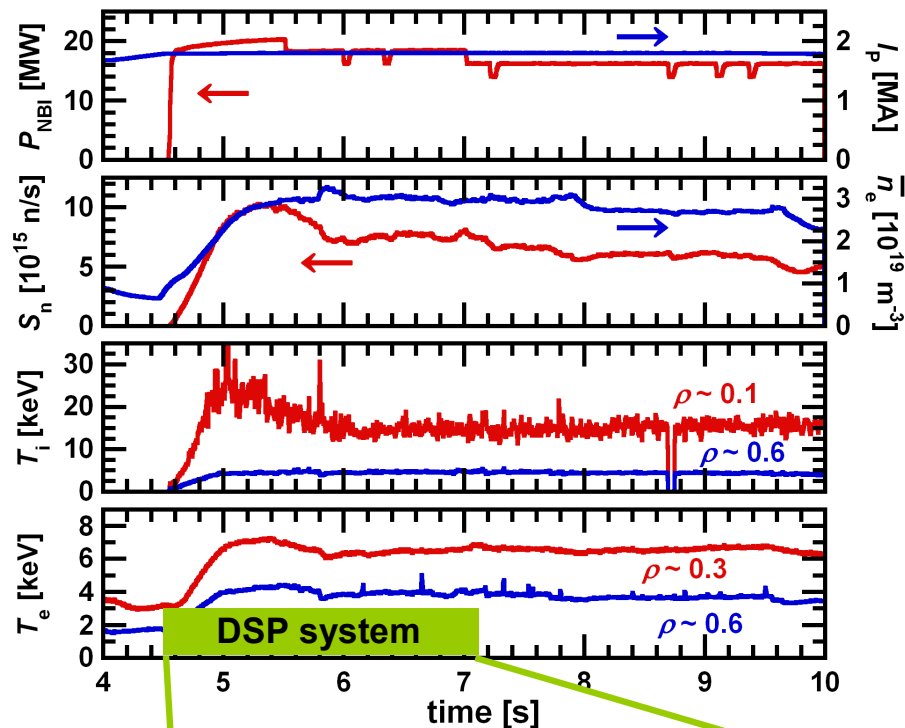
2種類の弁別方式を併用して弁別を実施



[3] K. Ishii *et al.*, Plasma Fusion Res. to be published

3.3 JT-60Uにおける中性子発生率の時間変化

E049200 $I_p/B_t = 1.8\text{MA}/3.8\text{T}$

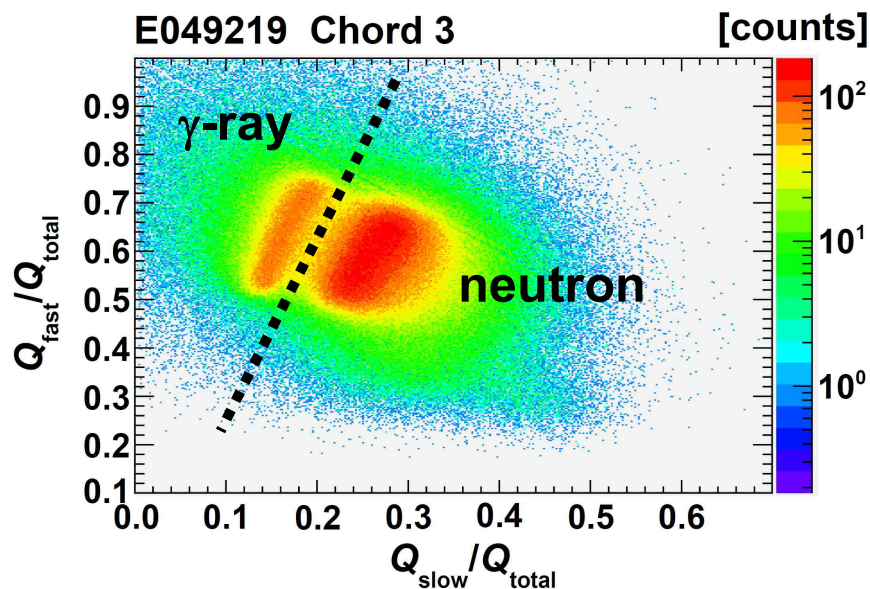


Chord No.	ρ @ 7.0s
1	0.15
2	0.24
3	0.40
4	0.54
5	0.69
6	0.82
7	0.27

4.1 中性子- γ 線弁別の自動解析化

DSPシステムの解析の流れ

- デジタルデータの取得
- ↓
- パルスの検出・積分の実行
- ↓
- 2次元プロットの作成
- ↓
- **中性子パルスの選択(手動)**
- ↓
- 計数率時間変化の取得



中性子と γ 線の境界となる直線は放電によって異なる

各データに対して直線を決定する必要

2次元プロット中の中性子パルスを自動選択することにより
計数率時間変化の自動取得が可能

4.2 線形判別関数

➤ 2次元プロットの中性子パルス選択に線形判別関数を利用

$$z = ax + by + c \quad (a, b, c \text{は定数})$$

$$\begin{aligned} S_T &= \sum (z_{Pi} - \bar{z})^2 + \sum (z_{Qi} - \bar{z})^2 \\ &= \sum (z_{Pi} - \bar{z}_P + \bar{z}_P - \bar{z})^2 + \sum (z_{Qi} - \bar{z}_Q + \bar{z}_Q - \bar{z})^2 \\ &= S_B + S_W \end{aligned}$$

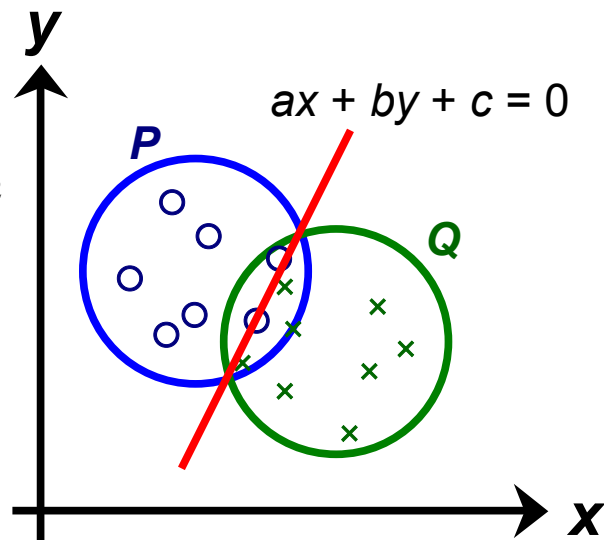
ここで、

$$S_B = n_P (\bar{z}_P - \bar{z})^2 + n_Q (\bar{z}_Q - \bar{z})^2$$

$$S_W = \sum (z_{Pi} - \bar{z}_P)^2 + \sum (z_{Qi} - \bar{z}_Q)^2$$

$S_B \Rightarrow$ 2グループP, Qの離れ具合を表す指標

$S_Q \Rightarrow$ グループ内での変動の和



n_P : グループPのサンプル数

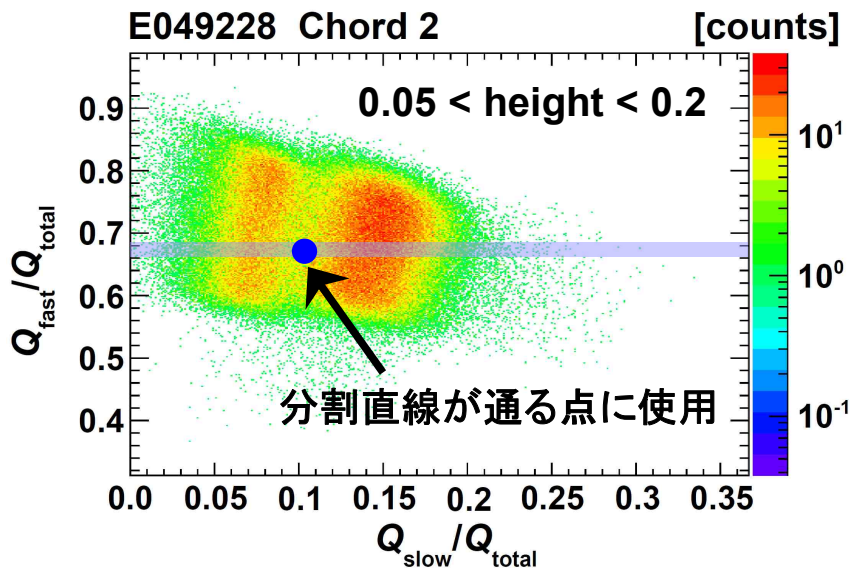
n_Q : グループQのサンプル数

$$F = \frac{S_B}{S_T} = \frac{n_P \{a(\bar{x}_P - \bar{x}) + b(\bar{y}_P - \bar{y})\}^2 + n_Q \{a(\bar{x}_Q - \bar{x}) + b(\bar{y}_Q - \bar{y})\}^2}{(n-1) \{a^2 S_x^2 + 2ab S_{xy} + b^2 S_y^2\}}$$

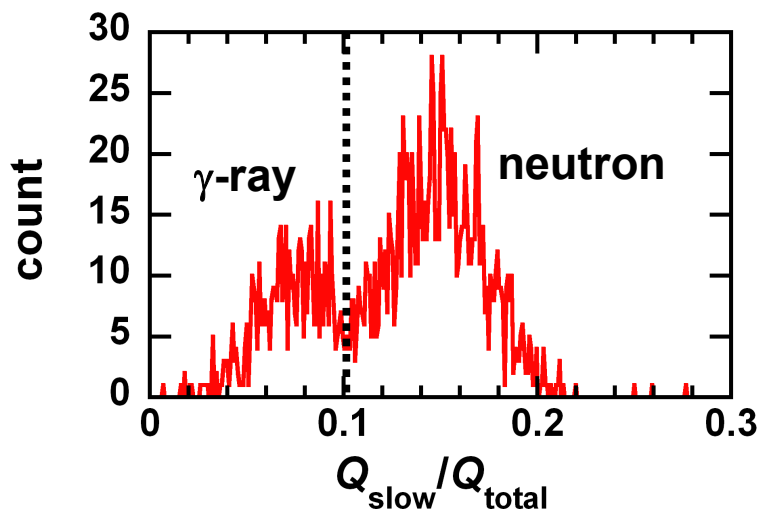
F を最大にする定数 a, b を求めることで、分割直線が決定[4]

※ただし、分割直線が通る点を与える必要

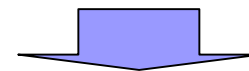
4.3 線形判別関数を用いた中性子- γ 線弁別(1)



- ✓ 2次元マップのある $Q_{\text{fast}}/Q_{\text{total}}$ に対して、count- $Q_{\text{slow}}/Q_{\text{total}}$ 図を作成
- ✓ 中性子、 γ 線のカウントピークの間
に存在する谷を検出
- ✓ 検出した点を分割直線が通る点
として使用

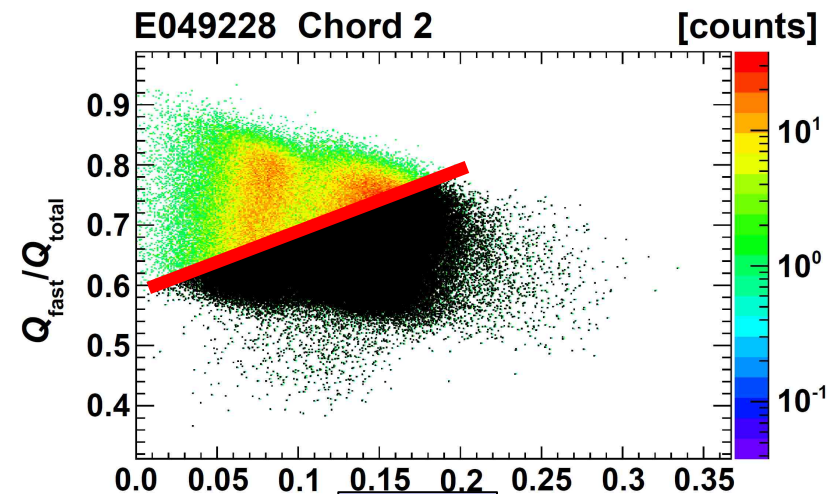


線形判別関数による分割直線の決定
はサンプルの属するグループが既知
の場合

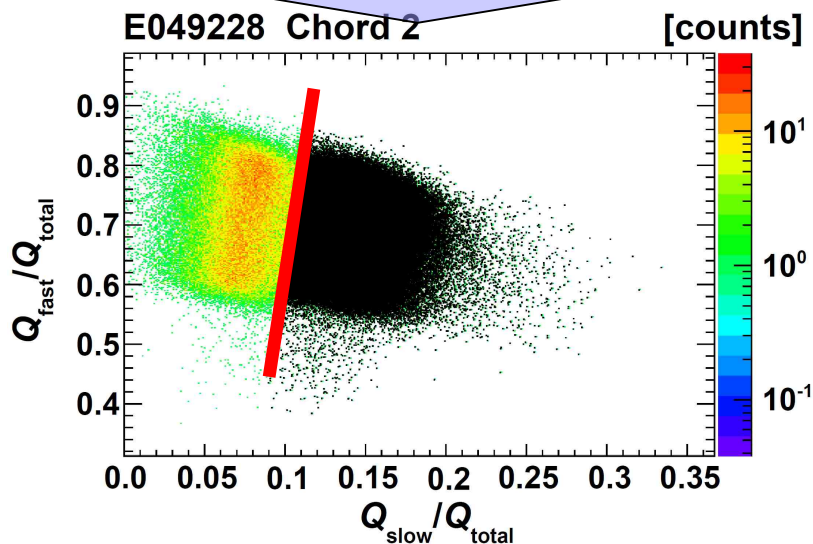


中性子- γ 線弁別へ直接適用す
ることは不可能

4.3 線形判別関数を用いた中性子- γ 線弁別(2)



1. 分割直線の傾きに初期値を設定
2. 決定された直線より中性子、 γ 線にグループ分けを実施
3. グループ分けしたパルスを用いて分割直線の傾きを再計算



2, 3のプロセスを傾きの値が収束するまで繰り返し実施

n- γ 弁別の自動解析化に成功
(E049228において全7視線で成功を確認)

5. まとめ

- ▶ JT-60Uにおけるデジタル信号処理を用いた中性子プロファイルモニタの計測結果に対して、中性子- γ 線弁別の自動解析化の検討を行った
- ▶ 中性子- γ 線弁別のための2次元プロットに対して分割直線を決定するため、線形判別関数を用いた収束計算を行ったところ、E049228のデータに対して全7視線の自動弁別に成功した
- ▶ 中性子- γ 線弁別の自動解析化によって未解析のデータに対する円滑な処理が可能となり、高速イオンに関する多くの知見が得られることが期待される