
超高強度レーザー生成相対論電子ビームによる
高速点火核融合に関する研究

**Study on fast ignition in laser fusion
with relativistic electron produced
by ultra-intense laser**

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

中村 浩隆

若手研究者によるプラズマ研究会

日本原子力開発機構 那珂研究所 2009年3月16-18日

共同研究者



ILE Osaka

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

疇地宏, 三間囃興, 藤本靖, 藤岡慎介, 本間啓史, 城知至, 実野孝久, 古賀麻由子,
河仲準二, 宮永憲明, 村上匡且, 長友英夫, 長井圭治, 中井光男, 中里智治, 西原功修,
西村博明, 乗松孝好, 坂和洋一, 猿倉信彦, 重森啓介, 清水俊彦, 白神宏之, 砂原淳,
椿本孝治

大阪大学工学研究科

羽原英明, 兒玉了祐, 近藤公伯, 田中和夫

核融合研究所

磯部光孝, 岩本晃史, 三戸利行, 本島修, 尾崎徹, 坂上仁志,

日本原子力研究所関西研究所

中村龍史

九州大学大学院工学研究科

中尾安幸

摂南大学

田口俊弘

Outline



ILE Osaka

- ・高速点火核融合とは？
- ・超高強度レーザー生成相対論電子ビームの伝搬
 - プロトンラジオグラフィによる固体中の電子の伝搬
 - 加熱効率診断による爆縮プラズマ中の電子の伝搬
- ・レーザー核融合高速点火実証実験FIREX
Fast Ignition Realization Experiments (FIREX)

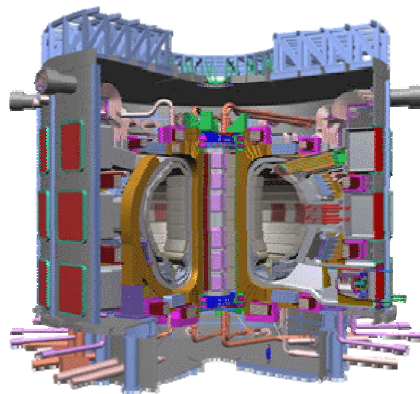
磁場閉じ込め核融合と慣性閉じ込め核融合



ILE Osaka

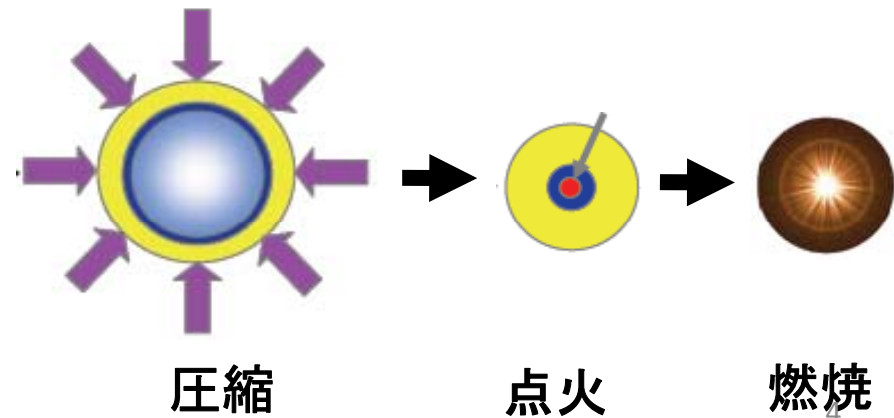
磁場核融合

- 密度 $4 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3$
- 閉じ込め時間 10s (transport)
- 核融合パワー 1GW



慣性核融合

- 密度 1000 g/cm^3
- 閉じ込め時間 10^{-10} s (慣性)
- 核融合エネルギー 100MJ/pulse (10Hz)

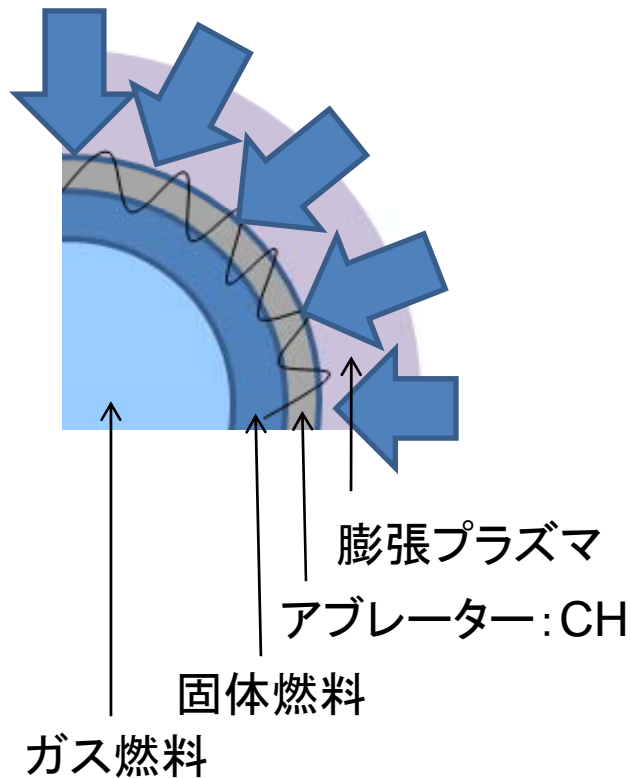


レイリー・テイラー不安定性が高密度爆縮を妨げる



ILE Osaka

慣性閉じ込め核融合は球状シェル爆縮で燃料を固体密度の1000倍以上に圧縮する



- ・ターゲット表面に存在する凸凹
- ・照射レーザーの空間的な非一様性



レイリー・テイラー不安定性が急激に成長



爆縮の球対称性を著しく劣化させ、高密度コア・プラズマの形成を阻害

超高強度レーザー生成相対論電子ビームによる 高速点火核融合

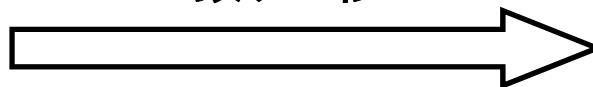


ILE Osaka

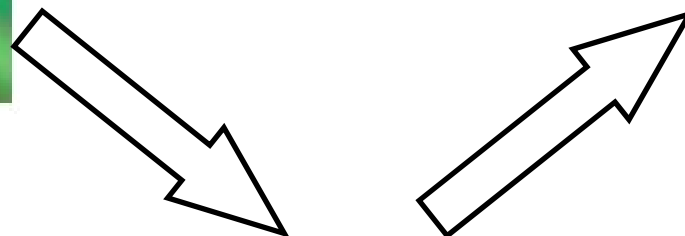


圧縮用高強度レーザー
エネルギー: ~ 1 MJ
パルス幅: ~ 10 ns
強度: $10^{13} \sim 10^{14}$ W/cm²

中心点火方式
数十ナノ秒



点火・燃焼



高速点火:加熱

加熱用超高強度レーザー
エネルギー: ~ 100 kJ
パルス幅: ~ 10 ps
強度: $\sim 10^{19}$ W/cm²



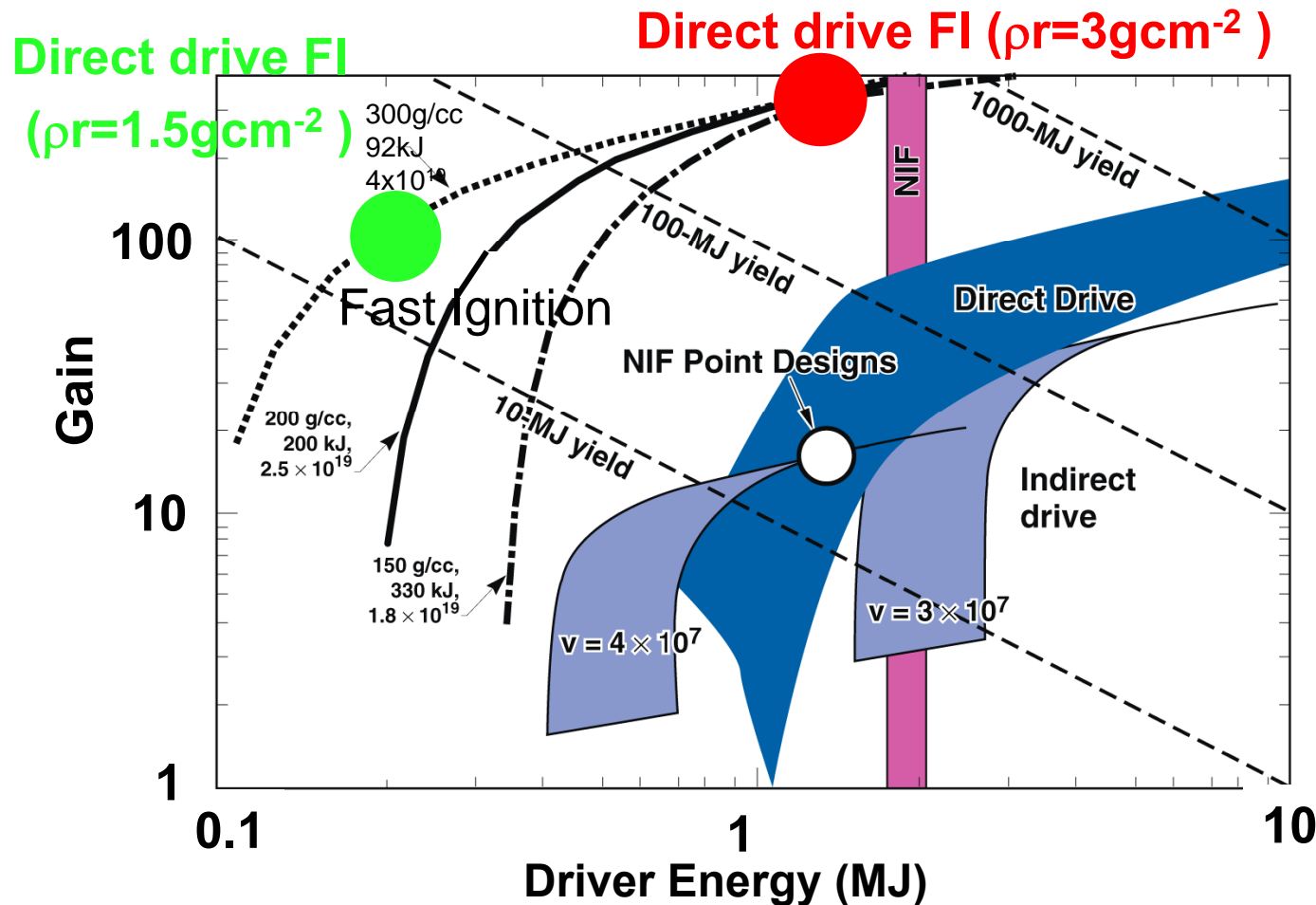
相対論電子ビーム
電流密度: ~ 10 TA/cm²
エネルギー: \sim MeV

高速点火方式はレーザー照射条件を緩和し、 高いゲインを得ることができる



ILE Osaka

- ・爆縮の球対称性に関する条件の緩和
- ・点火に要するレーザーパルスのエネルギーを小さくし高利得が可能

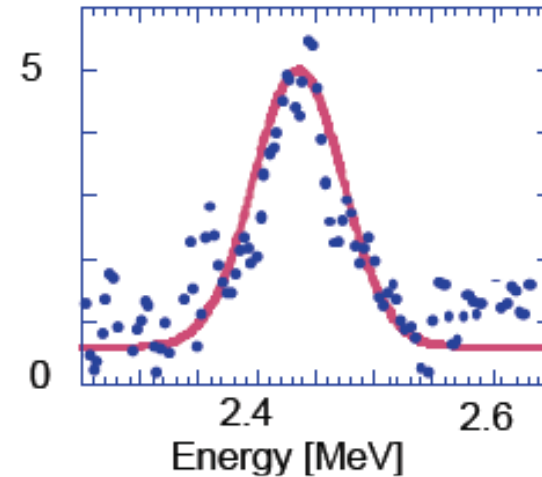
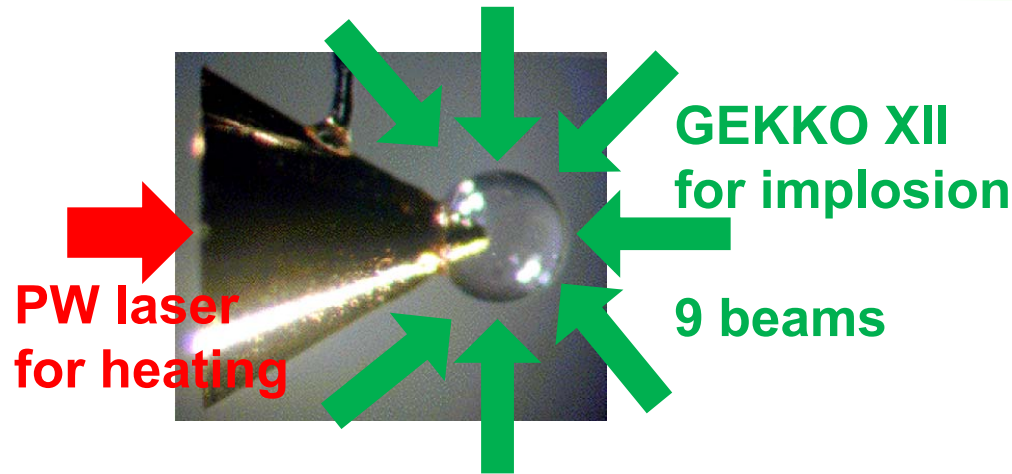


M H Key et al.,
J. Fus. Energy
17, 231, (1998)

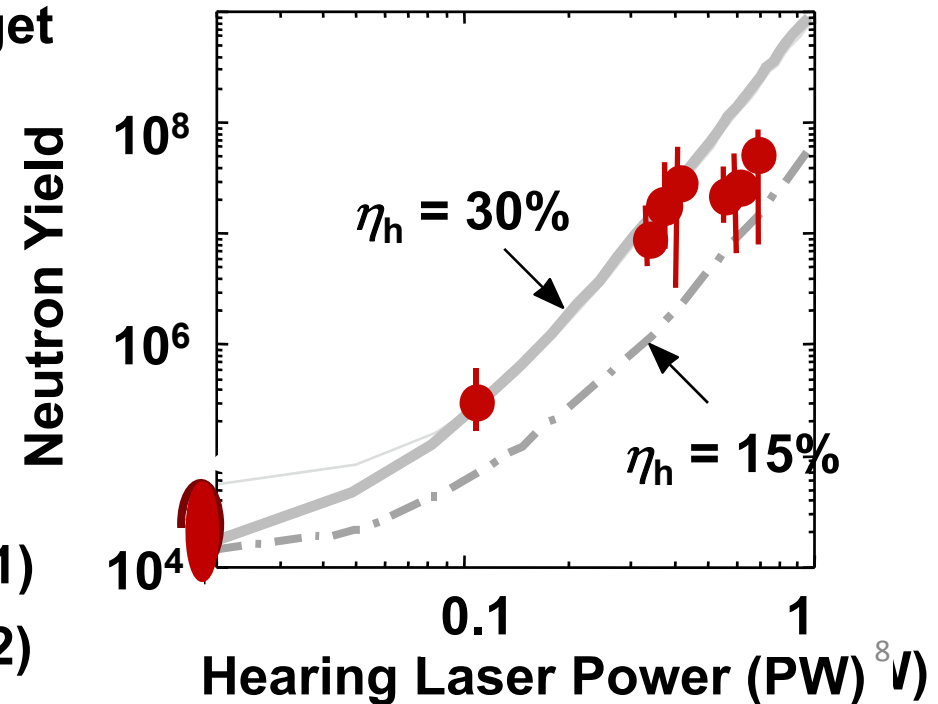
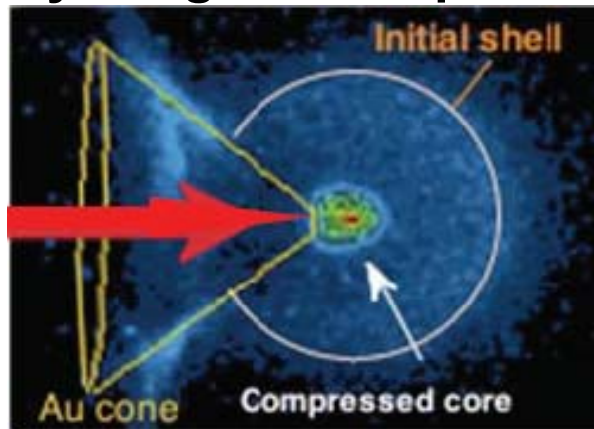
加熱用レーザーのパワーに依存した 中性子発生数の増加を計測



ILE Osaka



X-ray Image of compressed target



R. Kodama et al., Nature 412 (2001)

R. Kodama et al., Nature 418 (2002)

Outline



ILE Osaka

- ・高速点火核融合とは？

- ・**超高強度レーザー生成相対論電子ビームの伝搬**

- プロトンラジオグラフィによる固体中の電子の伝搬
 - 加熱効率診断による爆縮プラズマ中の電子の伝搬

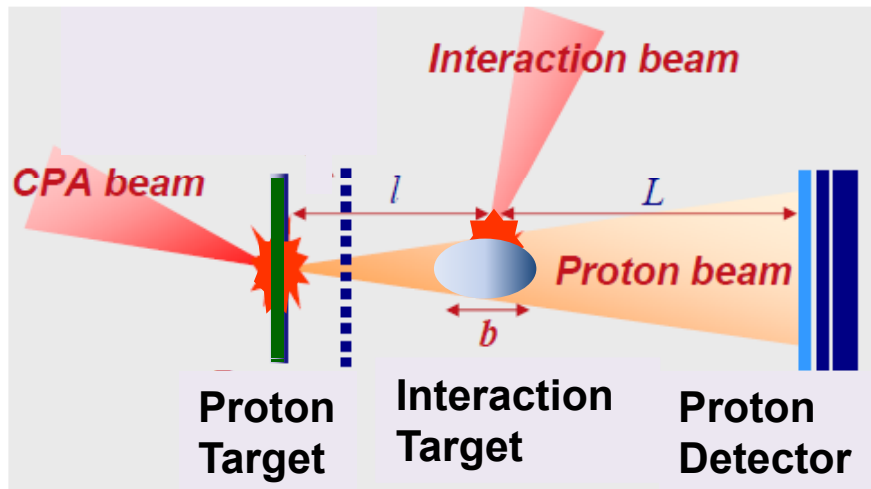
- ・レーザー核融合高速点火実証実験FIREX
Fast Ignition Realization Experiments (FIREX)

プロトンラジオグラフィによる電磁界分布診断

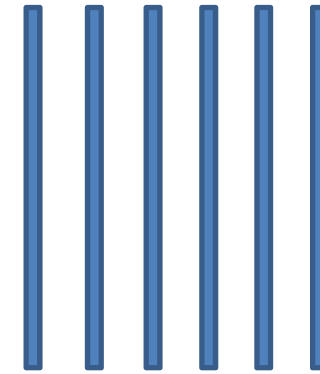


ILE Osaka

電磁界分布診断



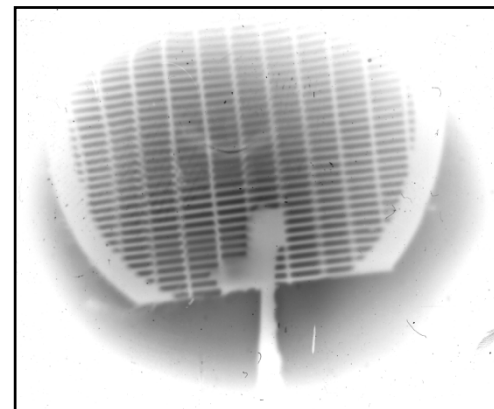
多層検出器



陽子のブラックピークから
エネルギー分解計測になる



Radiography



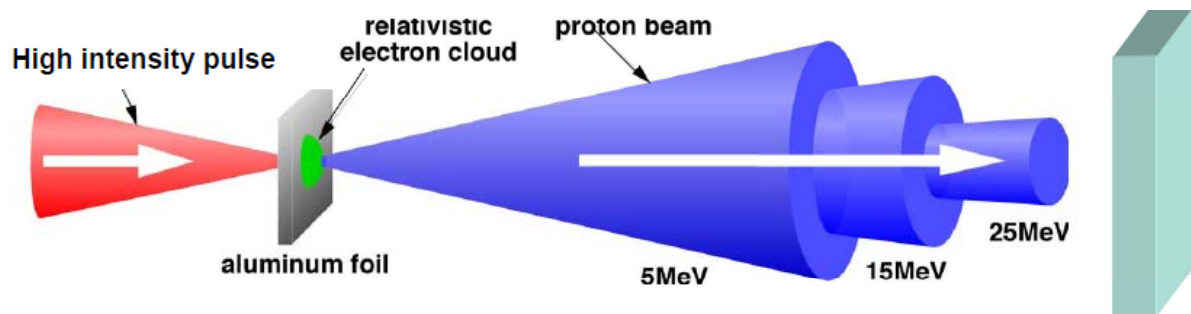
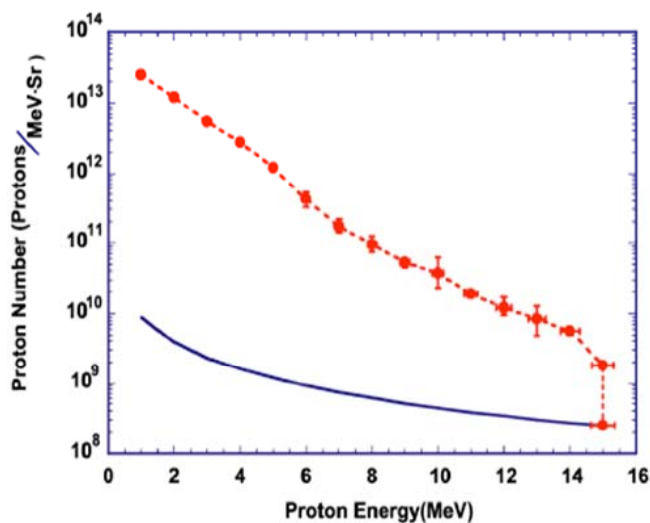
空間分解能 数 μm

超高強度レーザー生成MeV陽子ビームによる 時間分解ラジオグラフィ計測



ILE Osaka

プロトンエネルギースペクトル



広いエネルギー幅を持つ陽子ビーム



診断対象物上を通過する時間がエネルギーごとに異なる



エネルギー分解2次元計測を行うことで
時間分解2次元計測が可能になる

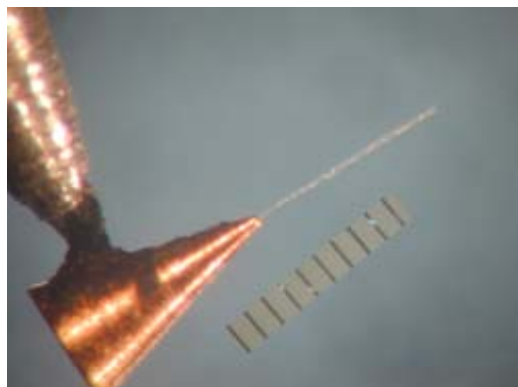
$$t_n = E_n$$

実験配置



ILE Osaka

Target: Au Cone- CD Wire

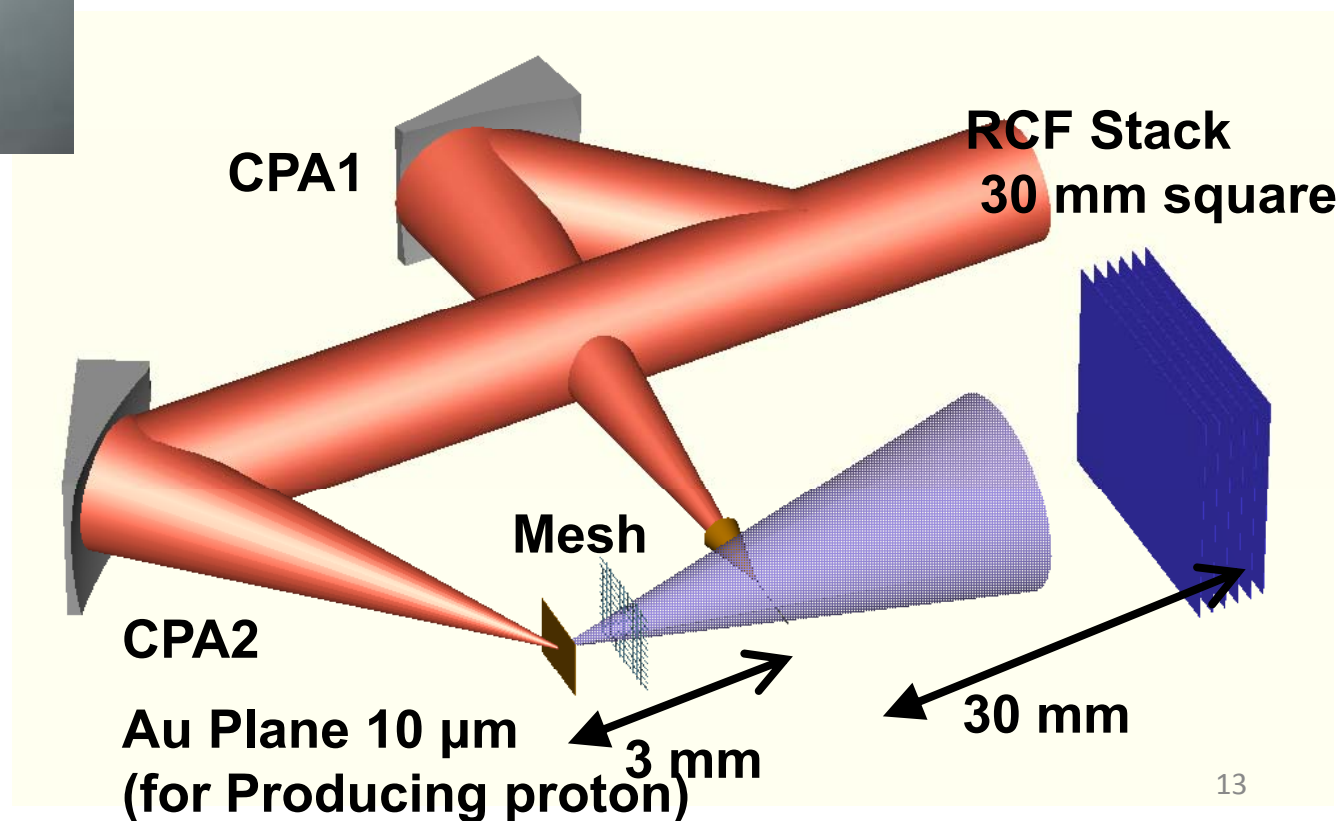


Vulcan Laser System
at Rutherford Appleton Laboratory

エネルギー: CPA1 20-50 J

CPA2 20-50 J

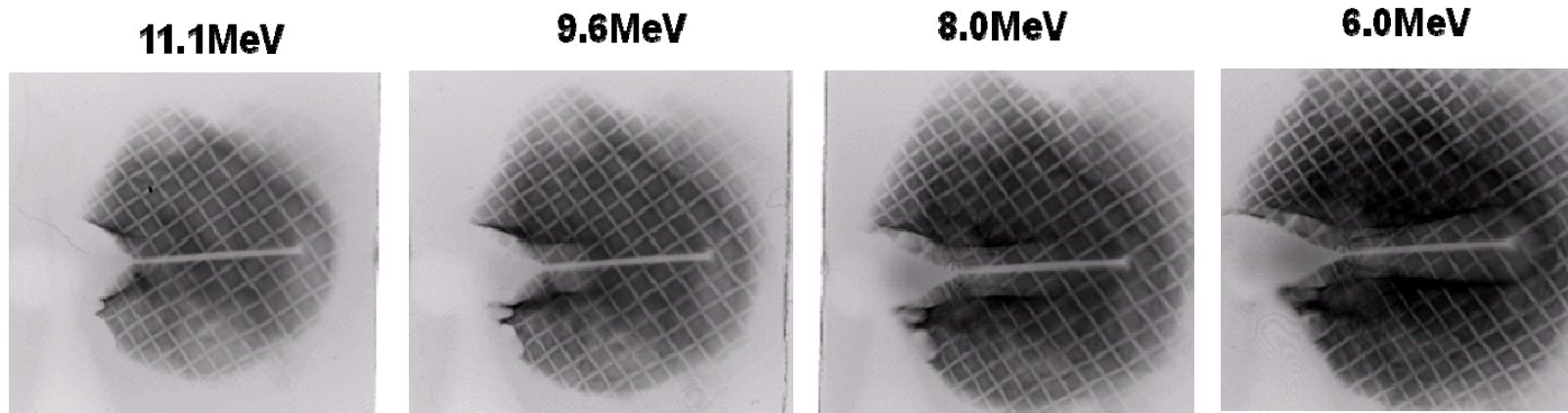
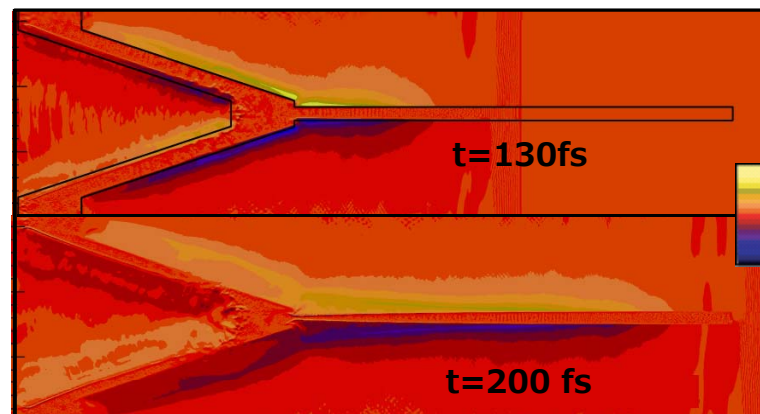
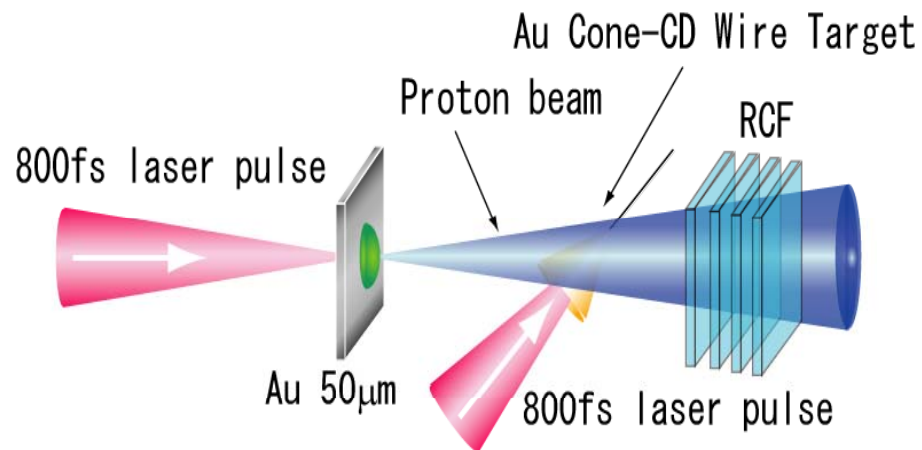
強度 $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$



ワイヤー中を伝搬する電子ビームにより 励起された電界分布診断



ILE Osaka



-0.3 ps 2.9 ps 5.1 ps 9.9 ps **time**

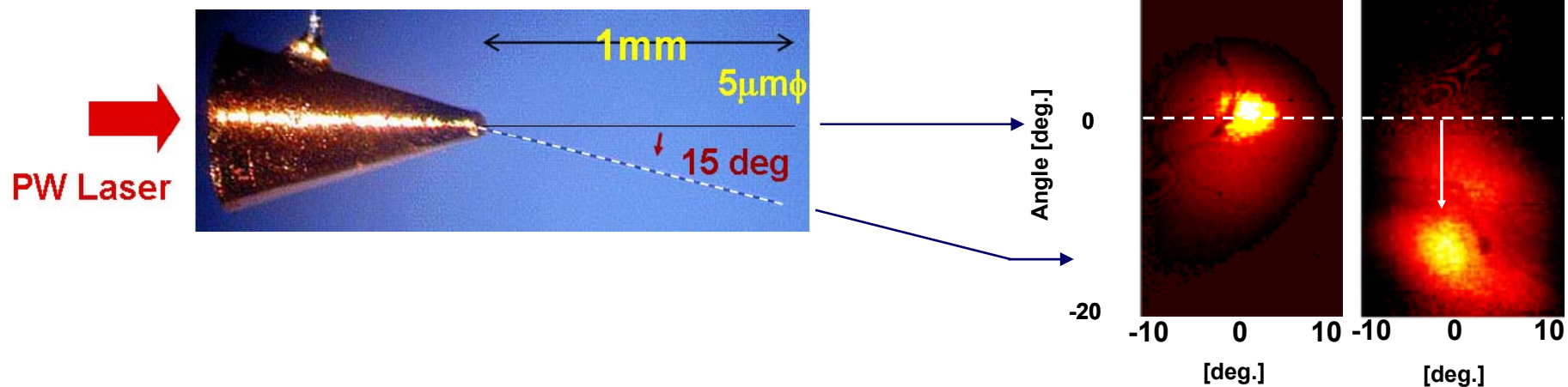


ILE Osaka

電子ビームの方向はワイア方向に伴って変化

ワイヤプラズマによる高エネルギー密度電子流のガイドを実験でも確認した。

ワイヤ先端から3 cmの場所での
>3.5 MeVの電子分布像



プラズマ・真空境界面でのシース電界によって高速電子が横方向にトラップされながら伝搬する様子が確認された

R. Kodama et al., Nature 432, 1005 (2004)

爆縮プラズマ中での相対論電子ビームの伝搬の診断

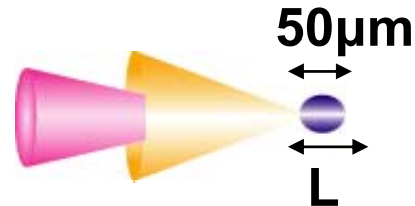


ILE Osaka

超高強度レーザーから爆縮プラズマへの加熱効率

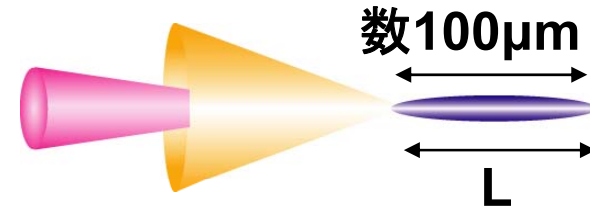
- ・爆縮プラズマの密度 ρ
- ・相対論電子に対する爆縮プラズマのストッピングパワー $\frac{dE}{dx}$
- ・爆縮プラズマ中の相対論電子の伝搬距離 ℓ

球体爆縮プラズマの高速加熱



$$\eta_s = (\rho L)_s \frac{dE}{dx} / E_L$$

シリンダー爆縮プラズマの高速加熱



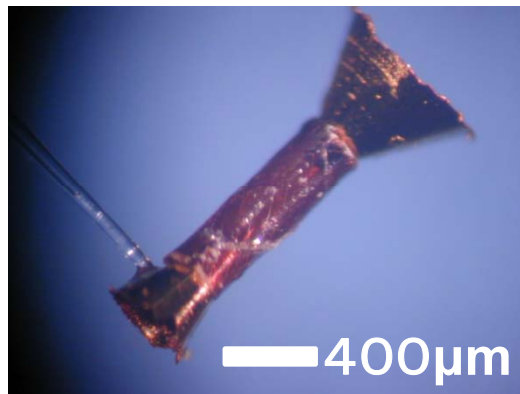
$$\eta_c = \frac{\ell}{L} (\rho L)_c \frac{dE}{dx} / E_L$$

2つの形状の異なる爆縮プラズマの加熱効率を比較して爆縮プラズマ中の伝搬距離がわかる



シリンダー状爆縮プラズマの生成

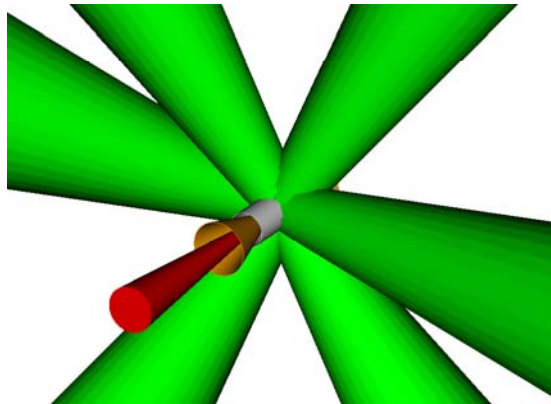
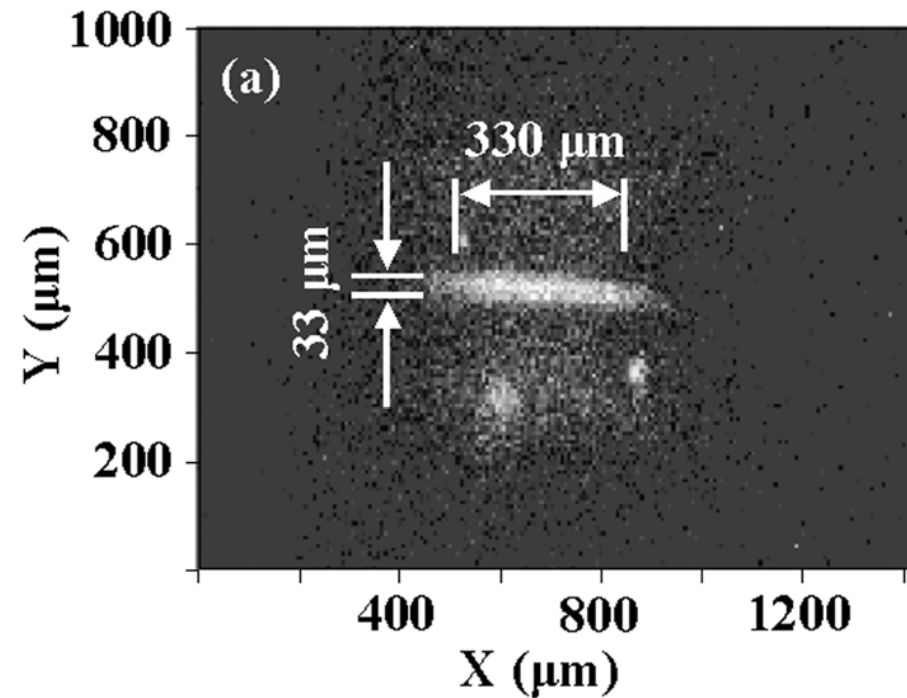
Cylinder Shell Target



GEKKOⅪ Laser(6beam)-Implosion

Energy 200J/beam

Pulse width 1.2ns



シリンダー状爆縮プラズマ

サイズ: 350 × 30 × 40 μm (球状の10倍)

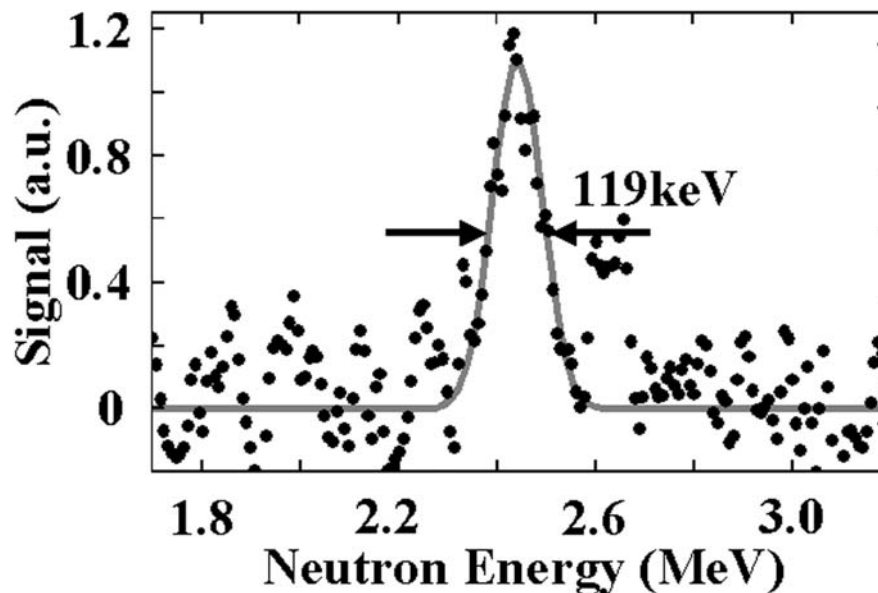
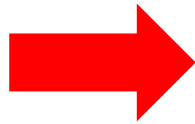
密度: 6-9 g/cm^3 (球状の1/10倍)

400 eV以上の追加熱を実現し、 加熱効率が14 – 21 %となった



ILE Osaka

PW Laser
for Heating



プラズマイオン温度 0.6 keV
中性子発生数 2×10^5

カップリングエネルギー
 $= \Delta T \times \rho \times V \times (1 + Z) \times e$
 $= 18 - 27 \text{ J}$

ΔT : The increase in Ion Temperature
 V : The volume of the cylindrical plasma
 ρ : The density of the cylindrical plasma
 Z : Atomic Number



レーザーからプラズマへの
エネルギーカップリング効率
14 - 21%

相対論電子ビームは固体中と同様に 爆縮プラズマ中もガイドされて伝搬している



ILE Osaka

球体爆縮プラズマの加熱効率

$$\eta_s = (\rho L)_s \frac{dE}{dx} / E_L \quad : \quad 15 \sim 30 \%$$

シリンダープラズマの加熱効率

$$\eta_c = \frac{\ell}{L} (\rho L)_c \frac{dE}{dx} / E_L \quad : \quad 14 \sim 21 \%$$

ℓ : 爆縮プラズマ中の電子ビームの伝搬距離

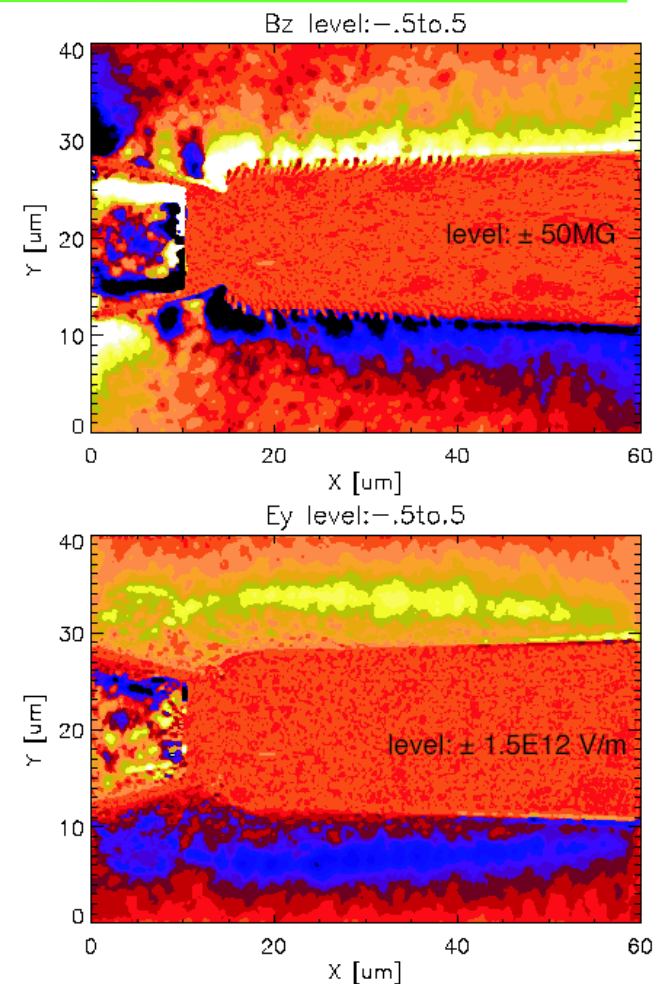
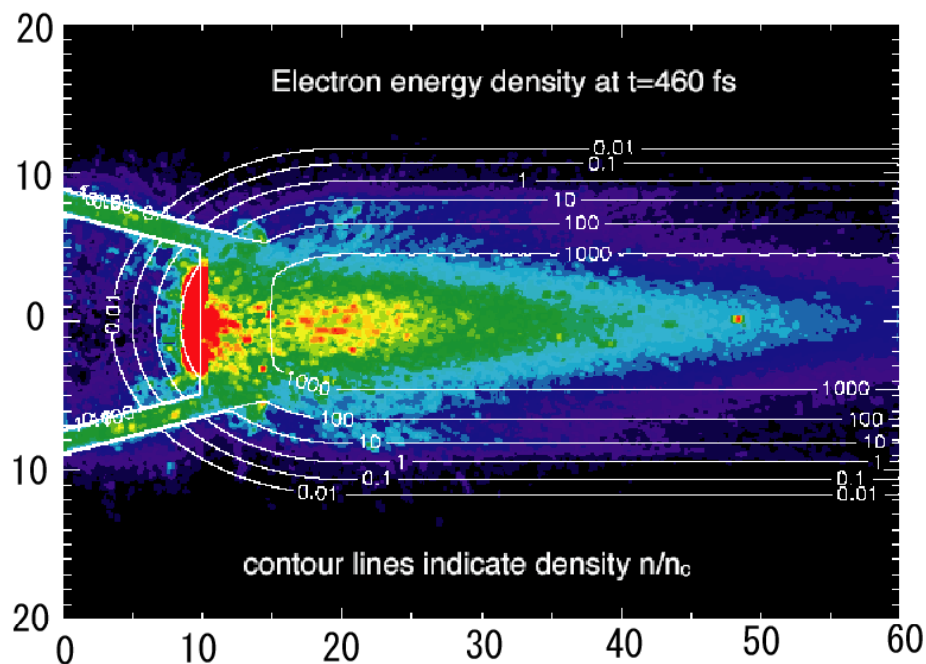
L : 爆縮プラズマの長さ

爆縮プラズマ中の伝搬距離は爆縮プラズマの長さに等しいと予想できる

爆縮プラズマの場合でも電子ビームをガイドする 電磁場が生成されている



ILE Osaka



爆縮プラズマ周辺に発生した磁場により電子がプラズマ周辺にトラップされ、電界により高密度領域に引き戻される

H. Nakamura et al, Phys. Rev. Lett. 100, 165001 (2008)

Outline



ILE Osaka

- ・高速点火核融合とは？
- ・超高強度レーザー生成相対論電子ビームの伝搬
 - プロトンラジオグラフィによる固体中の電子の伝搬
 - 加熱効率診断による爆縮プラズマ中の電子の伝搬
- ・レーザー核融合高速点火実証実験FIREX
Fast Ignition Realization Experiments (FIREX)

LFEXレーザーによる高速点火でプラズマ加熱温度 5keVを目指す: FIREX-I



ILE Osaka

LFEXレーザー



Wavelength: 1053 nm (Nd: glass laser)

Pulse energy: **10 kJ**

Pulse width: 1-20 ps (FWHM)

10 ps (typical)

, for >5-keV heating of dense fuel.

世界のレーザー核融合プロジェクト

高速点火方式: 2010年 点火温度
2010年後半 点火



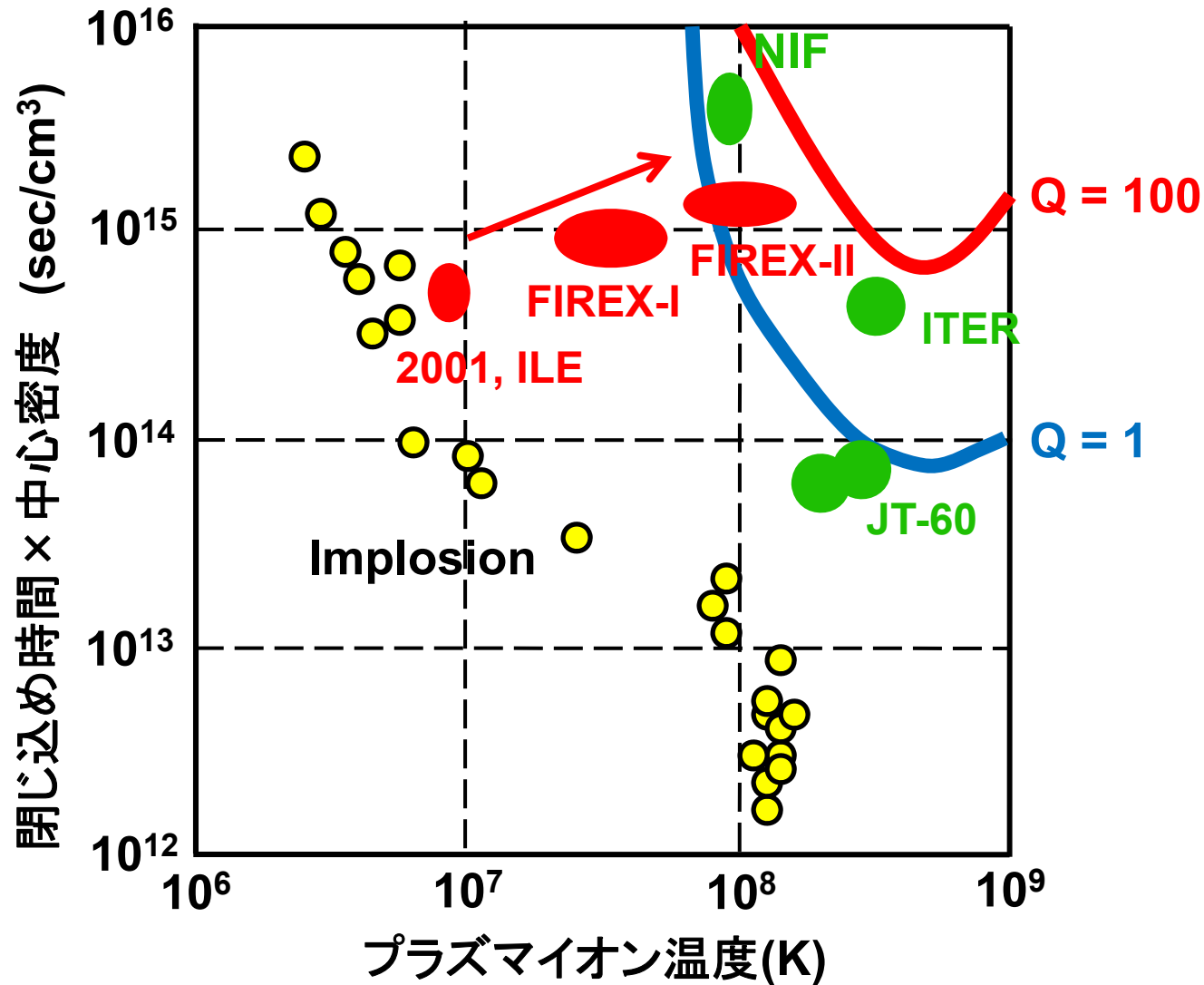
中心点火方式: 2010年代前半 点火



FIREXプロジェクト



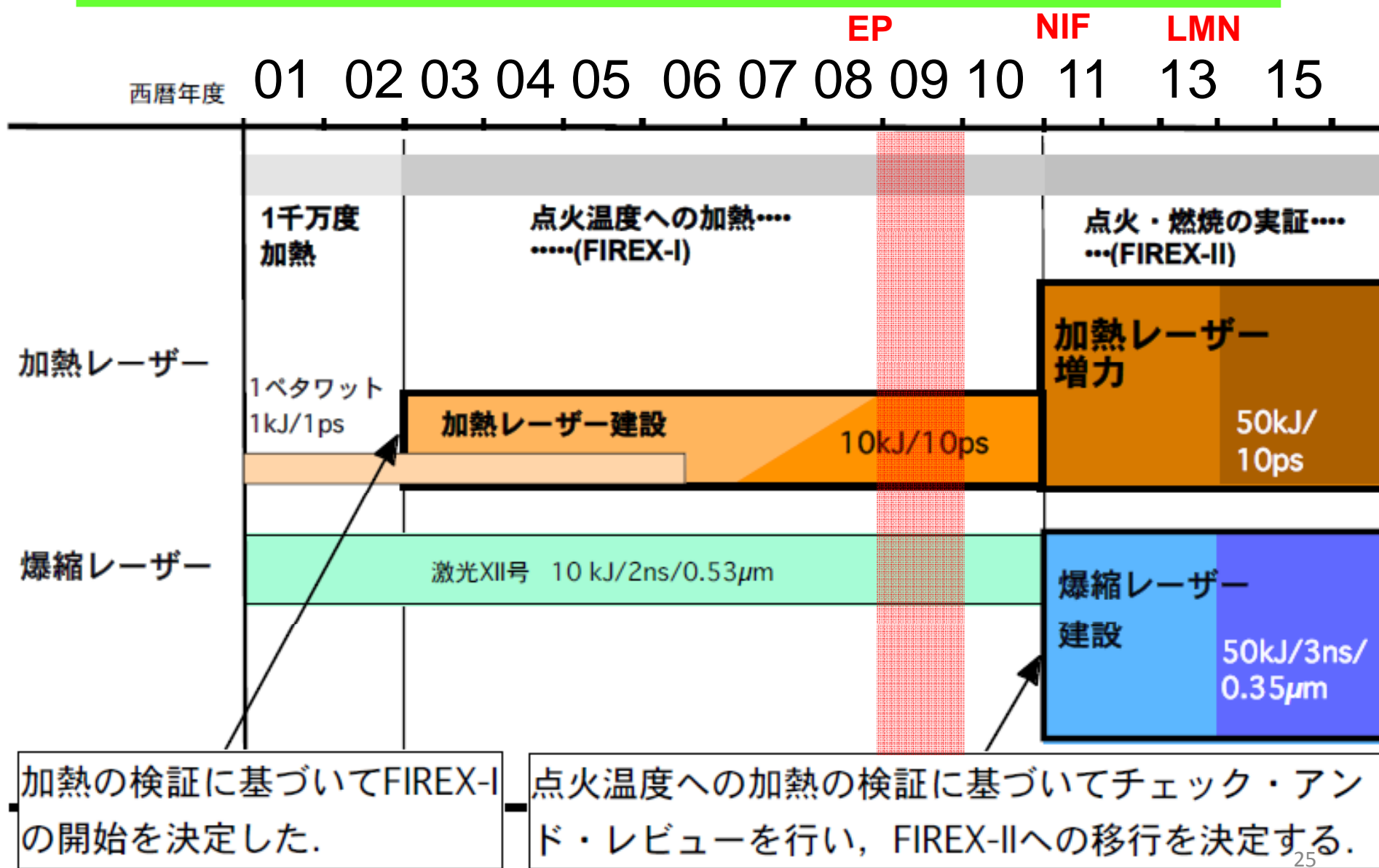
ILE Osaka



FIREXプロジェクト



ILE Osaka



- ・高速点火核融合
- ・超高強度レーザー生成相対論電子ビームの伝搬
 - プロトンラジオグラフィによる固体中の電子の伝搬
 - 加熱効率診断による爆縮プラズマ中の電子の伝搬
- ・レーザー核融合高速点火実証実験FIREX
Fast Ignition Realization Experiments (FIREX)