

# 高速点火レーザー核融合 加熱実験の進展



有川安信

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

博士後期課程1年

2010年3月11日 第13回 若手科学者によるプラズマ研究会<sup>1</sup>

# 高速点火核融合加熱実験の進展 アウトライン

1. 高速点火とは？
2. 高速点火実験のための装置の概要
  - レーザー装置
  - ターゲット
  - 計測器
3. 加熱実験の展開
4. まとめ

# レーザー核融合と磁場閉込め核融合

核融合反応の条件(エネルギー生成)

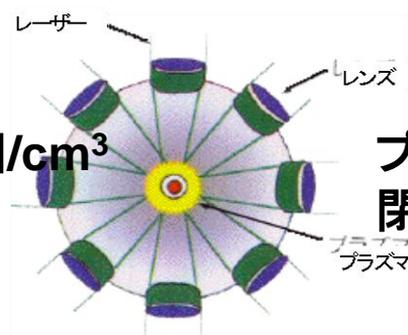
1. プラズマ温度 > 1億度
2. プラズマ密度x反応時間 >  $10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$  (核融合パラメータ)

磁場閉込め核融合

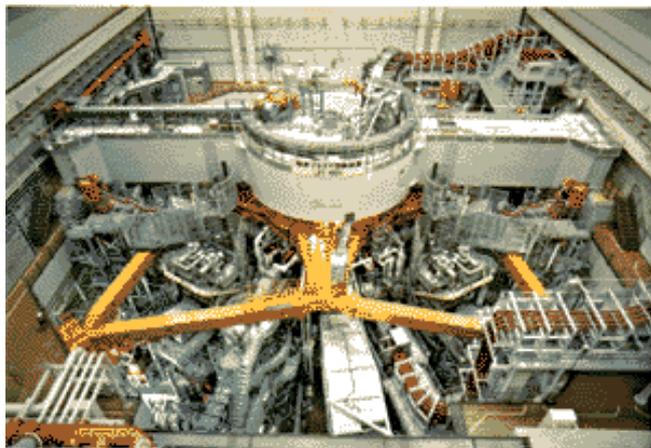


プラズマ密度: 約  $10^{12}$  個/cm<sup>3</sup>  
閉じ込め時間: 約 100 s

慣性閉込め(レーザー)核融合



プラズマ密度:  $10^{24}$  個/cm<sup>3</sup>  
閉じ込め時間:  $10^{-10}$  s

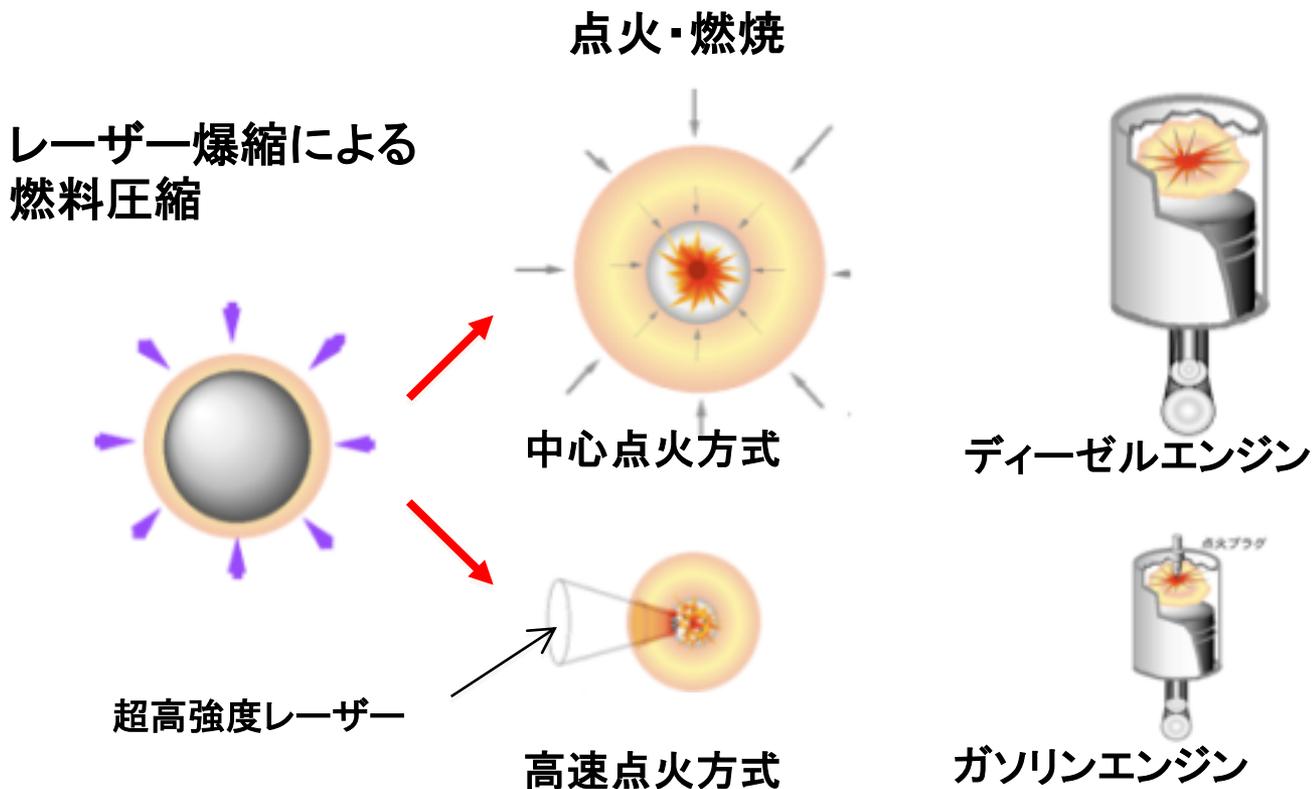


日本原子力開発機構 JT60



大阪大 激光12号

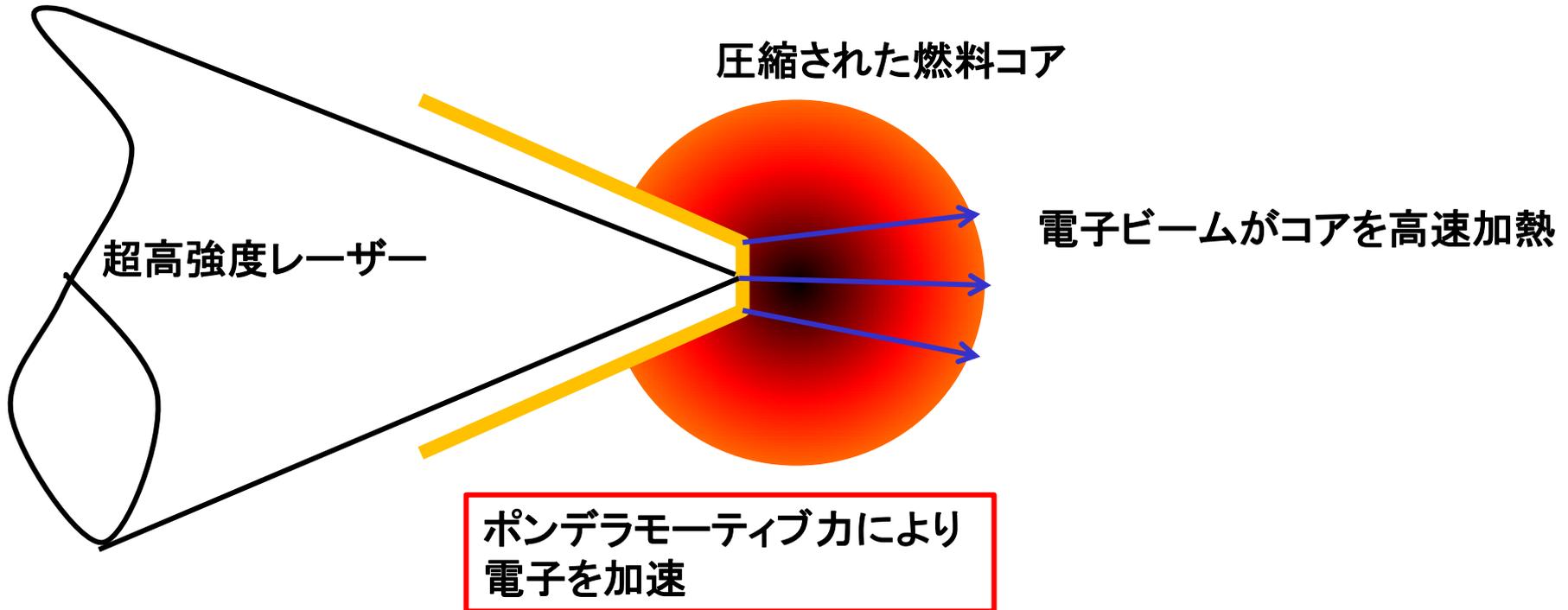
# 高速点火とは？



中心にホットスポットを必要としないため、圧縮がはるかに容易。  
→レーザーが小さくて済む。

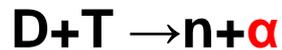
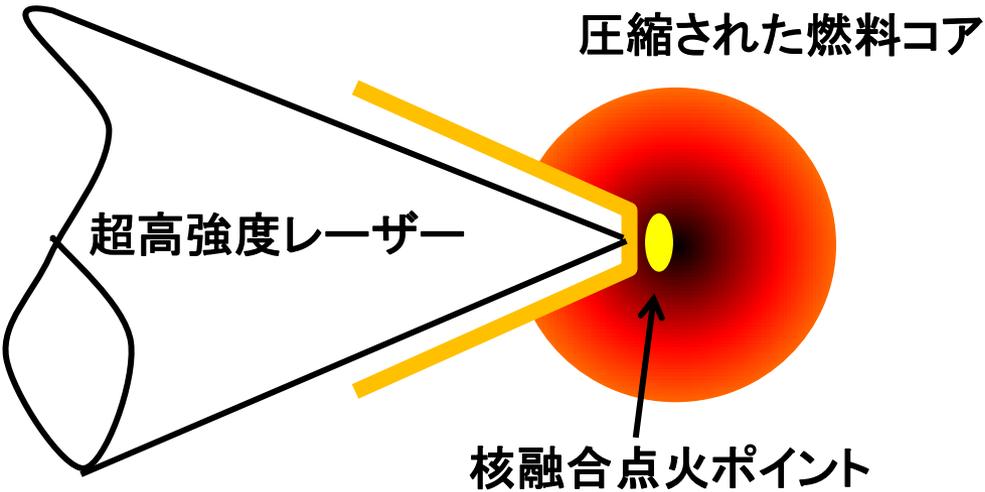
高速点火方式により従来の中心点火の1/10のレーザーエネルギーで点火・燃焼の実現が可能

# 高速加熱のメカニズムについて

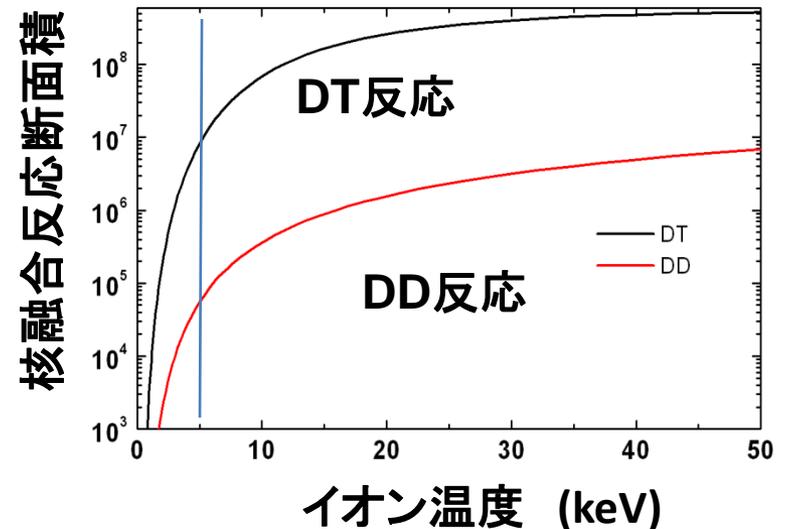


短パルス超高速レーザーによって  
電子ビームを生成し、コアを瞬時に加熱する

# 高速点火核融合 原理実証実験のゴール地点 FIREX(Fast Ignition Realization EXperiment)



$\alpha$ 粒子が周辺の高密度燃料部を加熱し、連鎖的に核融合反応を引き起こす。



## The Goal of the FIREX

第一期：5keV以上の加熱を実証する。

第二期：コアサイズを大きくし、核融合エネルギー利得を実証する

# 高速点火原理実証から発電炉までのロードマップ

2010      2015      2020      2025      2030      2035      2040



We are here

**FIREX-I**

**FIREX-II**

LIFT計画  
(高速点火核融合炉)

イオン温度  
5keVの達成

核融合利得の達成

外部への電力供給を  
実現する

世界のレーザー核融合の動向

Ignition  
Campaign  
米国 NIF

LIFE計画  
(核分裂・核融合  
ハイブリッド炉)

**レーザー核融合点火実証は  
目前！**

2011年点火実証

2020年 発電実証！

# 高速点火核融合加熱実験の進展 アウトライン

1. 高速点火とは？
2. 高速点火実験のための装置の概要
  - レーザー装置
  - ターゲット
  - 計測器
3. 加熱実験の展開
4. まとめ

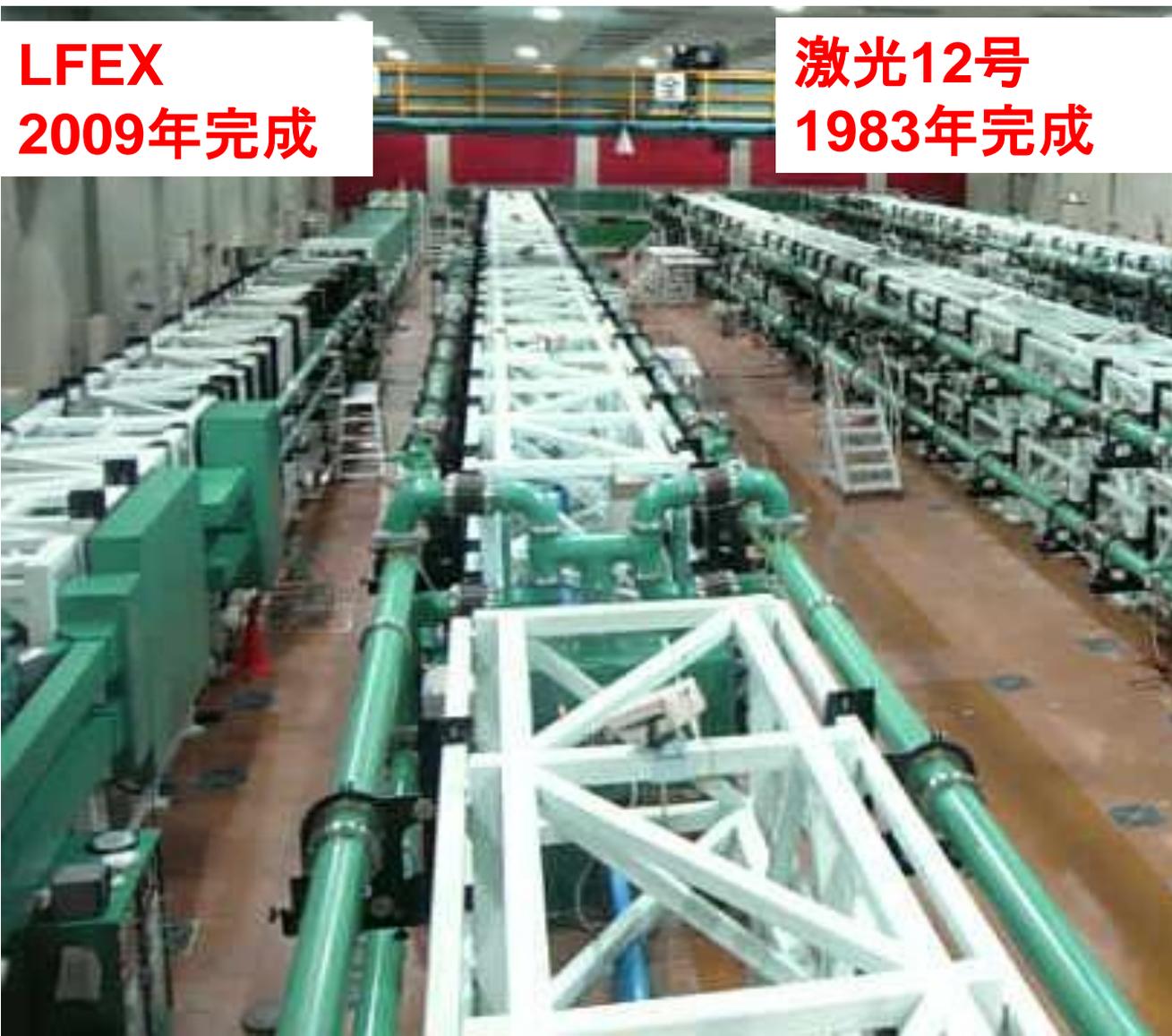
# 高速点火実験のためのレーザー装置



ILE Osaka

**LFEX**  
**2009年完成**

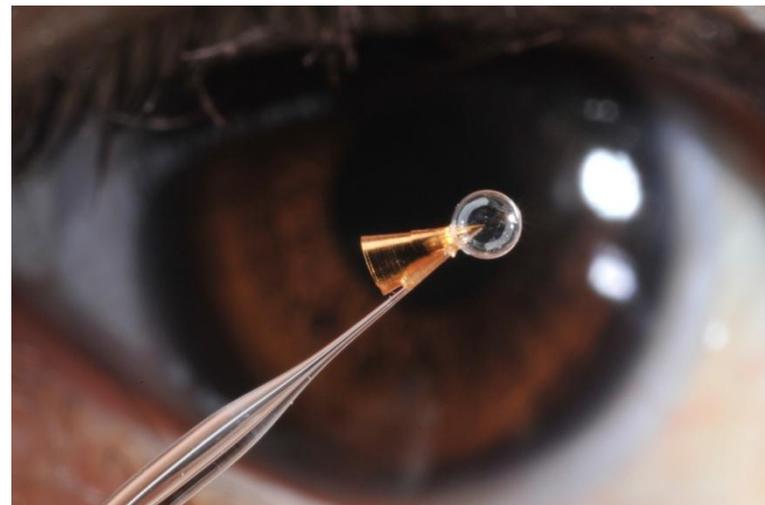
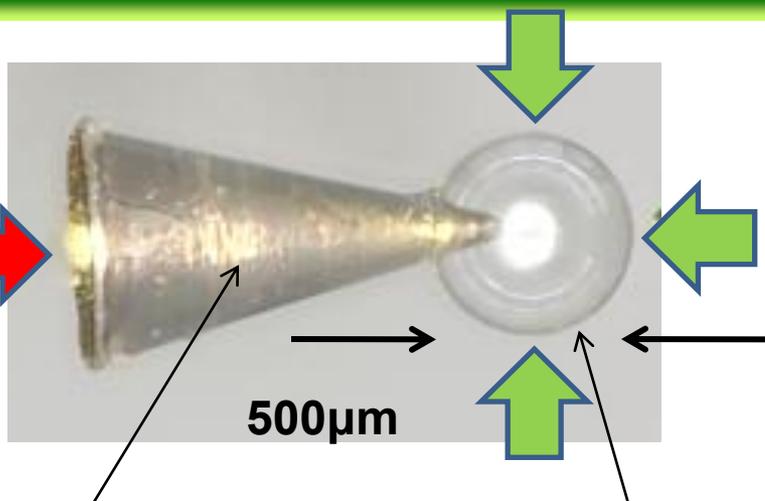
**激光12号**  
**1983年完成**



**GEKKO XII**  
1~2 nsのパルス  
Nd:glass レーザー  
2倍波(526 nm)にして使用  
max 350J/beam  
×12beam で稼働中

**LFEX**  
1~10 psの短パルス  
Nd:glass レーザー  
チャープパルス方式  
4beam構成で  
max 10kJ / 1 ps = 10PW!  
を目指して現在もチューニング中。

# 高速点火で使うターゲット



追加熱レーザー導入金コーン

- 電子生成効率を上げるために高Z材料
- 開き角度は $30^\circ$  か $45^\circ$  の2種類を使用。

燃料部： 重水素化ポリスチレン製カプセル

\* 近い将来にはフォーム素材に液体DT染み込ませ冷却固化させた、DTクライオターゲットに取り換える。

巨大な装置から発射されたレーザーがこんな小さなターゲットに照射される。

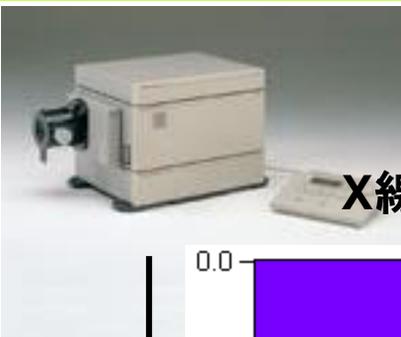


# 高速点火核融合実験のプラズマ計測器

- 発光位置を見る：X線ピンホールカメラ
- 動きをみる：X線ストリークカメラ、X線フレーミングカメラ、MIX(画像時間分解)、SIX(画像時間分解)、超高速中性子シンチレーター、
- 温度を測る：中性子ドップラー拡がり、X線分光計測、中性子数
- 密度を測る：X線シャドウグラフ、二次中性子、散乱中性子

高温、高密度のプラズマを  
高時間分解能(10-100ps)、高空間分解能(10 $\mu$ m)で計測できる計測器が多数設置されている。

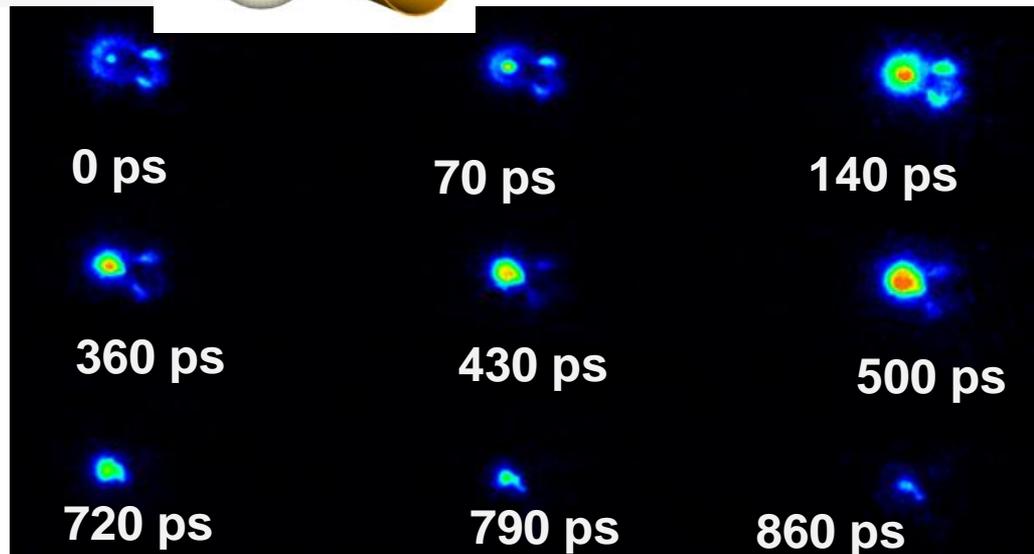
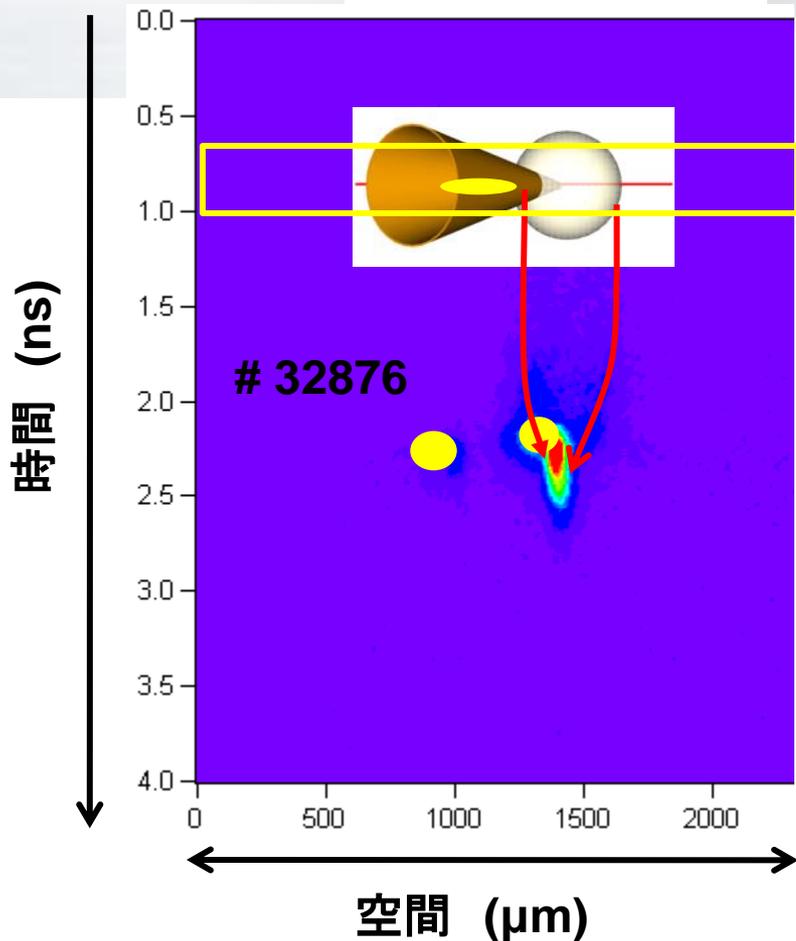
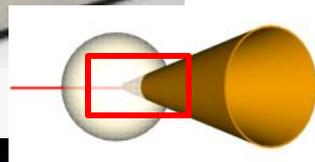
# 計測器 1 : 核融合プラズマの動きをみる



X線ストリークカメラ

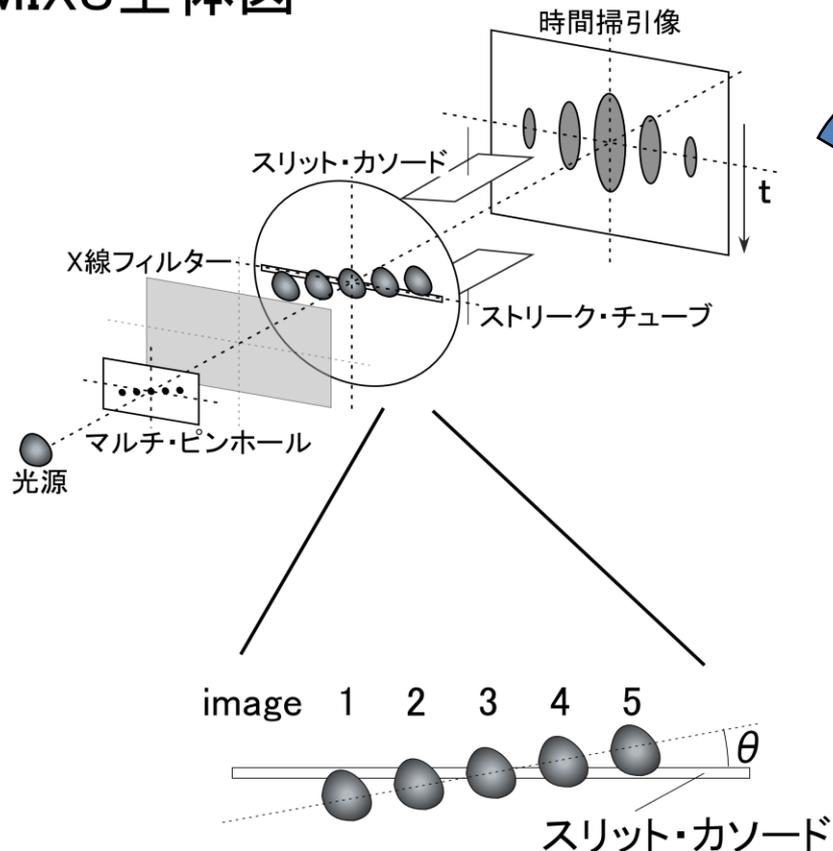


X線フレーミングカメラ



# 計測器 2 (新型) : 超高速X線二次元画像計測法(MIXS法)

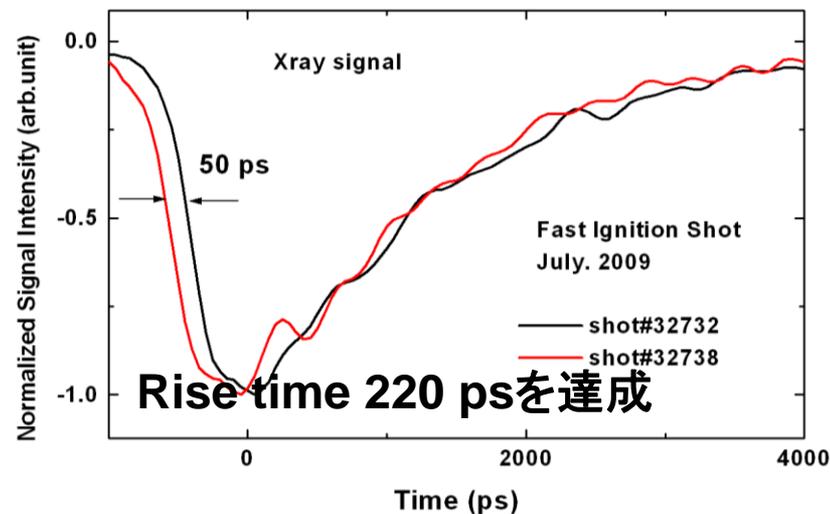
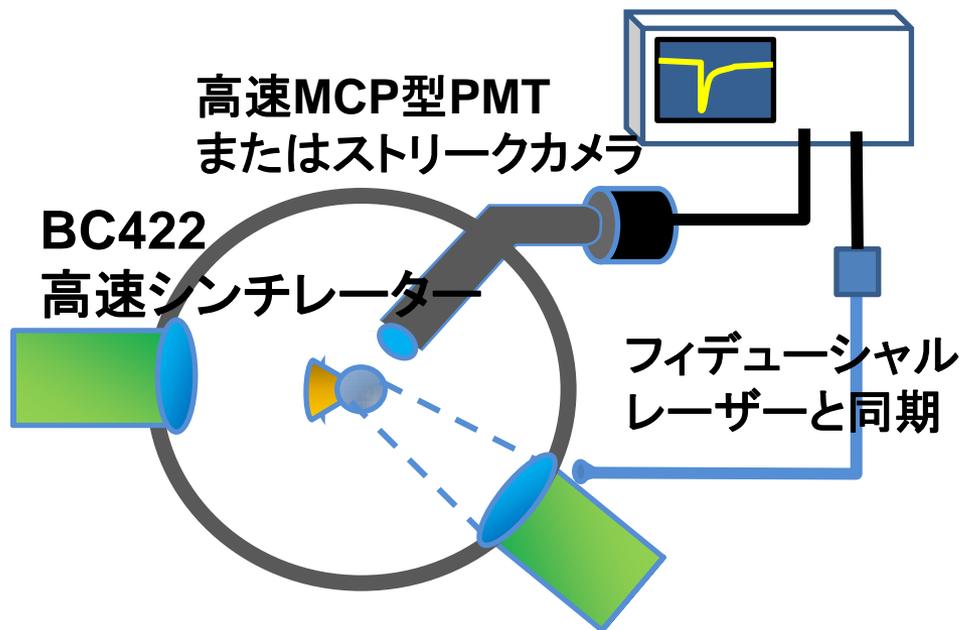
## Multi Imaging Xray Streak camera MIXS全体図



## 画像再構成手順

画像サンプリングを応用することで空間二次元計測が可能となる。  
時間分解能20 psを達成。

# 計測器 3(新型) : 中性子で核反応の動きをみる



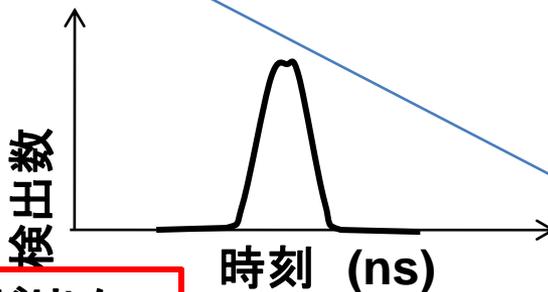
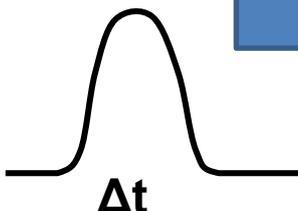
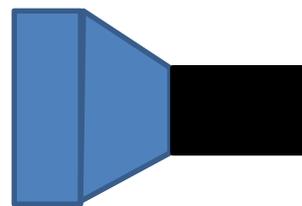
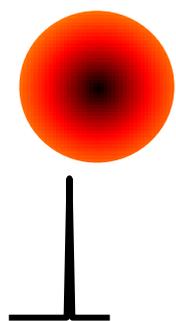
- 中性子数が少ないショットでは高電子増倍管を用い、高感度化を図る。  
Rise time 220 ps、このシステムでも中性子の生成ピーク時刻計測には50 psの分解能が得られる。
- 中性子数が多いショットではストリークカメラを用い、高速化を図る。  
Rise time 20 ps以下、中性子の発生の時間履歴まで鮮明に計測できる。

# 計測器 4 : イオン温度を測る



温度 = 運動エネルギー

エネルギー分布を持つ → 到達時刻に分布を持つ

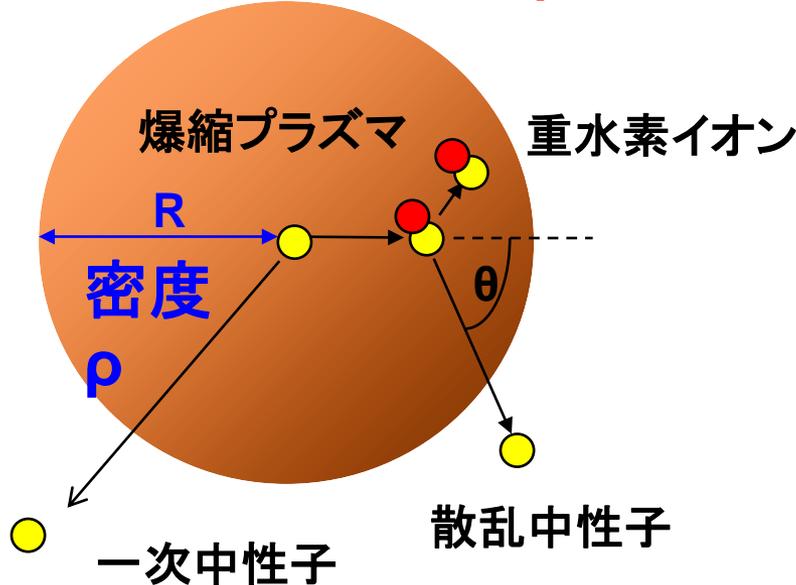


多チャンネル中性子検出器  
MANDALA

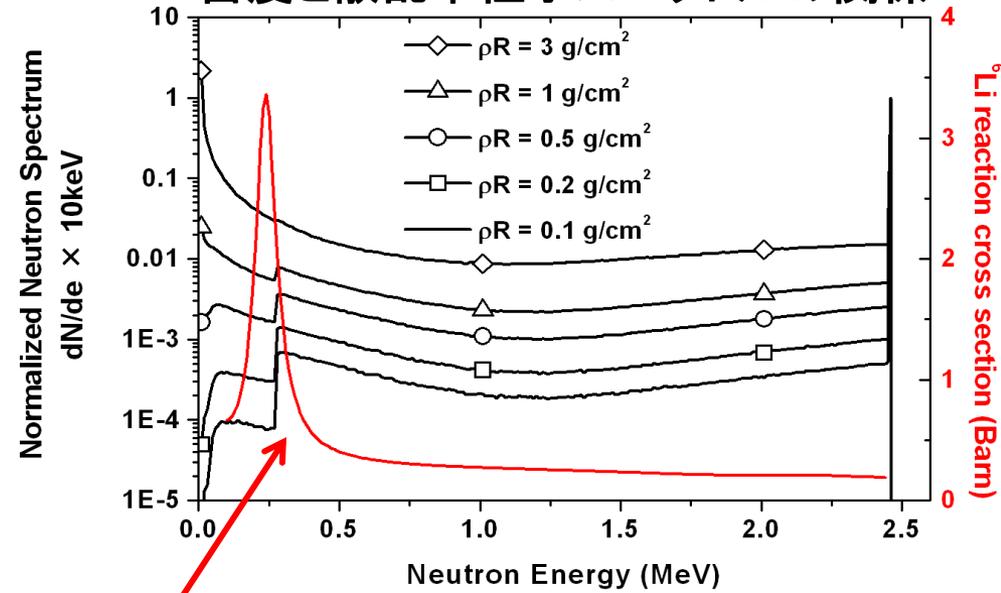
中性子の熱拡がり(ドップラー拡がり)から温度を計測

# 計測器 5 (開発中): 散乱中性子でプラズマ密度を測る

衝突確率  $P$  は  $\rho R$  に比例する



シミュレーション計算による  
密度と散乱中性子スペクトルの関係

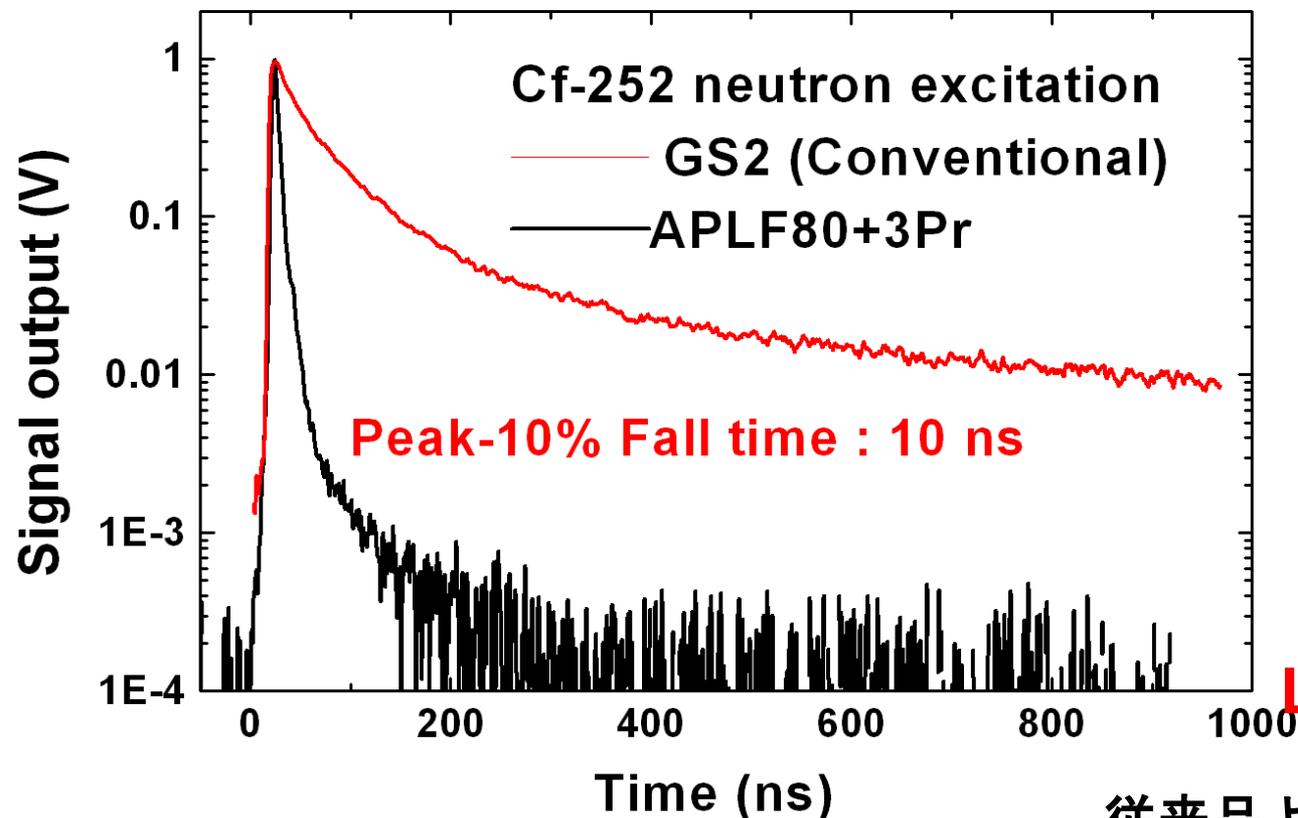


$n + {}^6\text{Li} \rightarrow \text{T} + \alpha$  (4.8MeV) cross section

散乱中性子に着目した新しい計測手法が現在開発されつつある。  
昨年レーザー核融合散乱中性子計測に特化した、超高速応答の ${}^6\text{Li}$ シンチレーターの開発に成功した。

# APLF80+3Pr

## 高速Li-6シンチレーター素材開発に成功



glass composition  
 $20\text{Al}(\text{PO}_3)_3-80\text{LiF}$   
 $+3\text{PrF}_3$



Li density : 7.98 w%

従来品より圧倒的な高速応答

従来品よりも高リチウム密度

# 高速点火核融合加熱実験の進展 アウトライン

1. 高速点火とは？
  2. 高速点火実験のための装置の概要
    - レーザー装置
    - ターゲット
    - 計測器
  3. **加熱実験の展開**
  4. まとめ
1. 加熱実験の展開
  2. 計測の問題点と解決策

# 高速点火加熱実験の展開

2009年以前の成果をまとめると・・・



- コーン付きターゲットを激光12号で爆縮して、燃料コアの生成を確認。X線計測により密度の計測に成功。

- 2002年に当時のペタワットレーザーを用いて加熱原理実証実験に成功した。

- \* 追加熱(エネルギー最大 0.7PW)を入れることで、**1000**倍の中性子増加を確認。

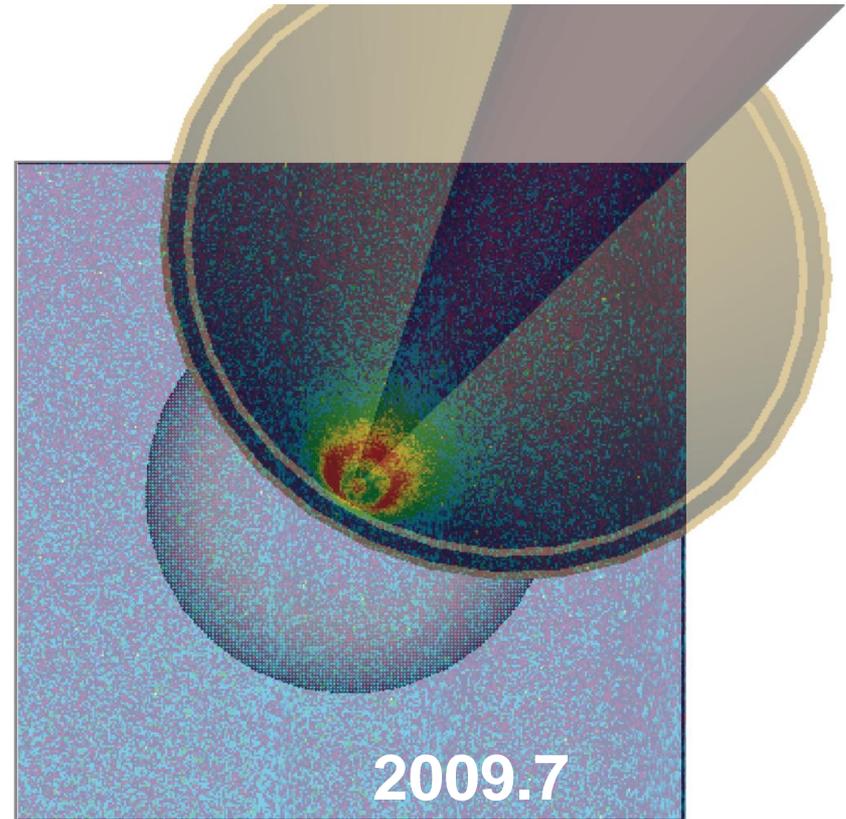
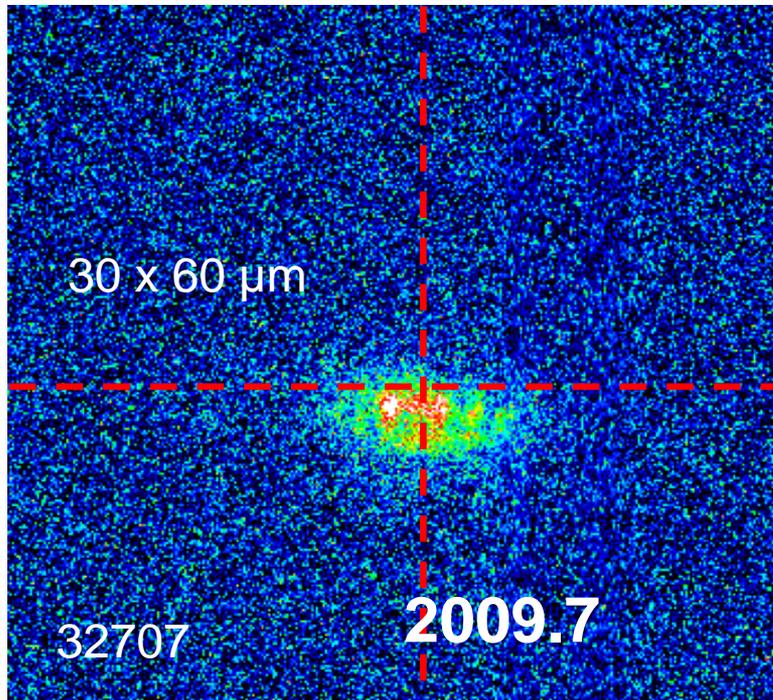
その後、点火実験のための超高強度レーザーLFEX(世界最高出力)の建設がはじまった。

7年間の建設期間を経てついにLFEXが完成し、2009年に加熱実験が始まった。

# 高速点火加熱実験の展開 1

## LFEX パフォーマンステスト

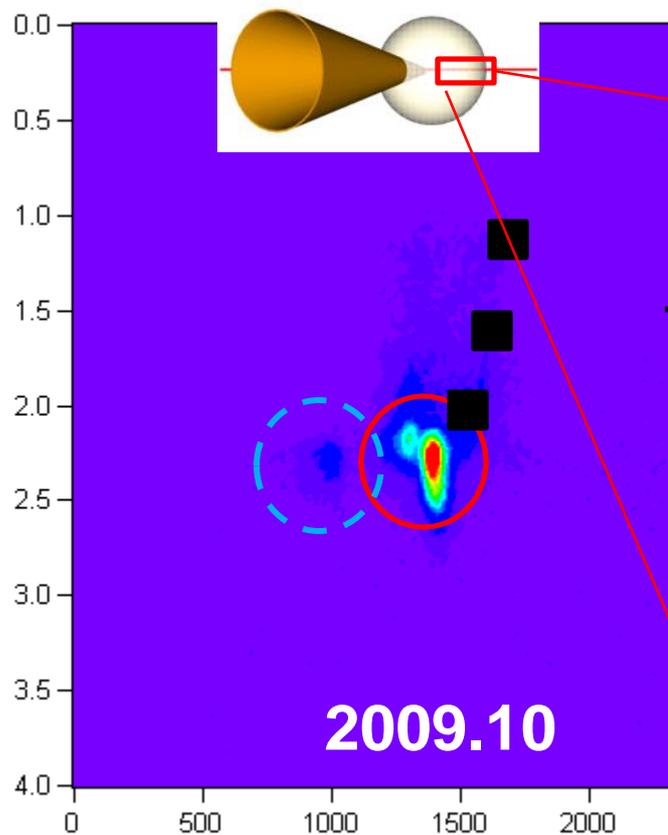
ピンホールカメラ像



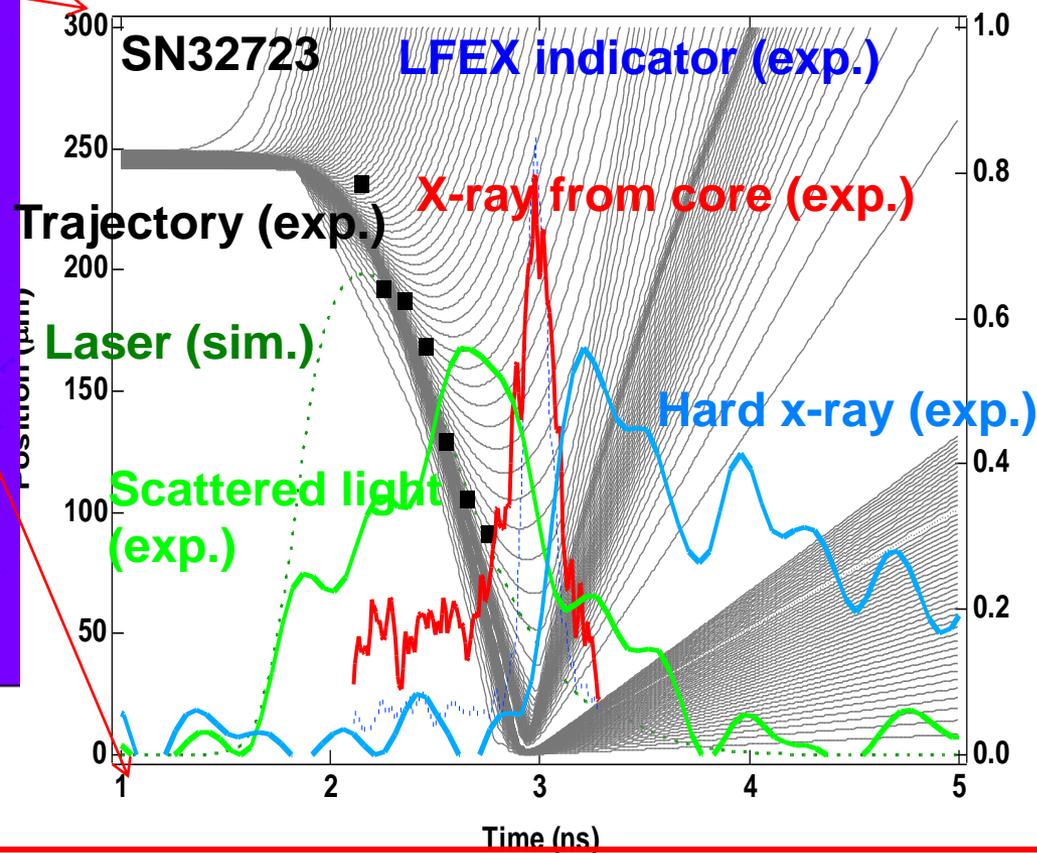
最大1kJ、およそ $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> の照射強度を達成。

# 高速点火加熱実験の展開 2

## 爆縮と加熱タイミングの同時観測

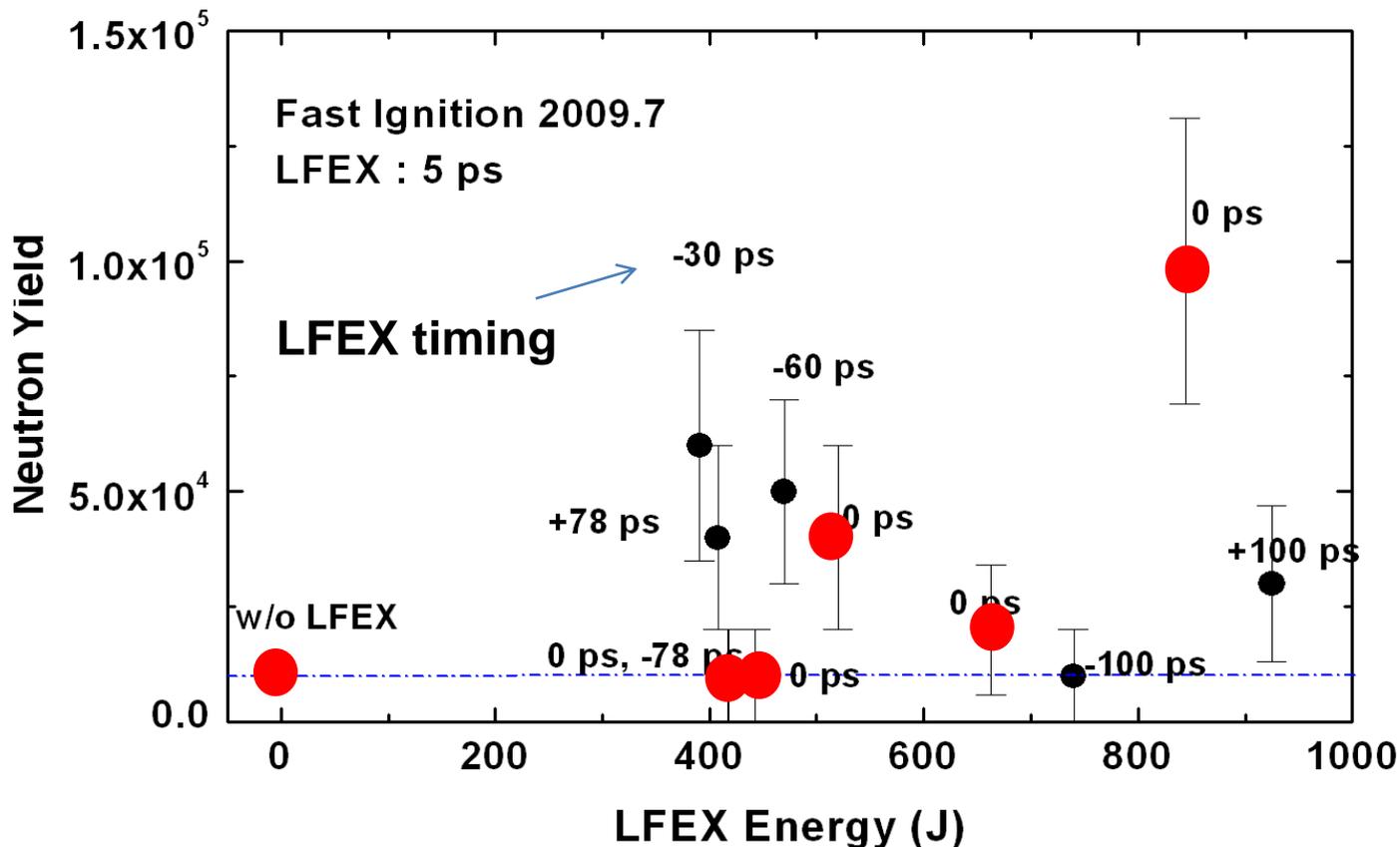


一次元流体シミュレーション ILESTA  
による爆縮軌跡



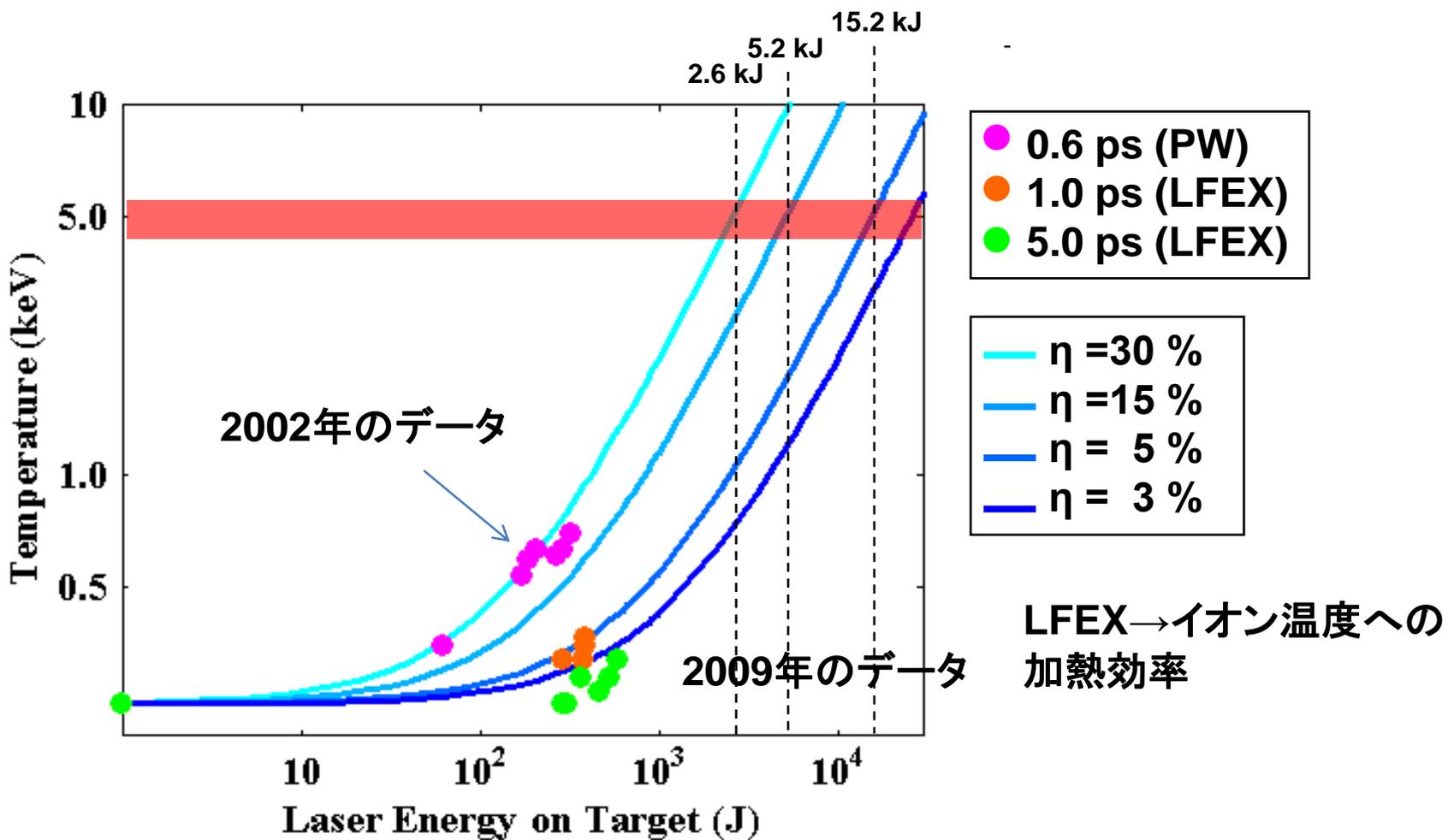
流体シミュレーション、X線時間分解画像計測、高速シンチレーターによる爆縮と加熱のダイナミクスを同時観測

# 加熱に対して中性子数の増大を確認



**LFEXレーザーによる加熱によって中性子発生数が増大した。**

# 5keV達成への第一ステップを達成！

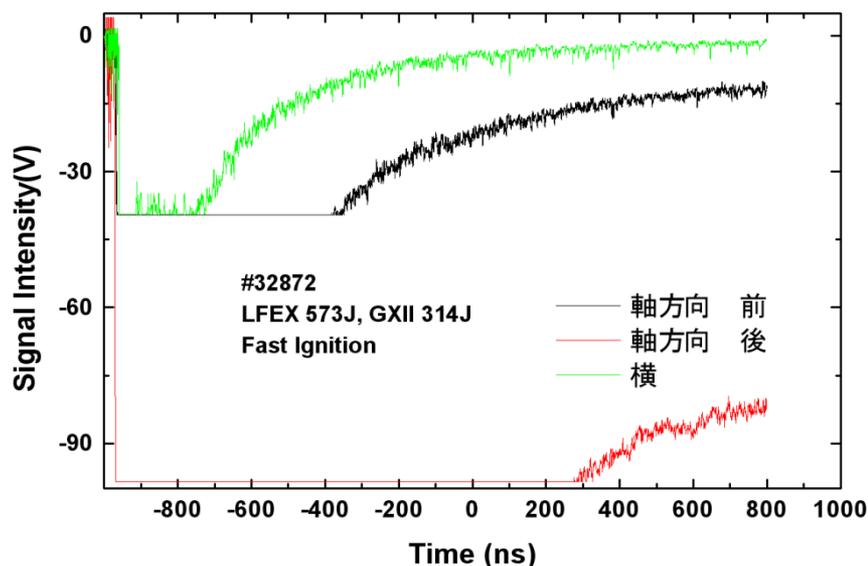


\* 加熱効率が過去の実験や予測よりも低い事も明らかになった。  
 レーザーの特性の違いが原因であると考えられており、現在改善が急がれている。 24

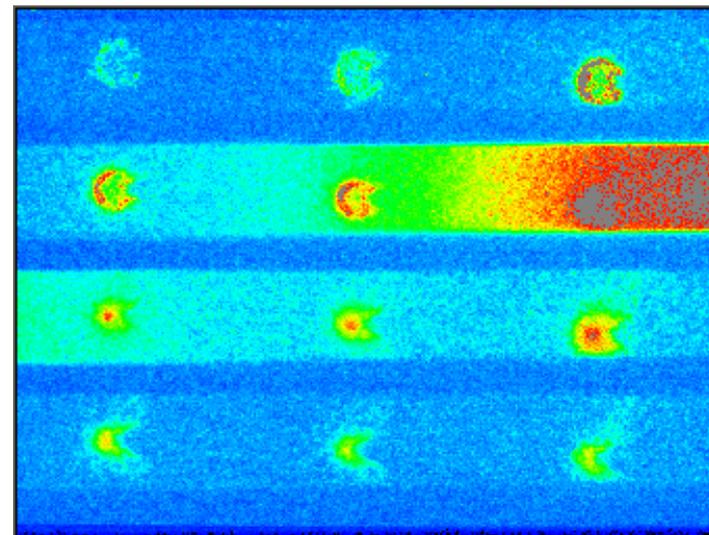
# 高速点火実験の天敵 : 高強度X線ノイズ

高速点火は超高強度レーザーによって電子ジェットを生成してコアを加熱する。レーザーのエネルギーを上げるに従い、電子ジェットのエネルギー・量ともに増え、それに伴う制動放射X線も強くなっていく。

→高強度X線、電磁ノイズが大きくなりすぎて、計測系をおびやかしている。



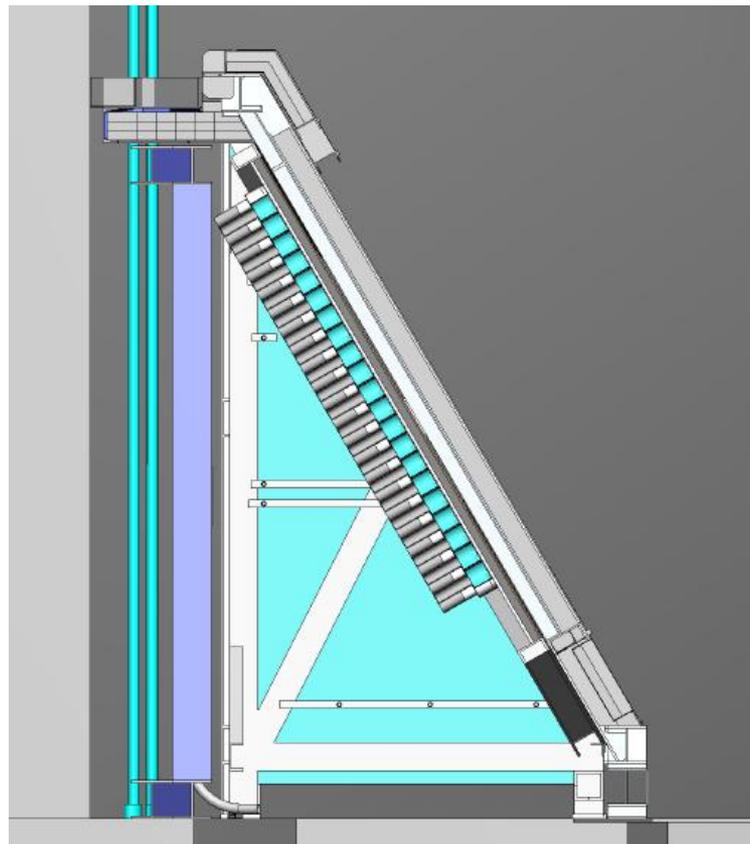
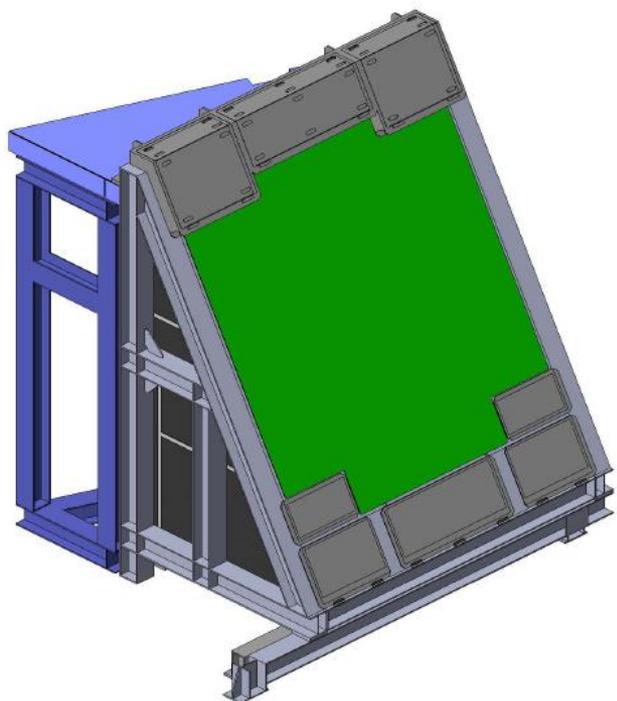
中性子シンチレーターの信号例



フレーミングカメラの信号例

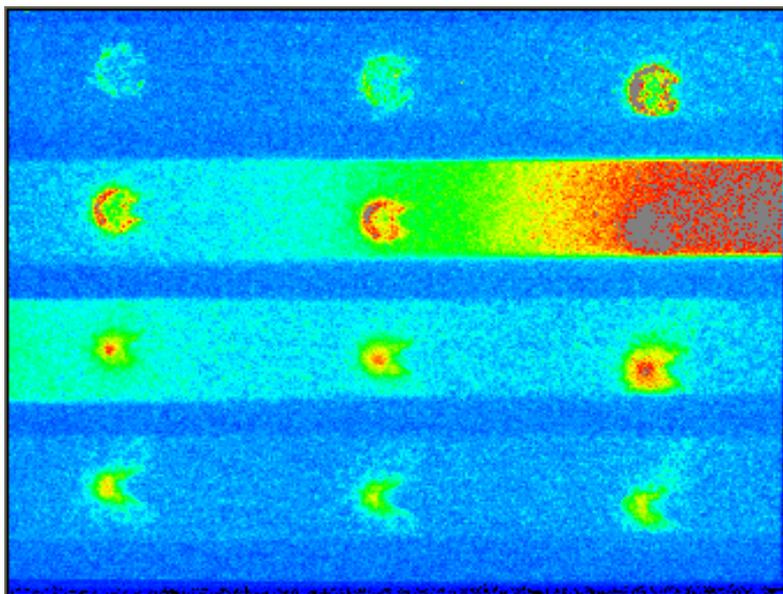
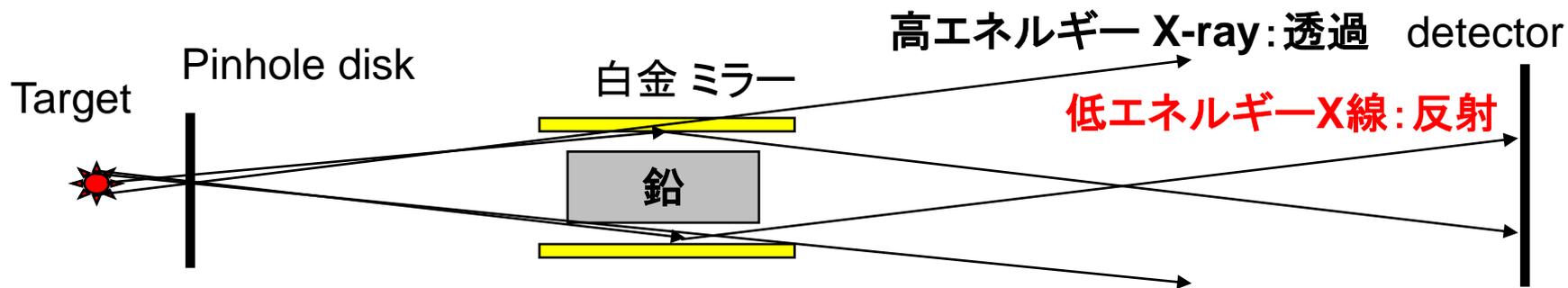
高強度X線ノイズに強い計測器の開発が求められている。

# X線に強い計測器開発 1 鉛を置きまくる

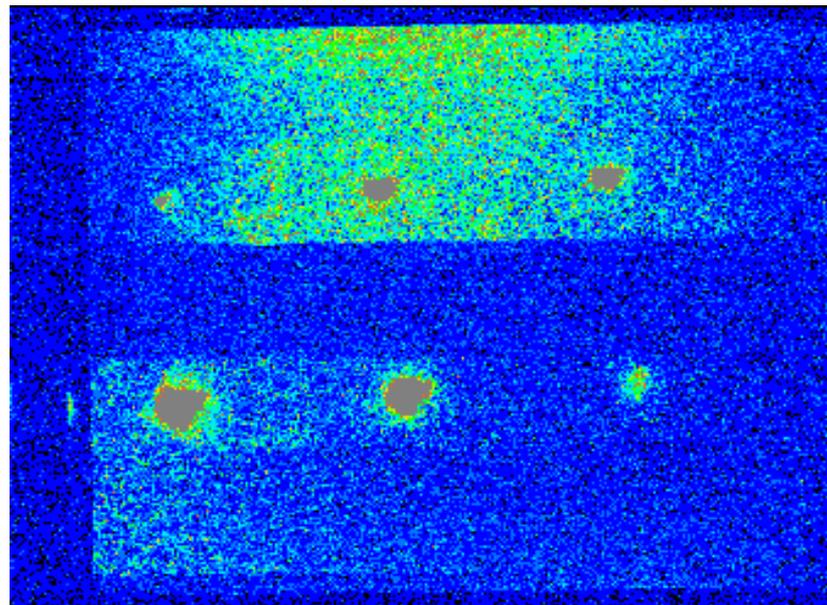
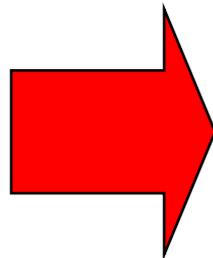


多チャンネル中性子検出器 MANDALAには厚さ10cmの鉛のシールドを前面に施している。

# X線に強い計測器開発 2: 反射型フレーミングカメラ



従来

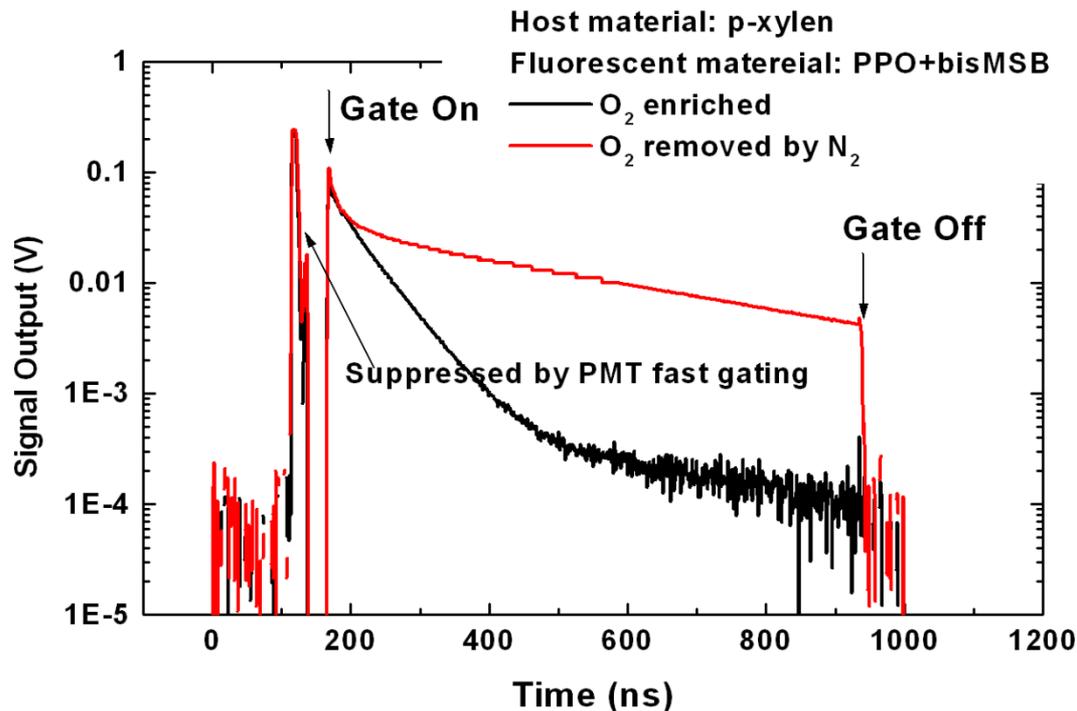


全反射ミラー導入後

# X線に強い計測器開発 3: 高速減衰中性子シンチレーター



ILE Osaka



従来の液体シンチレーターに酸素を溶存し、その効果を検証した。酸素溶存シンチレーターの遅い発光成分が劇的に減少する事が確認された。

本年の高速点火実験への導入に向けて現在も開発を急いでいる！

液体中性子シンチレーターに酸素を溶存することによって、シンチレーション発光の遅い成分を劇的に減少させることに成功。

\* 詳細は 長井君の講演で

# まとめ

- 高速点火核融合は従来の中心点火に比べて小規模かつ高効率なレーザー核融合手法。
- LFEXレーザーが動き出し、加熱実験を開始した。
- 2011年イオン温度の5keV加熱を目指しプロジェクト実験が進行中。  
→いま、戦いの真っ只中！

# 最後に・・・

## 今一度核融合エネルギーの重要性を考える



磁場かレーザーか？ではなく、  
互いに協力して一刻も早くエネルギーを生み出すべき。  
画期的な計測技術、ノイズ対策技術等があれば教えてください。

**一刻も早く核融合エネルギーの実現を！**