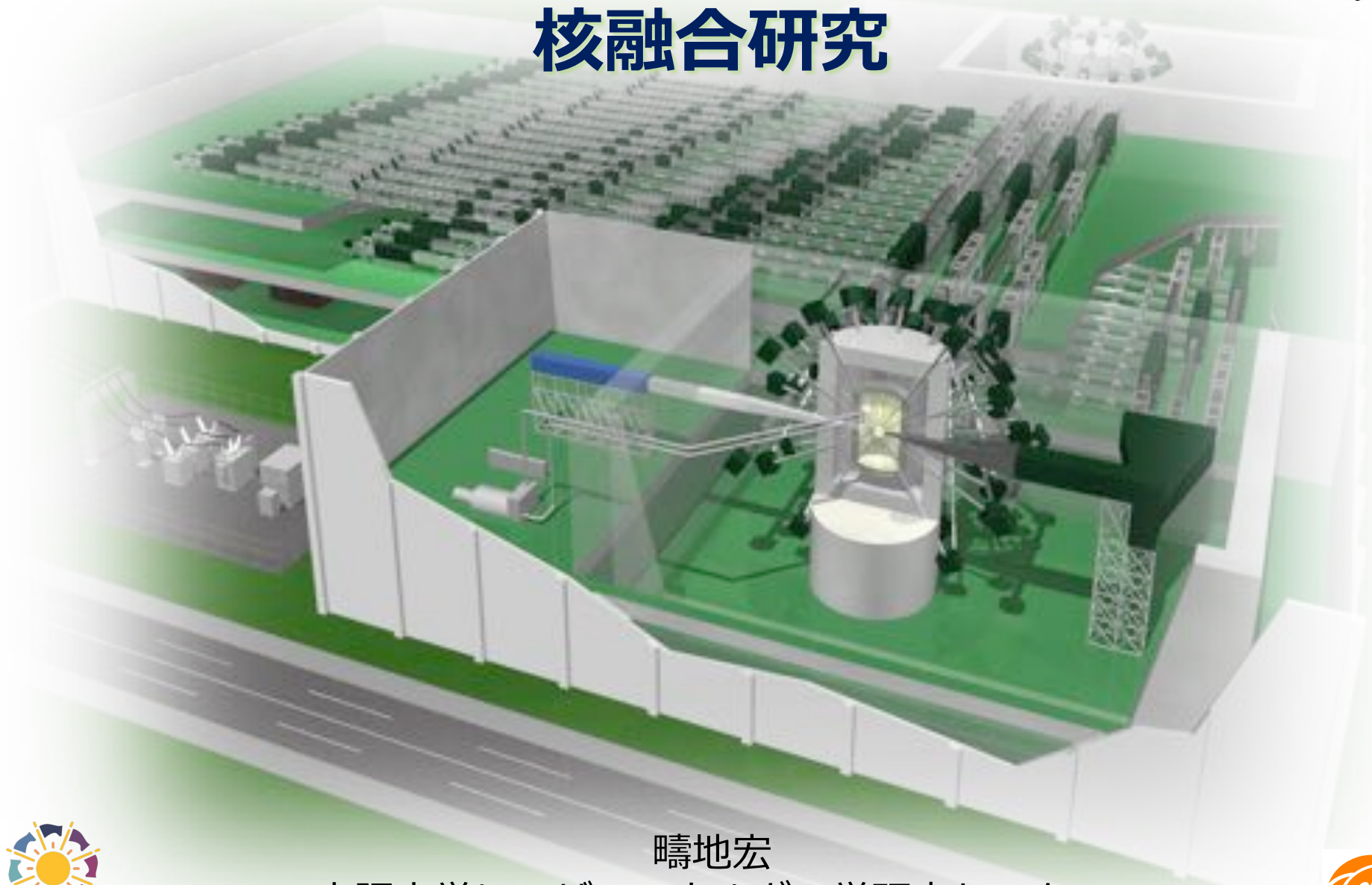


レーザー方式における 核融合研究



疇地宏

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心
第5回原型炉開発総合戦略タスクフォース@2015.12.1



OSAKA UNIVERSITY

まとめ



高速点火実証実験第I期：FIREX-Iプロジェクトの進展

- ✓ 高エネルギーの電子(> 10 MeV) がプレプラズマ中で加速される問題
→ “Cool REB キャンペーン”で解決
- ✓ レーザー加速された電子ビームが大きな発散角を持つ問題
→ “Guiding REB キャンペーン”で解決
- ✓ 高速点火におけるCritical Problemを解決し自己点火の可能性を予測可能にする。

National Ignition Facilityでのレーザー核融合点火実験

- ✓ ホットスポットと燃料層の流体混合を抑制することで、核反応アルファ粒子による加熱が顕著になってきた。
- ✓ 点火実証に向けて、流体混合の抑制、照射一様性の向上、燃料層の先行加熱の制御が進行中。

レーザー核融合炉技術の開発

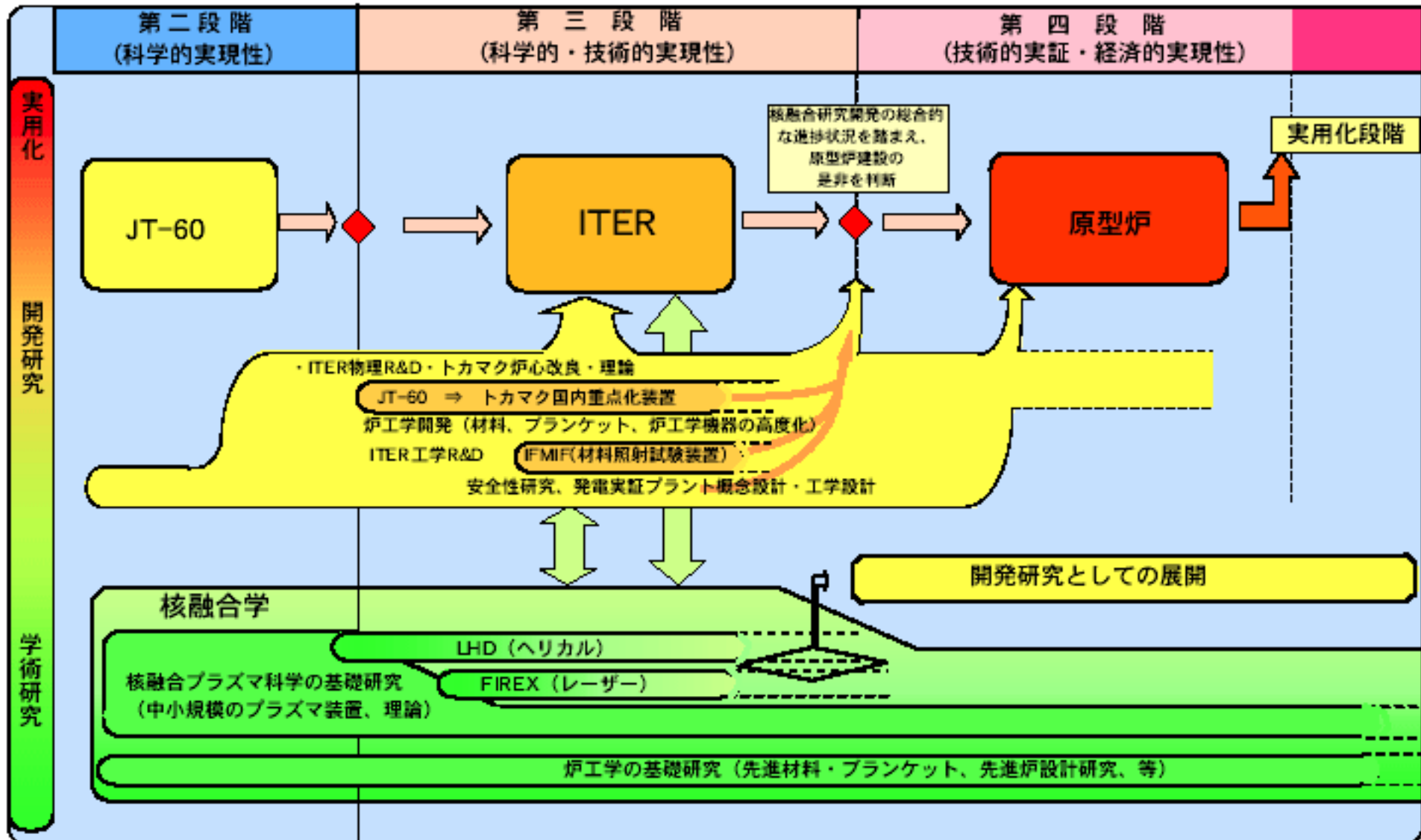
- ✓ レーザー核融合炉固有のターゲット供給技術及び繰り返しレーザー技術の開発
- ✓ 磁場閉じ込め方式と共通のトリチウム技術、炉壁技術の開発
- ✓ レーザーと炉心プラズマの独立性を生かした研究開発戦略

レーザー方式から原型炉開発への貢献

- ✓ 高エネルギー密度状態にあるプラズマ・材料の生成と理解による炉壁・ダイバーター開発への貢献
- ✓ 国際競争力のあるプラズマ研究を通じた原型炉開発を担う人材の教育・育成

わが国の核融合グランドプラン

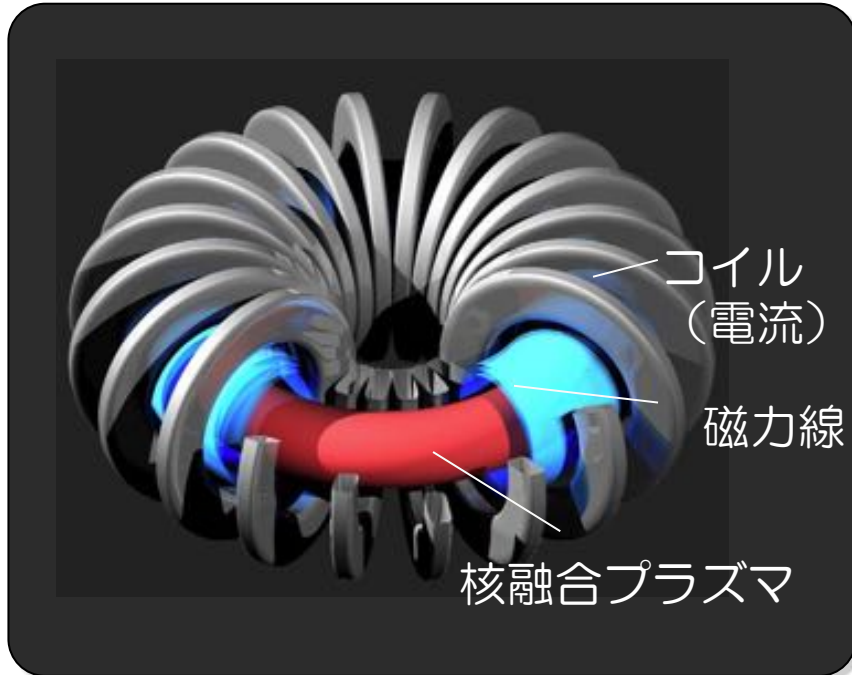
原子力委員会「今後の核融合研究開発の推進方策について」平成17年10月



FIREX (レーザー) はしかるべき段階で、開発研究としての展開を判断する

磁場とレーザー核融合

磁場核融合



固体密度の10億分の1 (10^{-9})
 燃料の直径: 10 m
 定常炉 → 定常負荷へ対応

ITER 機構
 原子力研究開発機構
 核融合科学研究所

レーザー核融合

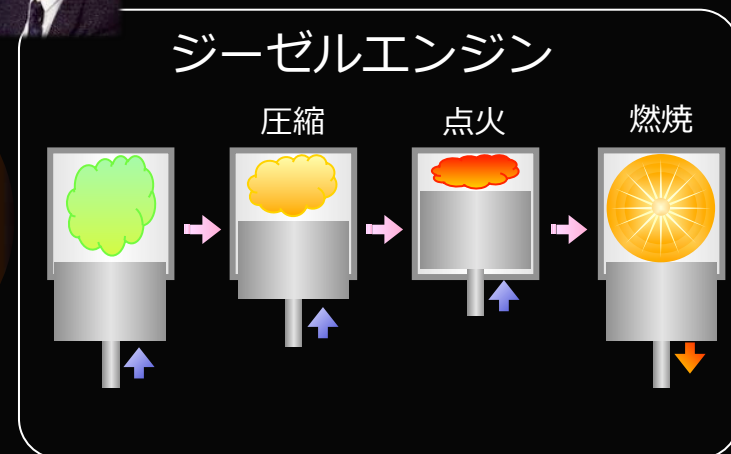
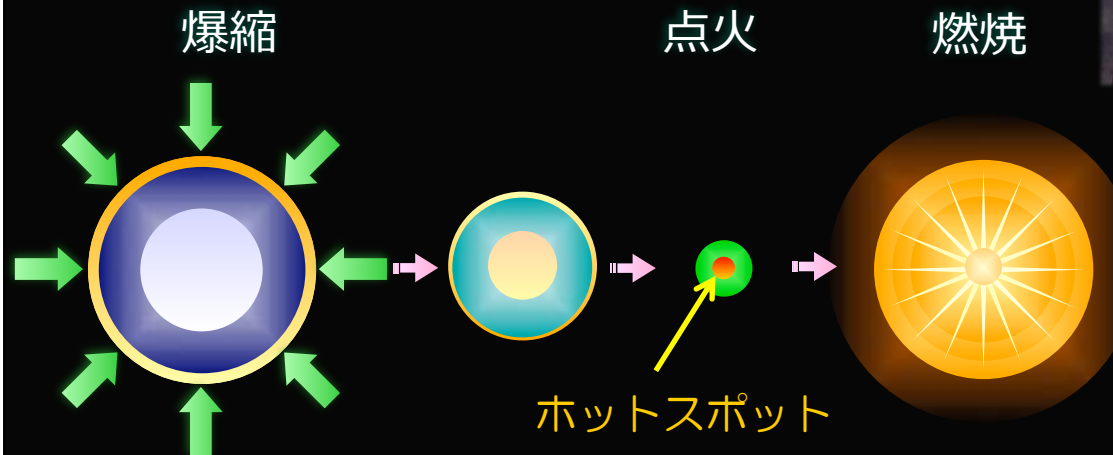


固体密度の1000倍 (10^3)
 燃料の直径: mm → コンパクト
 パルス炉 → 負荷変動へ対応

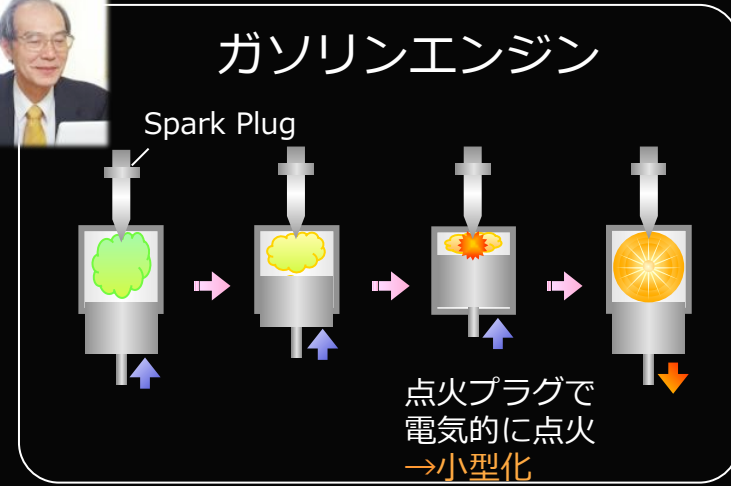
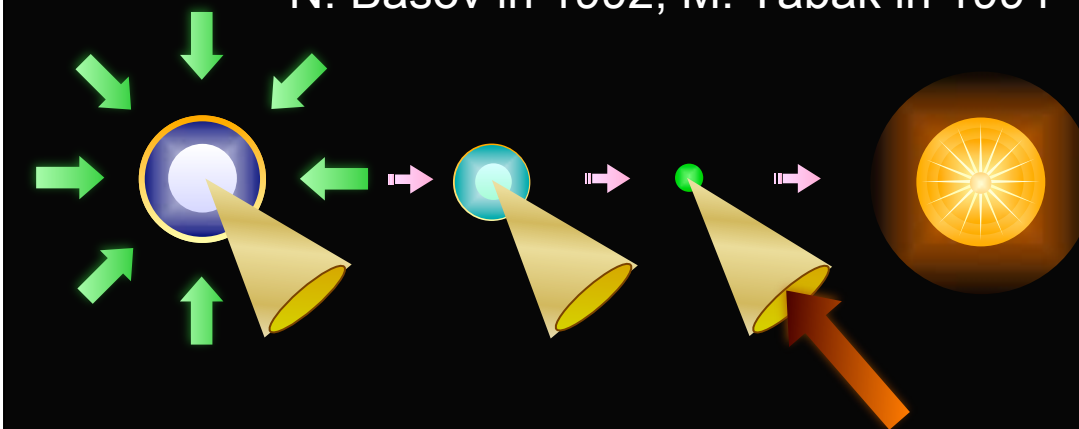
米ローレンスリバモア国立研究所 LLNL
 仏原子力庁 CEA
 大阪大学
 米ロチェスター大学

点火方式：中心点火と高速点火

中心点火 提案 J. Nuckolls in 1972



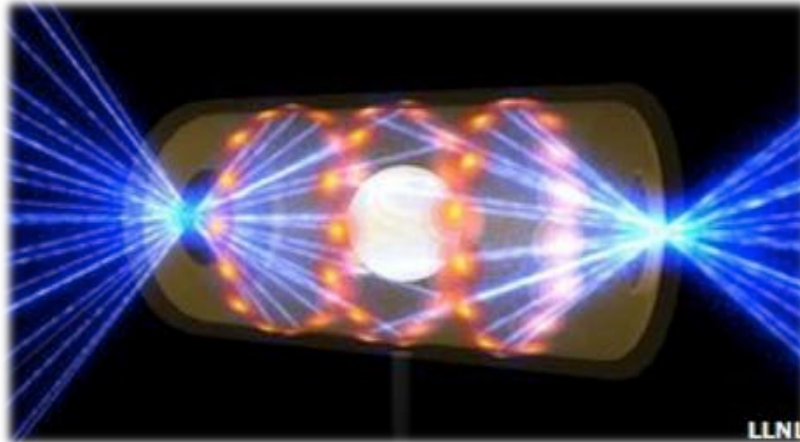
高速点火 提案 山中龍彦 in 1983
N. Basov in 1992, M. Tabak in 1994



- 中心のホットスポットが不要
- コンパクト

爆縮方式：直接照射と間接照射

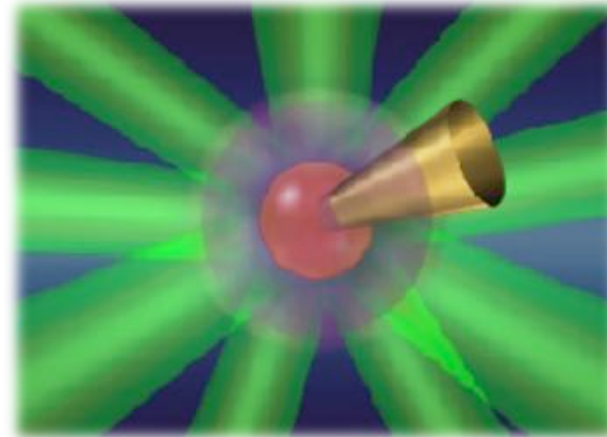
間接照射



レーザーを金のホーラムの内側に照射し、発生するX線により燃料カプセルを爆縮

- ・ 一様性が高い
- ・ 効率が低い

直接照射



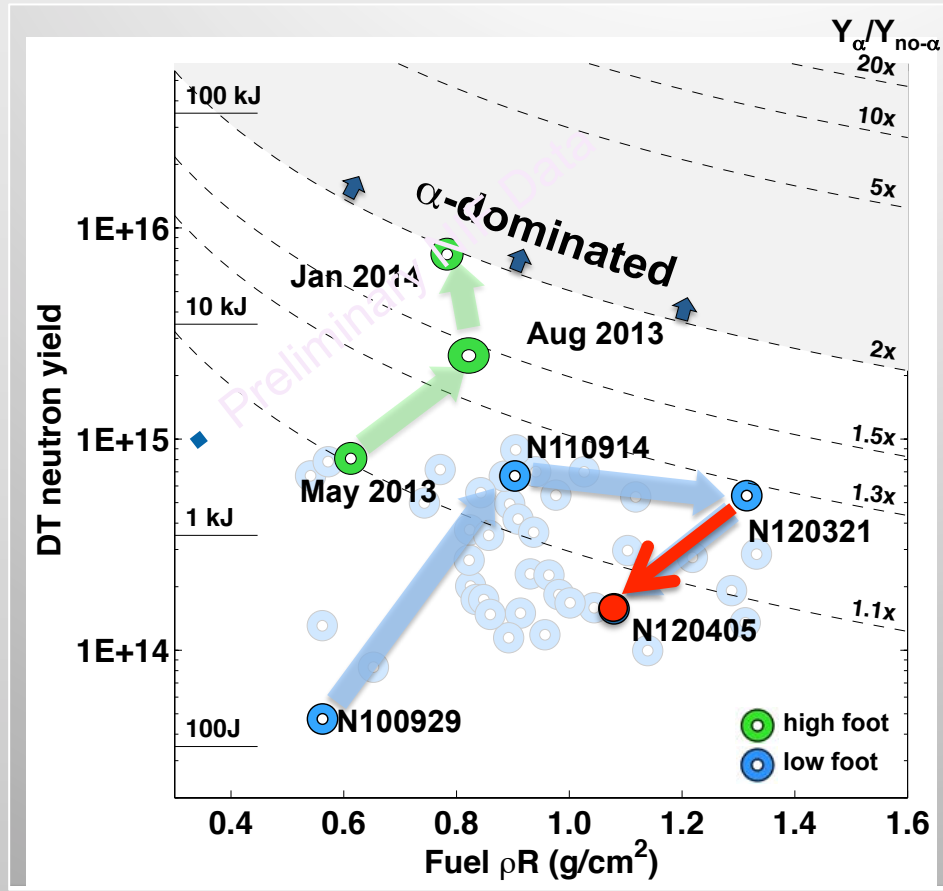
レーザーを燃料カプセルに直接照射し爆縮

- ・ 一様性が低い
- ・ 効率が高い

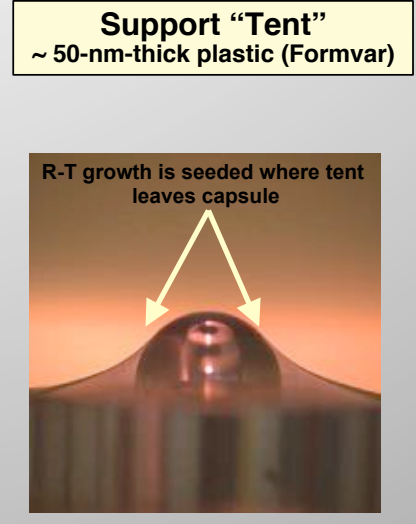
	間接照射	直接照射
中心点火	米LLNL 仏CEA	米ロチェスター大
高速点火		大阪大学

中性子数と燃料面密度

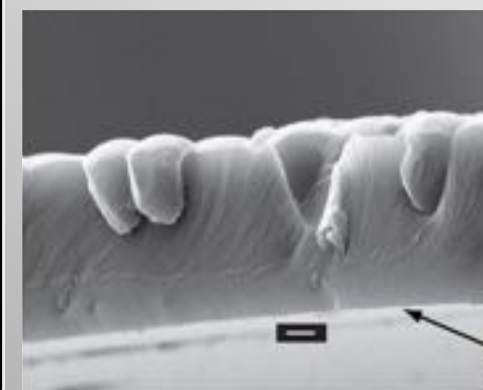
燃料をわずかに予備加熱するHigh Foot Pulseを用いることで、アルファ加熱による中性子発生数の増大を観測



- ### 流体混合の要因
- ①燃料球をホーラム内に支持するためのテント
 - ②燃料を注入するためのフィルチューブ
 - ③燃料カプセル内部の凹凸



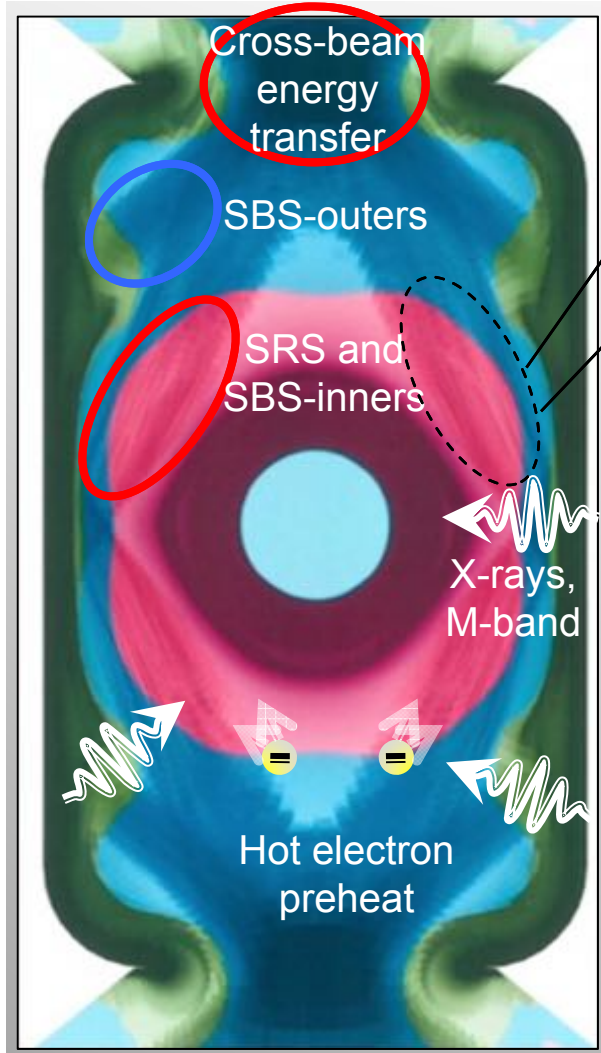
Bumps, divots, dust, bulk inhomogeneities



Fill Tube
~ 10- μ m-diam SiO₂



ホットスポットと主燃料の流体混合を抑制することにより、**アルファ粒子による自己加熱を観測。**



ホーラム内における複雑なダイナミクス

ホーラム内壁の動きを抑えるためにHeガスを封入
→ 様々な悪影響

- ✓ ビーム間のエネルギー移行 (Cross-Beam Energy Transfer) → 赤道面上でのX線強度の低下 → 扁平なプラズマの形成
 - ✓ レーザー光の後方散乱によるエネルギー損失と、X線の空間強度分布の時間変化 → 最大圧縮時における圧縮プラズマの急激な変形
 - ✓ 硬X線及び高速電子による核融合燃料の先行加熱 → 燃料の圧縮密度の低下
- ホーラム内を真空にすることにより、レーザー-プラズマ不安定性の低減
 - ホーラムを大きくすることにより、X線の空間強度分布の一様化と、硬X線及び高速電子の低減

流体混合の低減, X線強度の空間分布の一様性向上,
予備加熱の制御を行い, **核融合点火の実証**を目指している.

高速点火実証実験

Fast Ignition Realization EXperiment



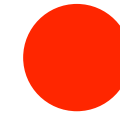
ナノ秒 爆縮用レーザー
GEKKO-XII



ピコ秒 加熱用レーザー
LFEX



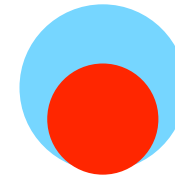
① FIREX-I/点火温度への加熱



$$\rho R \sim 0.1 \text{ g/cm}^2$$



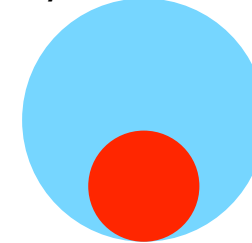
② FIREX-II/自己点火



$$\rho R \sim 1.2 \text{ g/cm}^2$$



③ 実験炉/高核融合利得



$$\rho R > 2.0 \text{ g/cm}^2$$

Cool REB キャンペーン

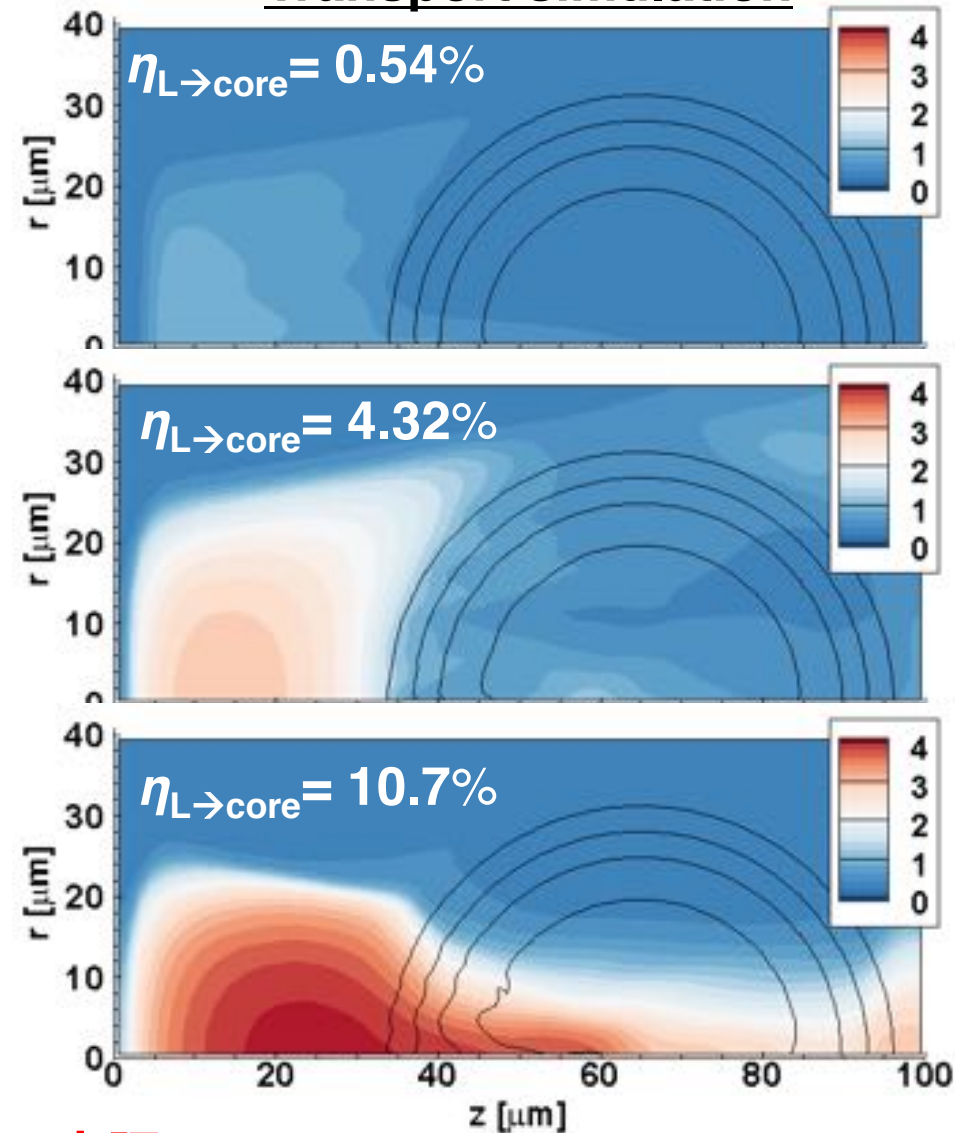
- 加熱レーザーのコントラスト改善
- コーン内でのプラズマ生成及びコーンの破断の抑制
- 加熱に適する $T = 1$ MeVの電子ビームを高効率に生成出来る事を実証

Guiding REB キャンペーン

- MeVの電子ビームの誘導に不可欠なキロテスラ級の磁場発生
- 高速電子を燃料に導くガイド磁場の形成
- 強磁場下での高密度プラズマ生成

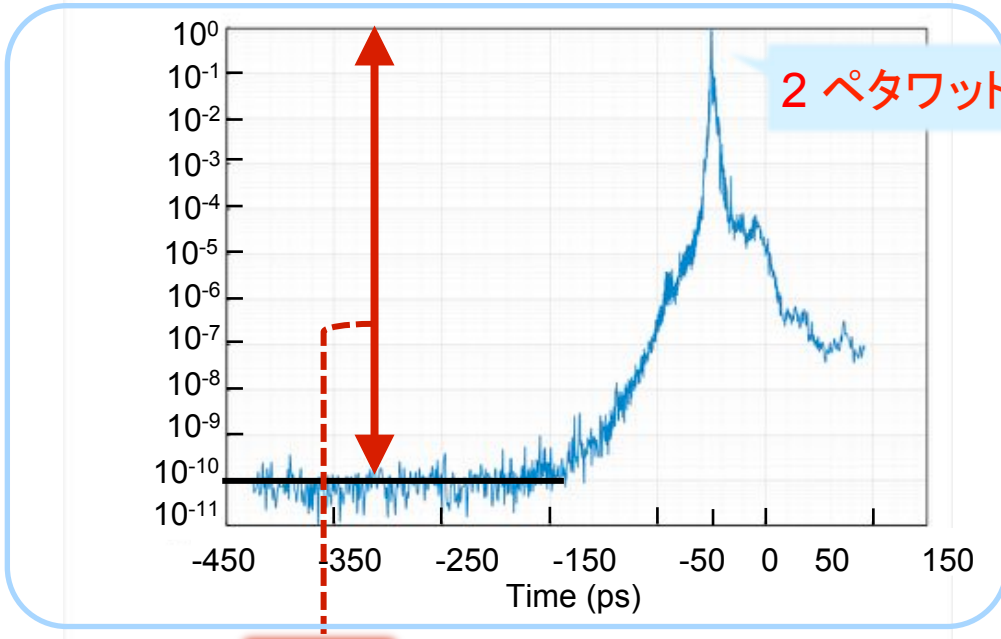
加熱の実証

Transport simulation



高速電子の低温化と集束の実証,
高速点火方式による自己点火の実証に本質的

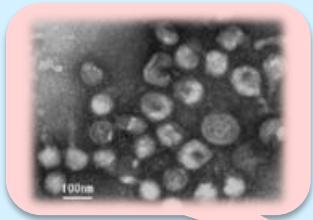
LFEX : 世界最高パワーと高いコントラスト比



10 桁

ノイズ : 信号 = ウイルス : 東京スカイツリー

インフルエンザ
ウイルス
~100 nm



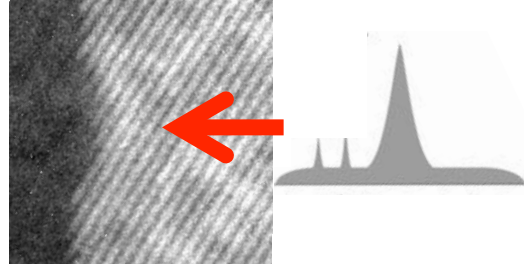
東京スカイツリー
~ 1000 m



Cool REB キャンペーン

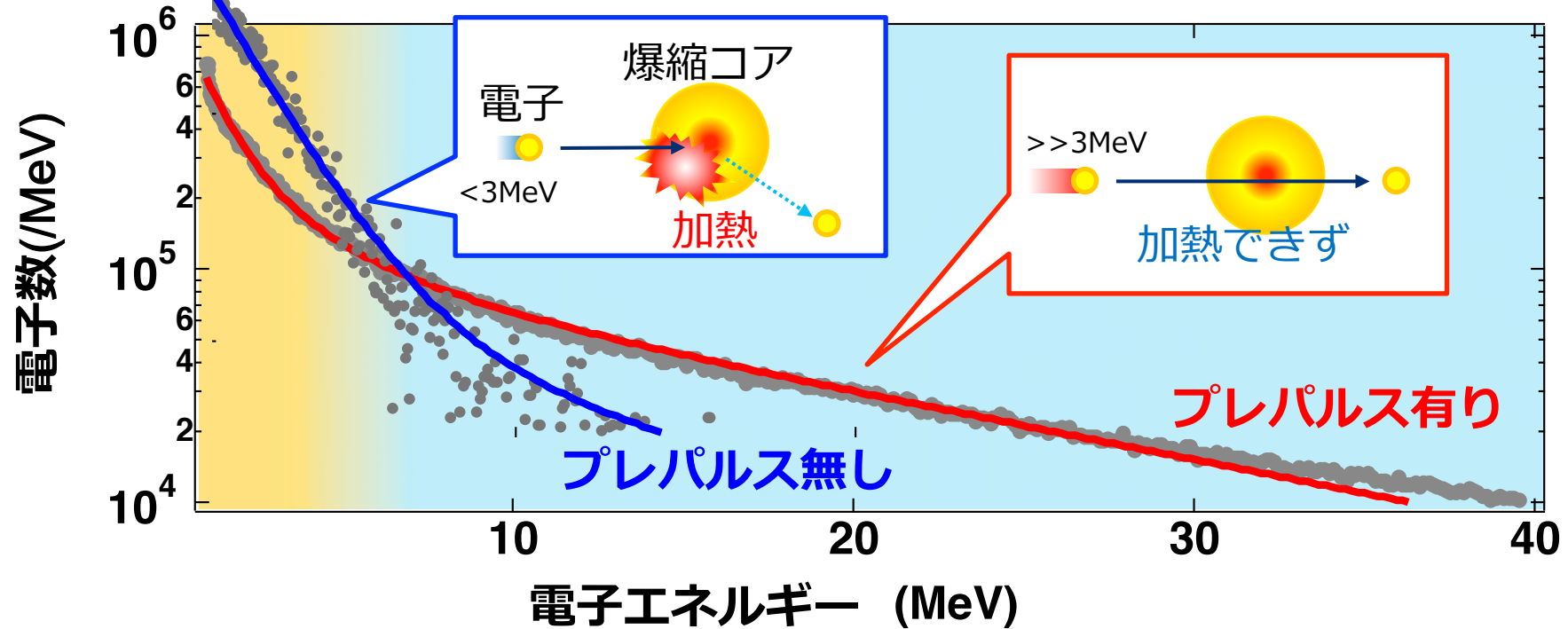
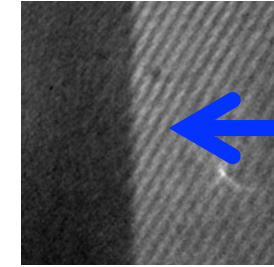
プレパルス有り

@加熱レーザー前1.5 ns



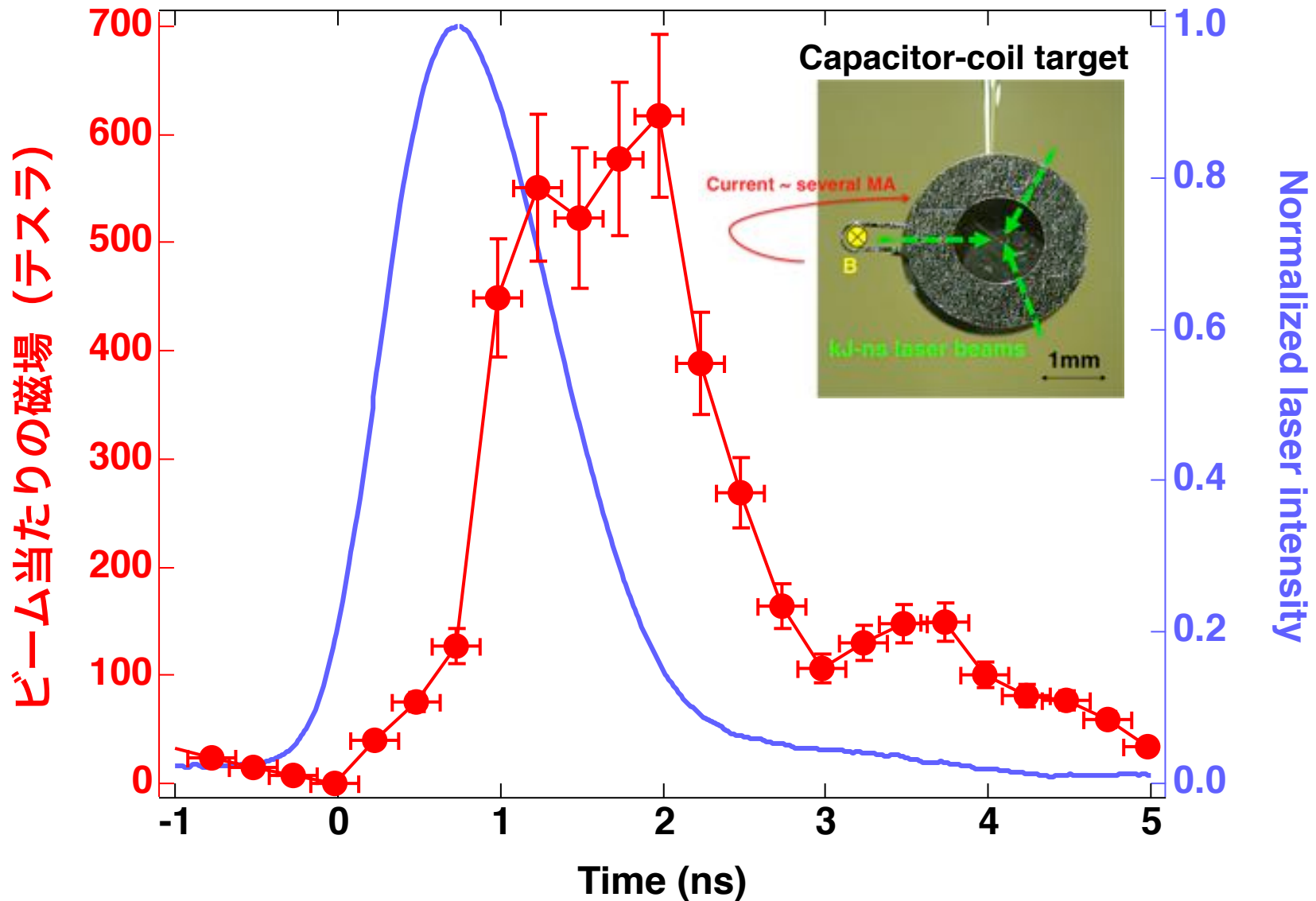
プレパルス無し

@加熱レーザー前0.15 ns



加熱レーザービームの高性能化（高コントラスト化）によって、**高速電子ビームの低エネルギー化に成功**

Guiding REB キャンペーン

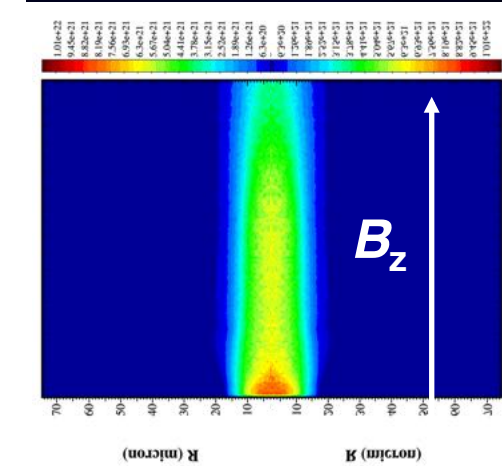
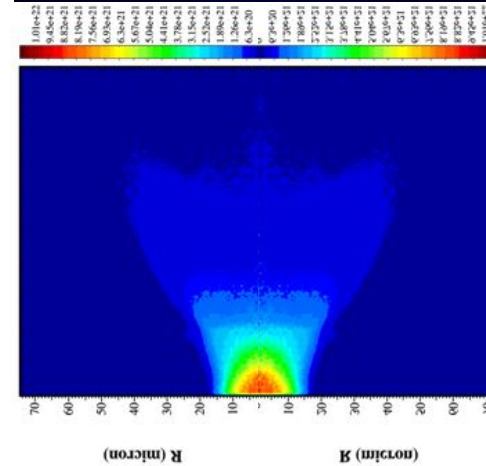
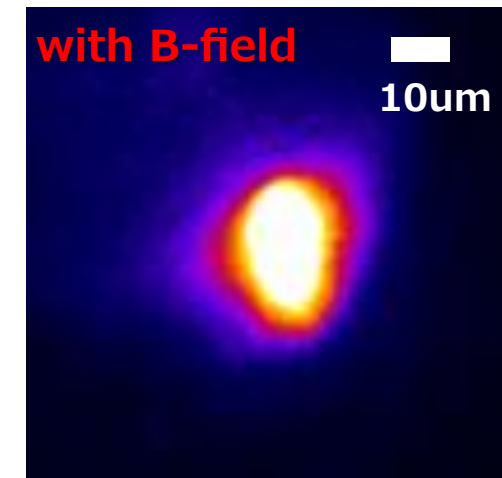
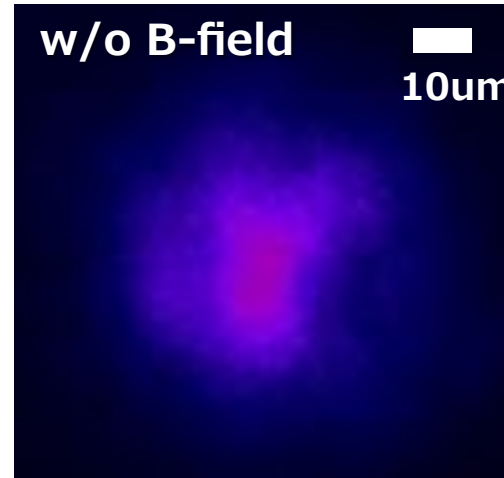
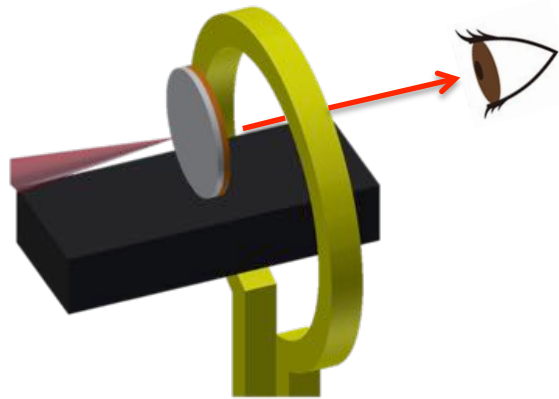


レーザー駆動キャパシター・コイル・ターゲットで
 高速電子ビームの集束に必要な、**1kTの強磁場の発生に成功**

Guiding REB キャンペーン

長距離伝播後の高速電子ビームの空間広がり

ビームの伝播領域に約1 kTの外部磁場を印可し，ビームの集束を確認

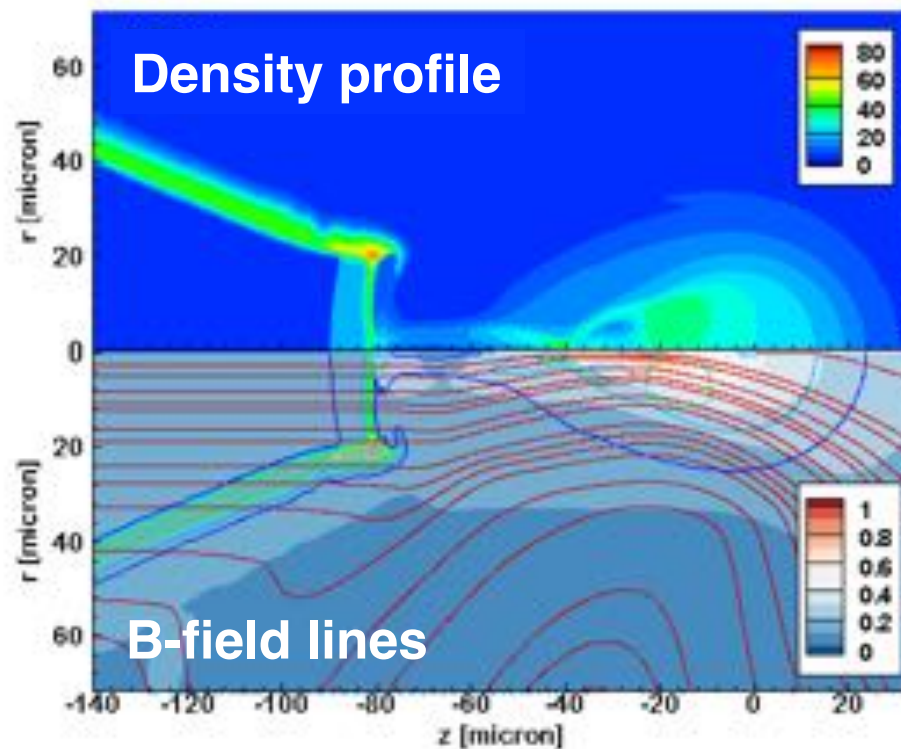


レーザー生成キロテスラ磁場を用いて，
レーザー加速電子ビームのガイディングの原理実証



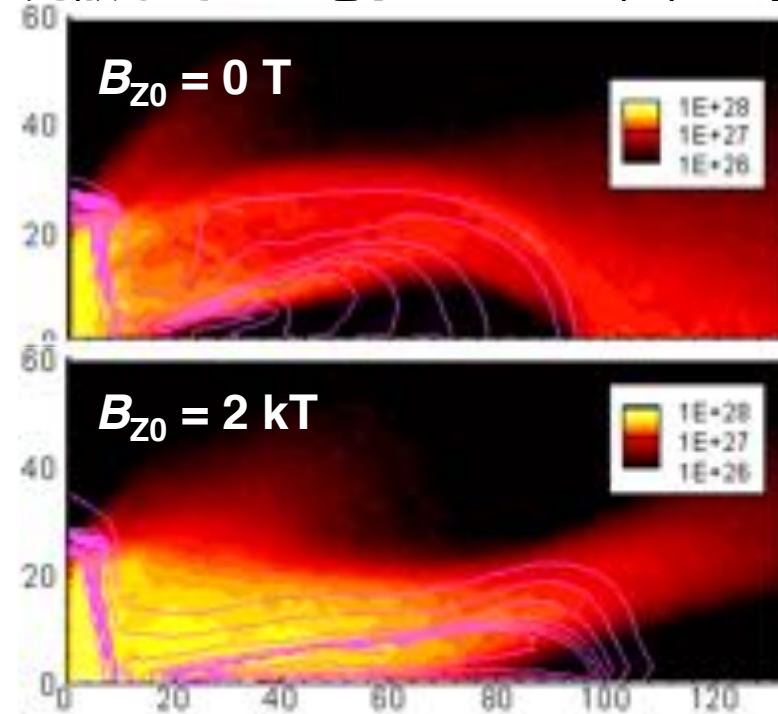
2Dシミュレーションによる プラズマ・磁場圧縮

固体密度の100倍程度に圧縮された
高密度プラズマの生成と、4倍程度に
圧縮されたガイド磁場の形成が可能



電子ビームの集束

2 kTの外部磁場を印加することで、
発散していた電子ビームの集束が可能



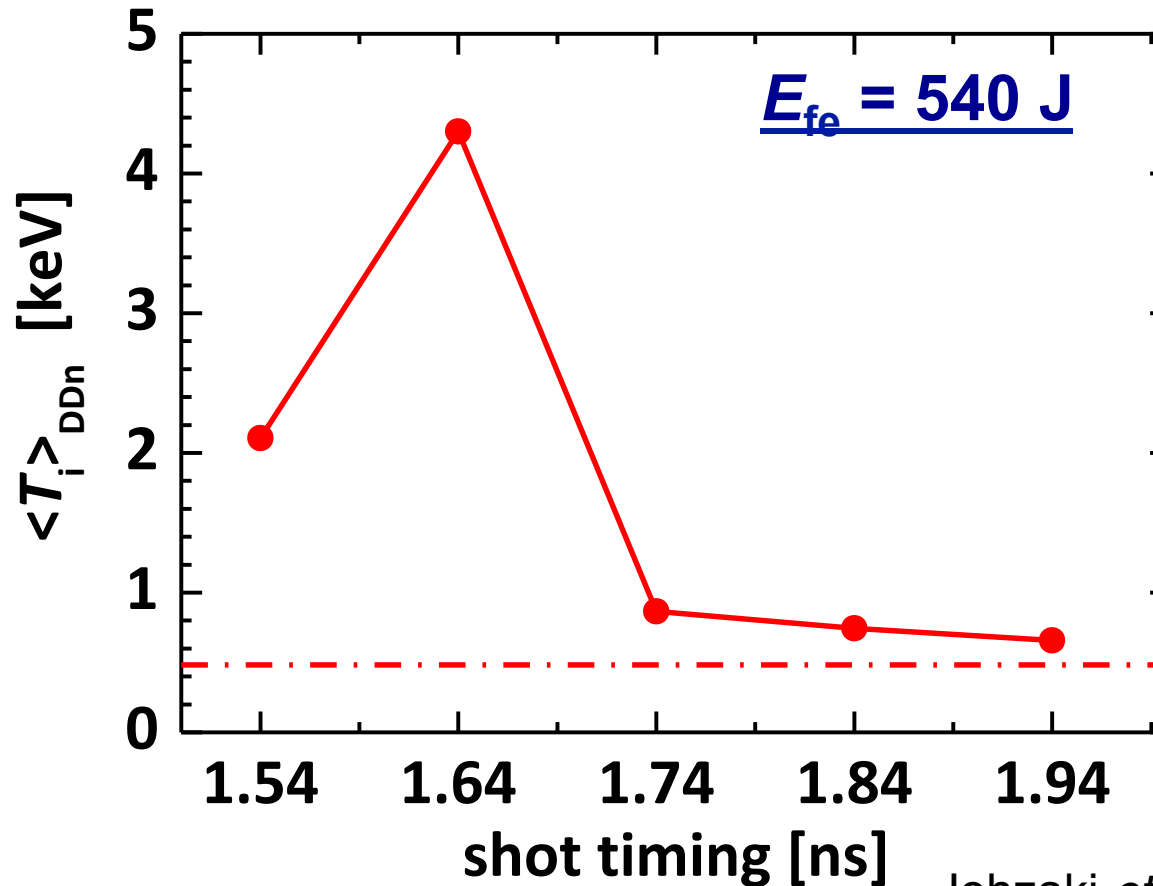
Nagatomo & Johzaki *et al.*, IFSA2015

**高速電子の集束に最適なミラー磁場(ミラー比~4)を生成し、
高速点火方式での高密度プラズマの効率的な加熱が可能**

加熱実験シミュレーション



イオン温度と中性子イールドの加熱レーザー入射タイミング依存性
 温度上昇と中性子イールドが上昇する最適タイミングが存在



Johzaki et al., IFSA2015

電子ビームの低温化と集束を組み合わせることで、
 点火温度 (5 keV) までプラズマを加熱することが可能