

高速応答中性子シンチレーション 検出器の開発

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
有川 安信

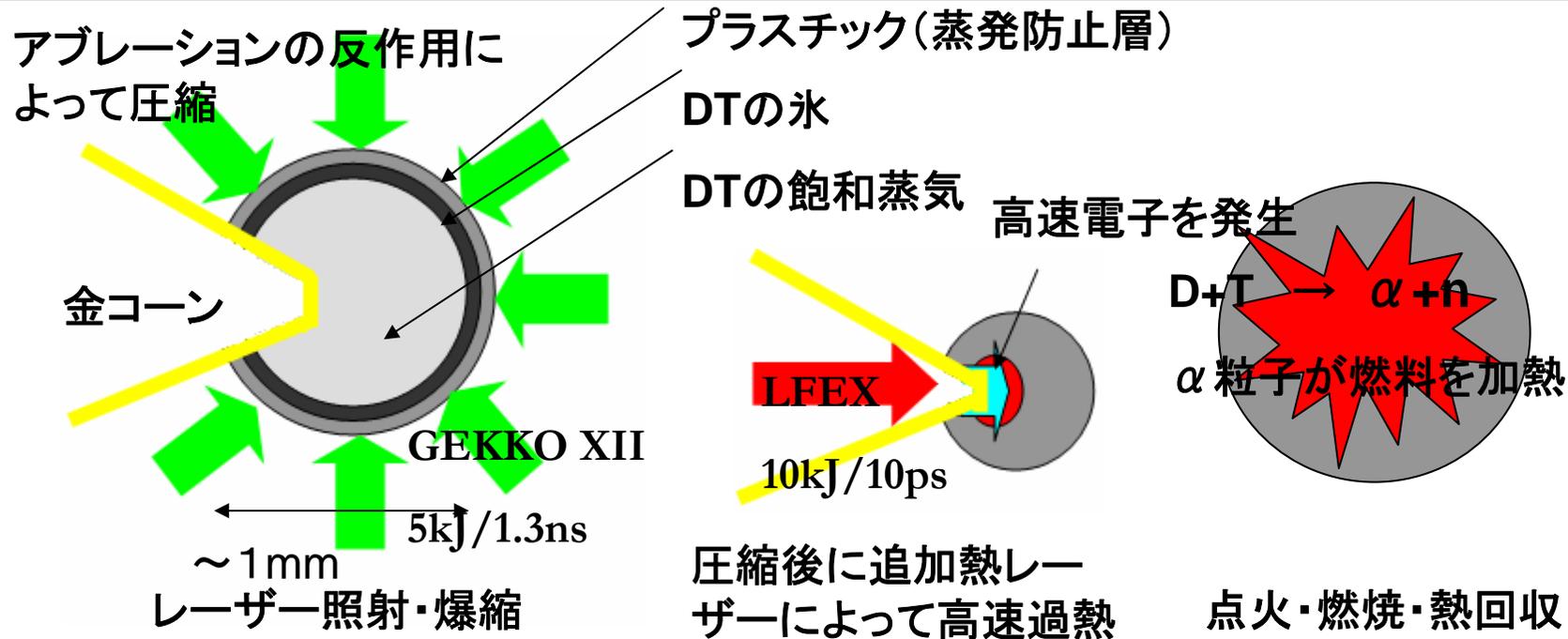
INDEX

- 高速点火方式レーザー核融合について
- バーンタイム
- 要求性能
- 設計
- 性能評価実験
- まとめ

若手科学者によるプラズマ研究会
中井光男、渡利威士、細田裕計、古川裕介、
猿倉信彦、長井圭治、乗松孝好、白神宏之、
疇地宏



高速点火方式レーザー核融合

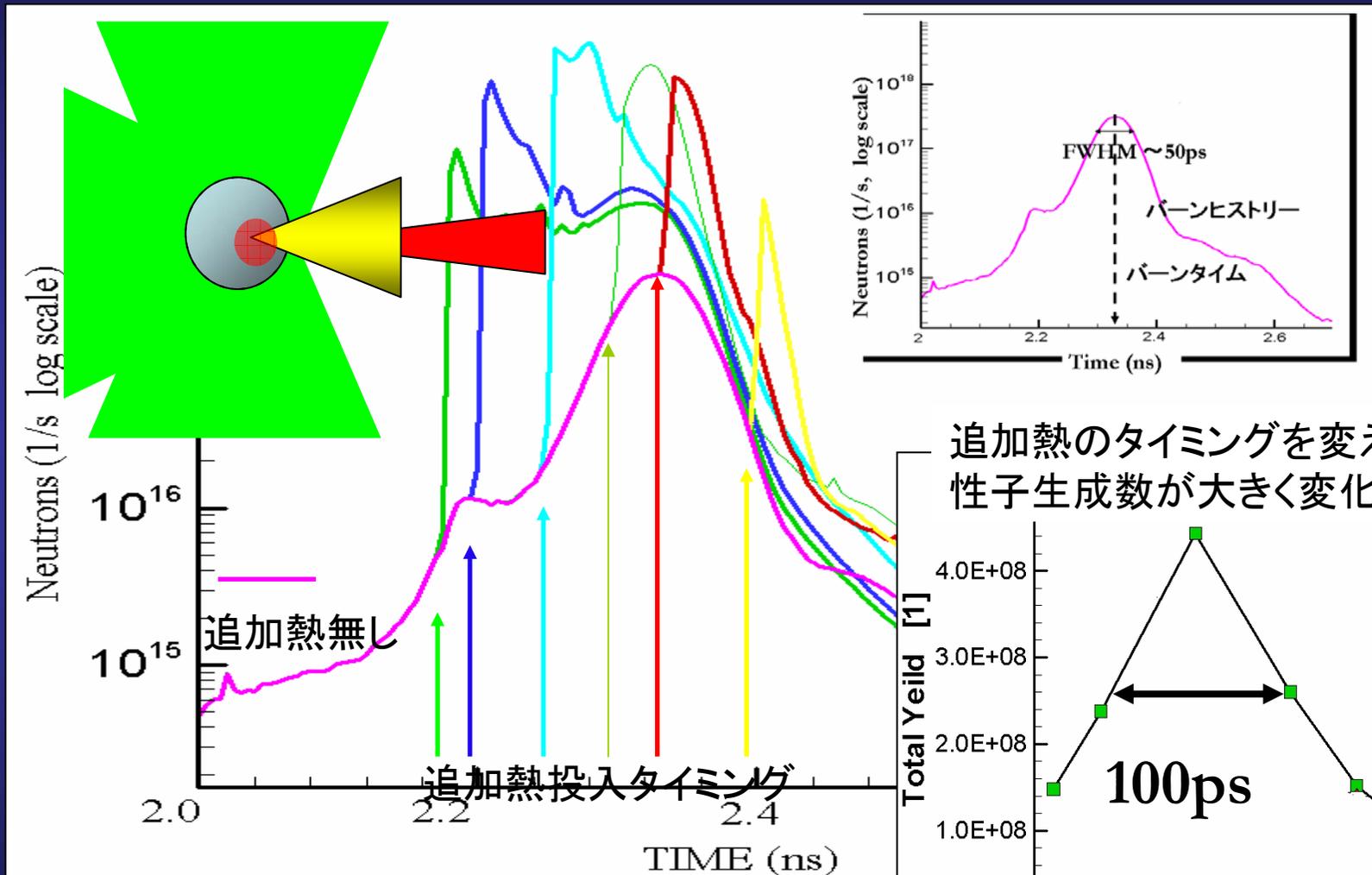


・将来のレーザー核融合発電炉ではこのサイクルを1秒間に数回繰り返し、熱を液体金属(リチウム鉛等)で回収することで発電を行うと考えられている。

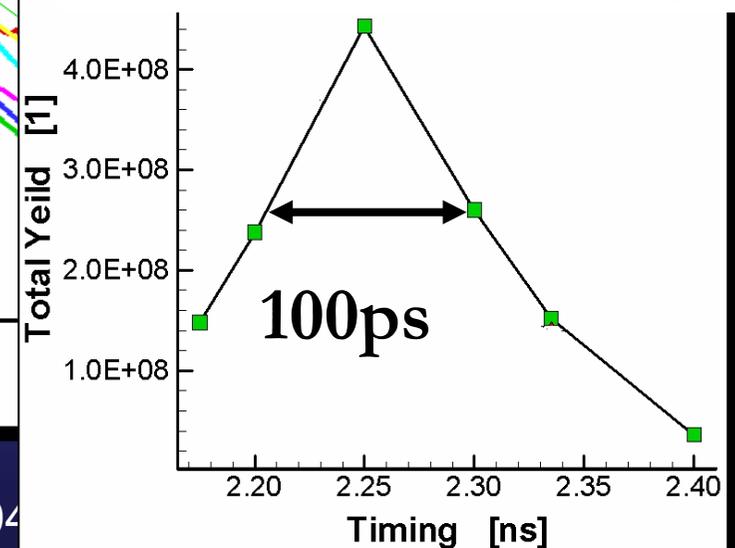
・燃料圧縮密度は目標値(固体密度の600倍)に達している。現在は燃料温度を5keVに到達させることを目標としDD反応を用いて実験を行っている。

・世界最大エネルギー密度をもつ追加熱用LFEXレーザーが現在建設中であり、年内に動き出す予定である。

追加熱によるバーンタイムの変化



追加熱のタイミングを変えると中性子生成数が大きく変化する。



武田氏・長友氏らによるシミュレーションによる結果(2004)
シミュレーションコード"PINOCO"

要求性能

(1) 時刻計測に対する時間分解能100ps以上

→発光の立ち上り時間が短いBC-422プラスチックシンチレータ(10 ps)に、光電子増倍管(110 ps)もしくはストリークカメラ(10 ps)などの時間分解能の良い光検出器を組み合わせ計測を行う。

(2) 高エネルギーX線環境下で運用可能

→光検出器を高エネルギーX線から保護(遮蔽)する。

※シンチレーターとフォトンディテクターを分離し、光ファイバーで信号を伝送する。

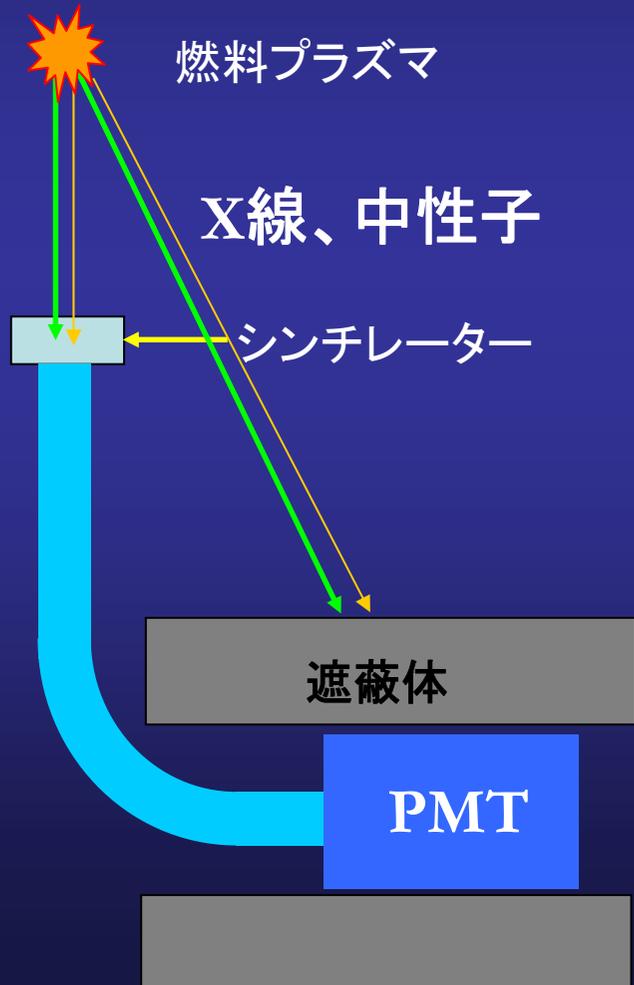
(3) 広いダイナミックレンジを持つ ($Y_n = 10^5 \sim 10^8$)

→光電子増倍管を用いれば、単一シンチレーションを検出可能な計測器は可能である。バースタイム計測に特化する。

* 立上がり110psのものを使用。高イールドでは減光をする。

各要素の設計・要求

光電子増倍管 (PMT) の信号立ち上がり時間は110psであるが、以下の諸要因により、計測される信号の立ち上がり時間はPMT自体の立ち上がり時間よりも遅くなると考えられる。



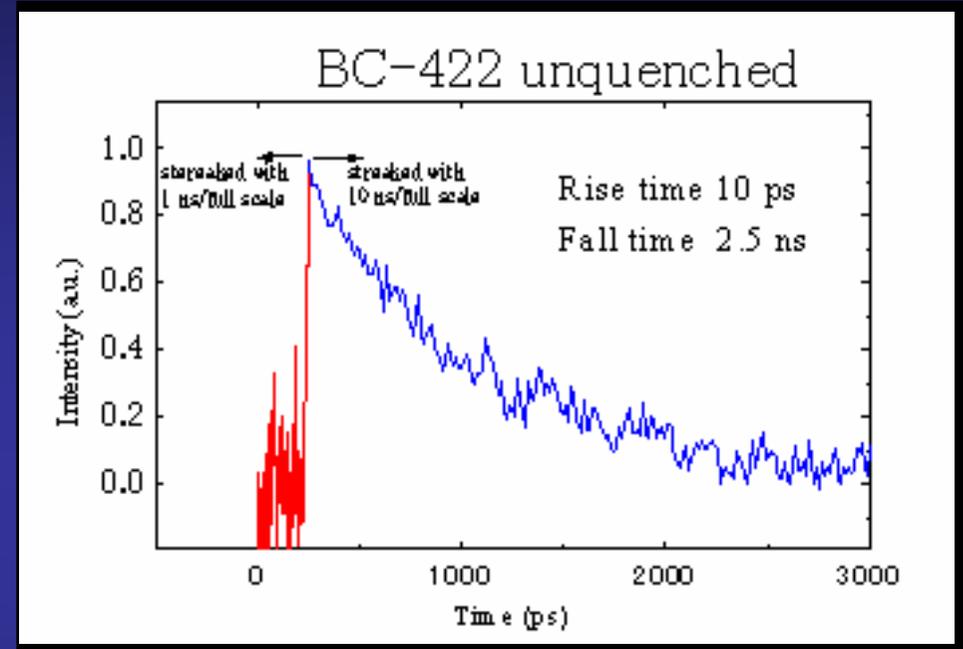
- (1) シンチレータの立ち上がり
- (2) 検出位置の不確定性
- (3) 中性子のドップラー拡がり
- (4) ファイバー伝送中の分散

(1)～(4)は独立であり、これらの影響で計測器の時間分解能が大きく劣化しないように、**各項が時刻計測に与える分散の標準偏差を55 ps (PMTの立ち上がり時間の半分) 以下に抑える。**

(1) シンチレータの立ち上がり

チタンサファイアレーザーの3 ω (290 nm、150 fs、60 μ J)で励起させたシンチレータからの発光を時間分解能17 psのストリークカメラを用いて計測した。

その際、立ち上がりは1イベント、立下りは1000イベントの積算で別々に取得している。

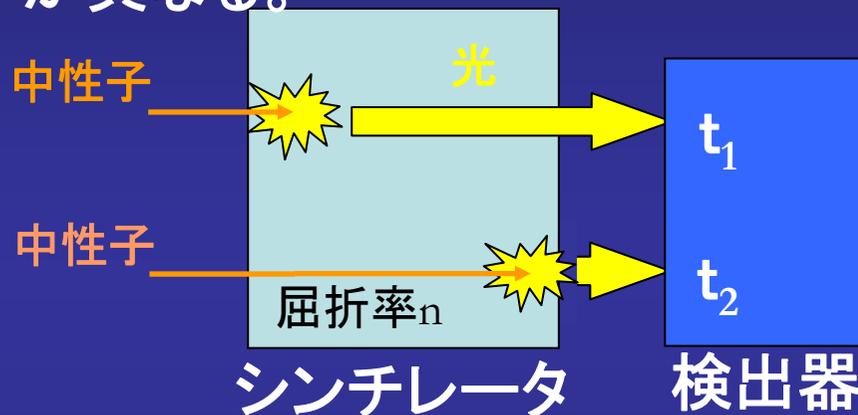


計測に用いたシステムのレスポンス (17 ps) をデコンボリューションすると、**シンチレータの立ち上がり時間は10 psである。**

中性子に散乱された反跳陽子でシンチレータが励起される場合、その時間幅 (最大7.5 ps) により、**立ち上がり時間は最大で12.5 psに劣化するが、本計測器のシンチレータとしては十分である。**

(2) 検出位置の不確定性

DD中性子(2.1cm/ns)は光(30cm/ns)に較べて遅いため、同じタイミングで検出器に入った中性子でも反応を起こした位置によって時間が異なる。



$$t_2 - t_1 = \frac{d}{v_n} - \frac{d}{c/n}$$
$$= 43 d \left[\frac{\text{ps}}{\text{mm}} \right]$$

検出時刻に与える不確定性を55 ps以下にするためにはシンチレータの厚みは1.3 mm以下であれば良い。

そこで、我々は**1 mmのシンチレータを使用する**事を決定した。

このとき、**検出時刻の不確定性は43 ps**であり、また中性子の散乱断面積から決まる**検出効率は1.3%**であった。→ 10^5 の中性子イールドで1個程度の検出が見込まれる。

(3) 中性子のドップラー広がり

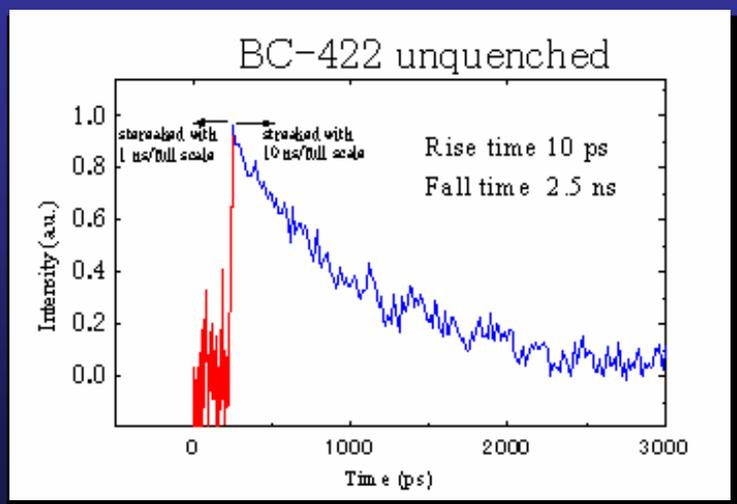
DD中性子は核反応を起こす2つのDイオンの運動によりドップラー広がりを受ける。Dイオンの速度分布をMaxwell分布で仮定すると、中性子TOF分布のFWHMは次式で計算できる。

$$\Delta t_{dop} [\text{ps}] = 0.778 \sqrt{T [\text{keV}]} \times L [\text{mm}]$$

T: イオン温度

L: 計測器設置位置

ここで、燃料のイオン温度を1 keVとすると、中性子のドップラー広がりを55 ps以下に抑えるためには $L < 71 \text{ mm}$ でなければならない。

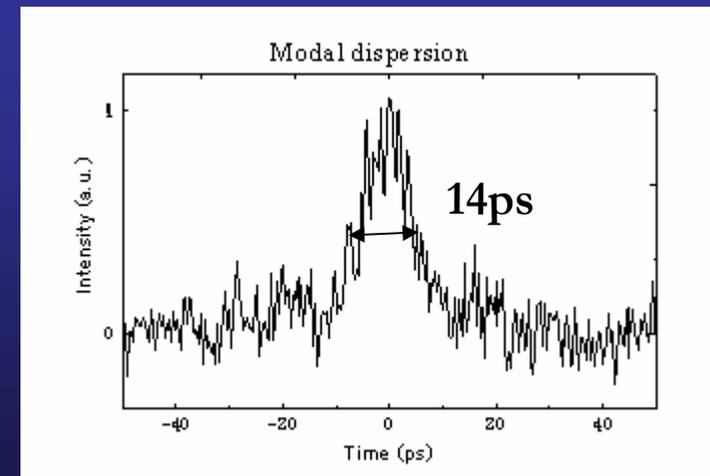
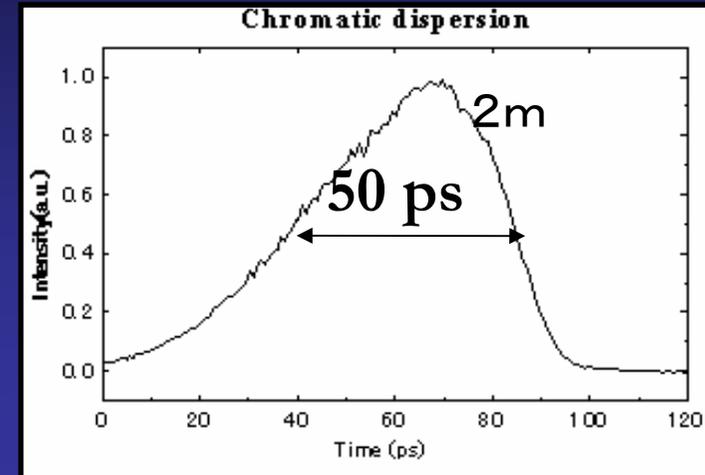


また、中性子/X線の弁別の観点から、X線と中性子のTOF差が2500 ps以上となる $L > 57 \text{ mm}$ が要請される。

燃料プラズマから62mmに設置する。
このとき、ドップラー広がり48 psであり、TOF差2.7 nsであった。

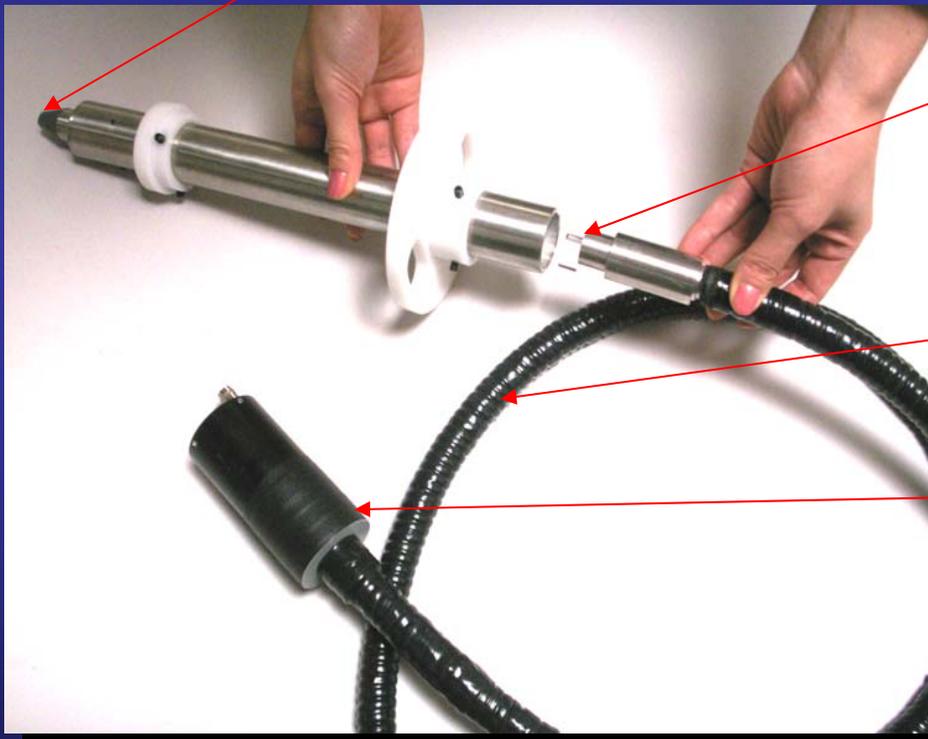
(4)ファイバー伝送中の分散

- シンチレーターの発光スペクトルはブロード(半値全幅100nm程度)であり、色分散がモード分散よりはるかに大きくなる。
- 色分散を50 ps以下にするためにはファイバー長は2 m以下でなければならない。PMTの鉛遮蔽をする設計上の制約から2mに決定した。
- 2 mのファイバーを用いてモード分散を実測すると14psであった。全体の分散はFWHM 52 psであり、要求を満たすことを確認した。



高速応答中性子検出器が完成

(2) ターゲットからシンチレーターまでの距離62 mm



(1) プラスチックシンチレーター

BC-422 unquenched (BICRON)
18 mm ϕ \times 1 mm t

(3) バンドルファイバー(住友電工)

光透過面10 mm ϕ \times 2 m

MCP-PMT(浜松ホトニクス)

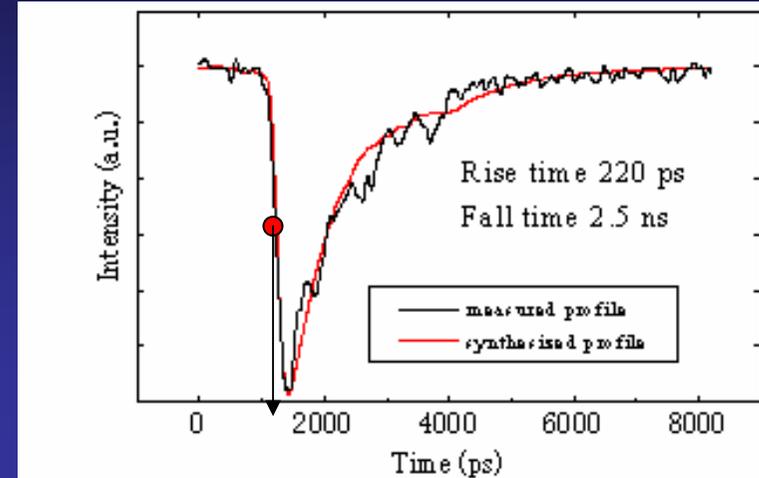
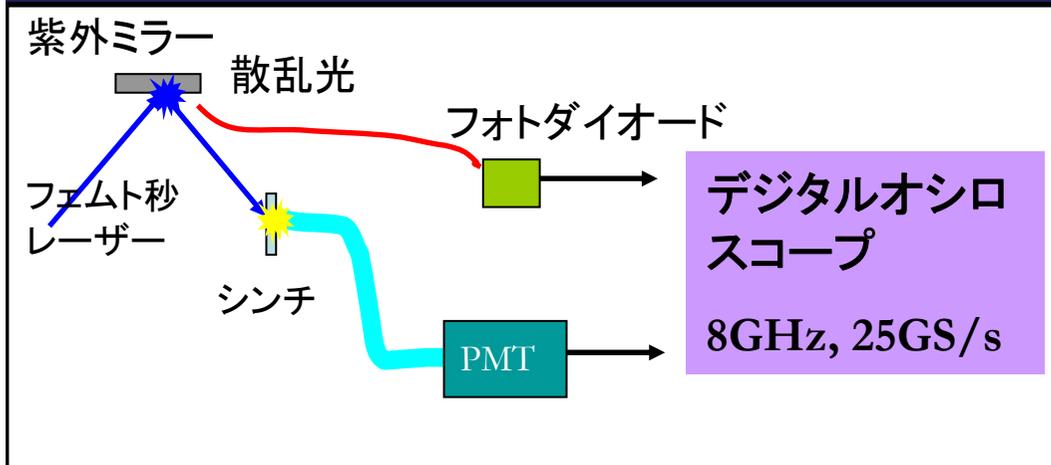
R7024U

光電面10 mm ϕ

Rise time 110 ps

製作した高速応答中性子シンチレーション検出器

計測器全体のインパルス応答



- 計測されたインパルス応答はシンチレーター、ファイバー、PMTの応答をコンボリューションした波形と一致を示した。
- フォトダイオード信号⇔中性子検出器信号の時間間隔を両者の立上がり50%の点で測ると、計測される時間の分散の標準偏差は39 psであった。
 - photon統計と立上がり時間で決まる検出時刻の不確定性(10 ps)に比べて大きく、これはオシロのサンプリング間隔(40 ps)によるものだと考えられる。
- 実際の中性子計測では、ドップラー拡がり、シンチレータ内における検出位置の不確定性により、時間分解能は最大46 psまで劣化すると考えられる。
 - * 検出数が少ない(1個程度)場合を想定して、それぞれの拡がりをコンボリューションして、標準偏差をとった。

まとめ

- 高速点火実験におけるバースタイム計測のための高速応答中性子検出器の開発を行った。
- 各構成要素の応答を実験的に測定し、そこから予想された計測器全体のインパルス応答は実験と良い一致を示した。
- 計測器の時間分解能は46 ps以下であることを確認し、この精度でバースタイム計測が可能であると考えられる。

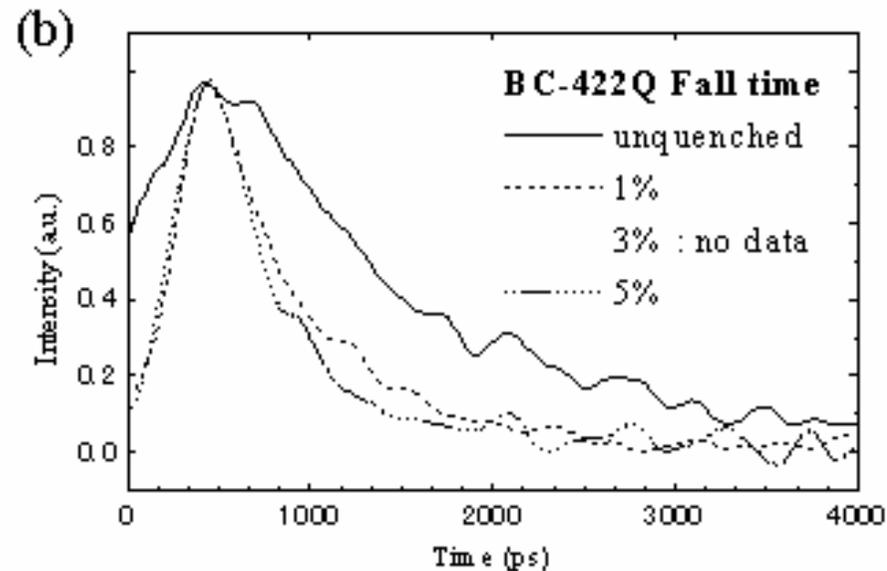
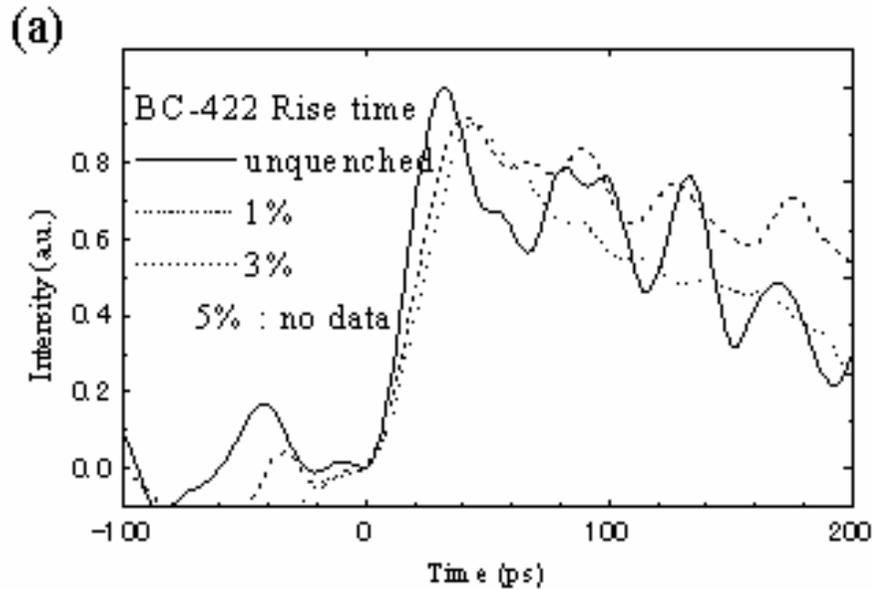
今後の展開

- 慣性核融合実験にて実際にバースタイム計測を行う。
- LFEXを用いて、X線遮蔽試験を行う。
- 高イールド用にストリークカメラに用いたバースヒストリー計測器の開発も行う予定である。



ご静聴ありがとうございました。

(1) シンチレーターの応答特性 (BC-422, BC-422Q)



Rise time

Fall time

unquench :10ps

unquench :2500p

1%Q :19ps

1%Q :1200ns

3% :30ps

5% :900s

・クエンチによって立ち上がり時間は遅くなっている。ベンゾフェノンからの発光が混ざることが原因だと考えている。

時間分解能評価について

1個のシンチレーションを検出した場合

(1) ドップラー拡がりにてFWHM48psのTOFのばらつき。

(2) シンチの厚さで43psの検出時刻不確かさ。

(3) 計測器としての時刻検出限界39ps。

が重なるので、全波形をコンボリューションして標準偏差をとり46psと結論付けた。

イールドが上がれば(1)や(2)は波形処理で補正できるようになり、時間分解能は向上すると考えられる。