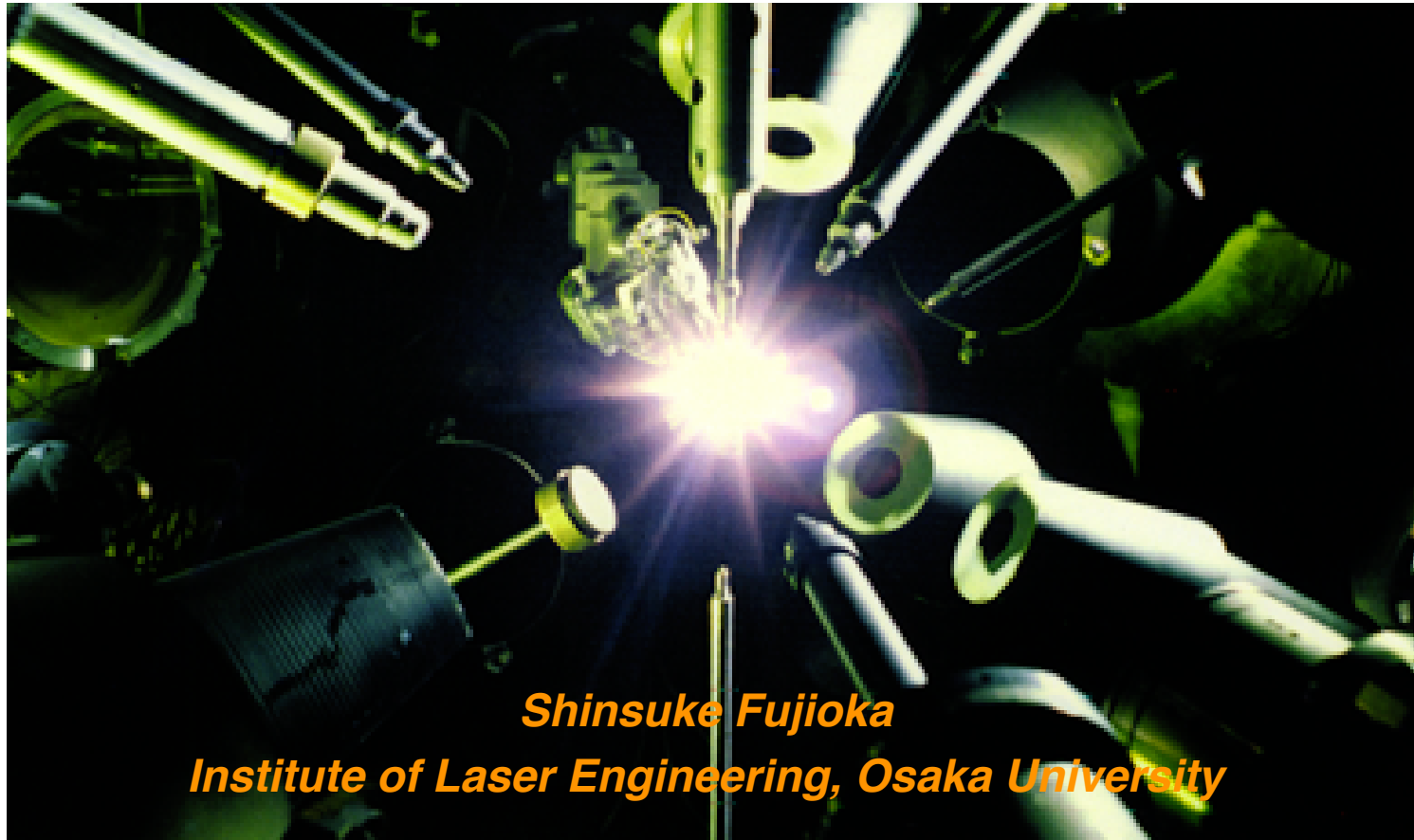


レーザー核融合の加熱と閉じ込め に向けた最新の研究成果

Recent research works toward the goal of laser fusion



*Shinsuke Fujioka
Institute of Laser Engineering, Osaka University*

若手研究者によるプラズマ研究会

平成16年3月17 - 19日

@日本原子力研究所 那珂研

Contents



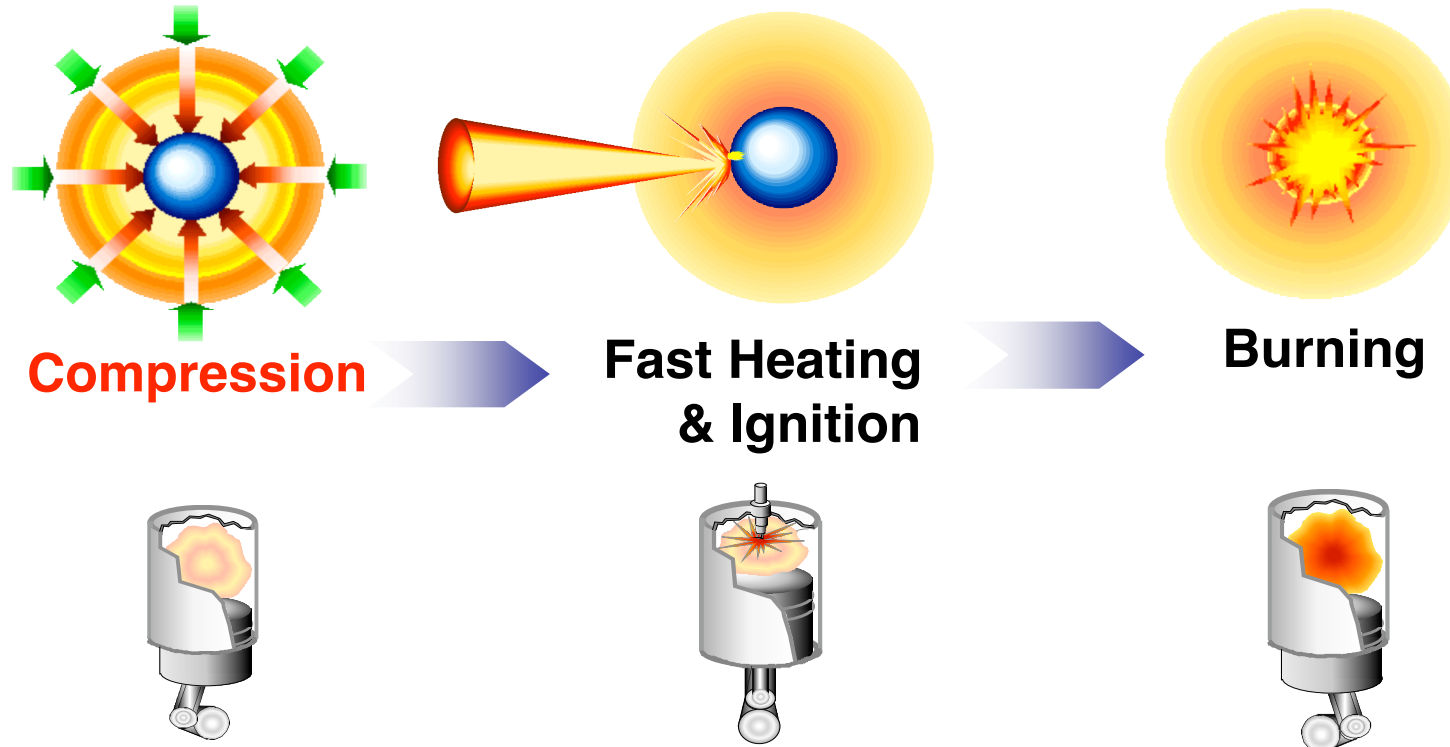
1. レーザー核融合の原理

- レーザー核融合の核融合点火には、爆縮による高密度プラズマの形成と効率よい加熱が不可欠
2. 高密度プラズマ閉じ込めに向けたRT不安定性抑制
 3. コーン・シェル・ターゲットによる高効率追加熱
 4. コーン・シェル・ターゲットの爆縮実験
 5. 核融合点火に向けたFIREXプロジェクト
 6. 第三の点火方式 (Impact ignition)
 7. まとめ

Introduction

高速点火レーザー核融合では、プラズマの圧縮と加熱の二つが異なるフェーズで行われる


S. Fujioka
(ILE. Osaka)



Scaling law of minimum fast-heating energy for ignition

$$E_{\text{ig}} = 140 \left(\frac{\rho}{100 \text{ g/cm}^3} \right)^{-1.85} \text{ kJ}$$

$$\rho = 400 \text{ g/cm}^3 = 1900 \rho_0$$

$$E_{\text{ig}} = 11 \text{ kJ}$$

S. Atzeni, Phys. Plasma, Vol. 6, p. 3316 (1999)

大阪大学におけるレーザー核融合研究主要成果

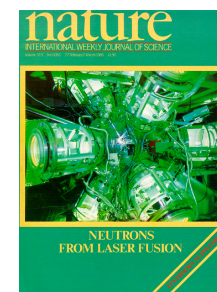
1986年

核融合点火に必要な温度達成

(核融合反応中性子発生数世界記録：1億度)



本格的なレーザー核融合エネルギー研究の幕開け



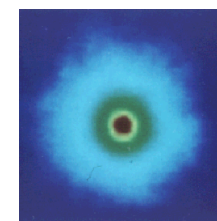
1991年

核融合点火に必要な超高密度達成

(世界最高の密度達成：固体の600倍)



世界の慣性核融合研究は点火・燃焼に向けた研究へ移行。
NIF, LMJの建設へ (米、仏)



2001年

効率的な加熱に成功

(Nature 412,798,(2001))

(高速点火法の有効性を初めて実証)



ペタワットレーザー建設と本格的な加熱実験開始



2002年

世界最高出力レーザーで効率的な加熱に成功

(Nature 418,933,(2002))

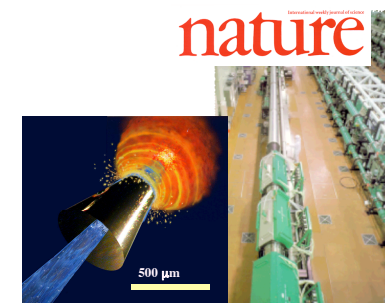
(レーザー核融合点火にめど)



高利得へ向けた本格的な研究へ

高速点火燃焼実証のための計画 (日本)

高速点火法のためのペタワットレーザー建設計画 (米国)



Contents



1. レーザー核融合の原理
2. 高密度プラズマ閉じ込めに向けたRT不安定性抑制
 - RT不安定性は高密度プラズマの閉じ込めを妨げる最大の要因であり、憎きRT不安定性を抑制することが不可欠
3. コーン・シェル・ターゲットによる高効率追加熱
4. コーン・シェル・ターゲットの爆縮実験
5. 核融合点火に向けたFIREXプロジェクト
6. 第三の点火方式 (Impact ignition)
7. まとめ

高密度爆縮プラズマの実現には、 レイリー・テイラー不安定性の抑制が不可欠

J. Nuckolls *et al.*, Nature (1972)
= **One kJ** of laser energy may be sufficient to
generate an equal thermonuclear energy =

National Ignition Facility (NIF)
192 beams **1.8 MJ**

Laser Compression of Matter to Super-High Densities: Thermonuclear (CTR) Applications

JOHN NUCKOLLS, LOWELL WOOD,
ALBERT THIESSEN & GEORGE ZIMMERMAN
University of California Lawrence Livermore Laboratory

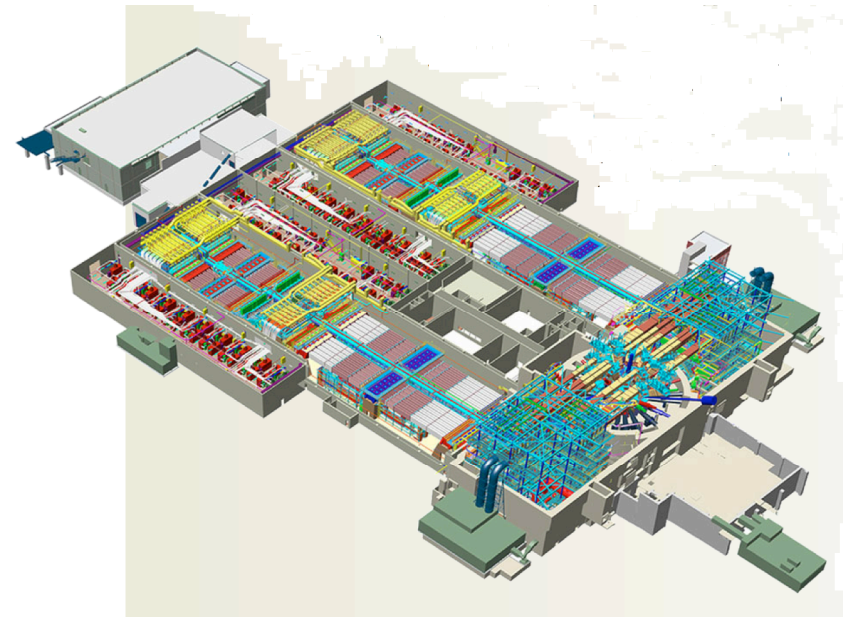
Hydrogen may be compressed to more than 10,000 times liquid density by an implosion system energized by a high energy laser. This scheme makes possible efficient thermonuclear burn of small pellets of heavy hydrogen isotopes, and makes feasible fusion power reactors using practical lasers.

Thermonuclear burning occurs extraterrestrially in stars and terrestrially in nuclear explosions¹. The specific thermonuclear

The electrons in white dwarf cores are Fermi-degenerate, so the pressure is a minimum determined by the quantum mechanical uncertainty and exclusion principles². The pressure of dense hydrogen with Fermi-degenerate electrons is⁸

$$P = \frac{2}{3} n_e \epsilon_F \left[\frac{3}{5} + \frac{\pi^2}{4} \left(\frac{kT}{\epsilon_F} \right)^2 - \frac{3\pi^4}{80} \left(\frac{kT}{\epsilon_F} \right)^4 + \dots \right]$$

where n_e is the electron density; $\epsilon_F = \frac{\hbar^2}{8m} \left(\frac{3}{\pi} n_e \right)^{2/3}$ is the Fermi energy; kT is the thermal energy; \hbar is Planck's constant, and m is the electron mass. At 10^6 times liquid density ($n_e = 5 \times 10^{26}$), the minimum hydrogen pressure occurs when $kT \ll \epsilon_F$, and is $\sim 10^{12}$ atmospheres.



レーザー核融合の点火・燃焼（臨界）に必要なとされるエネルギーが、30年で2000倍ものインフレを起こした原因は、レイリー・テイラー不安定性

RTI suppression

爆縮中のターゲットシェルは、重い流体が軽い流体に支えられたレイリー・テイラー不安定な状態


S. Fujioka
(ILE. Osaka)

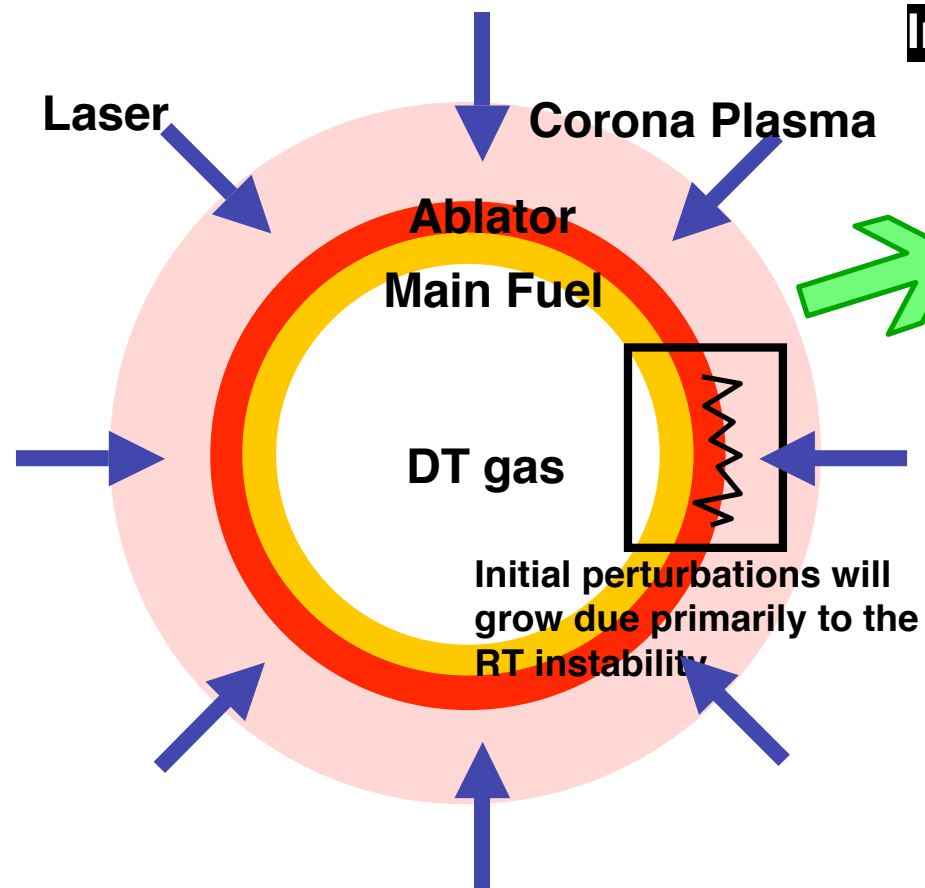
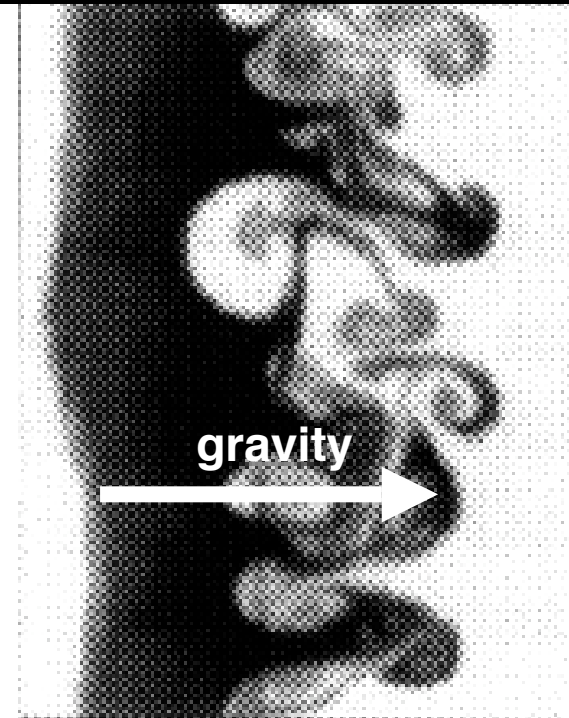


Image of hydrodynamic instability



Heavy Fluids Light Fluids

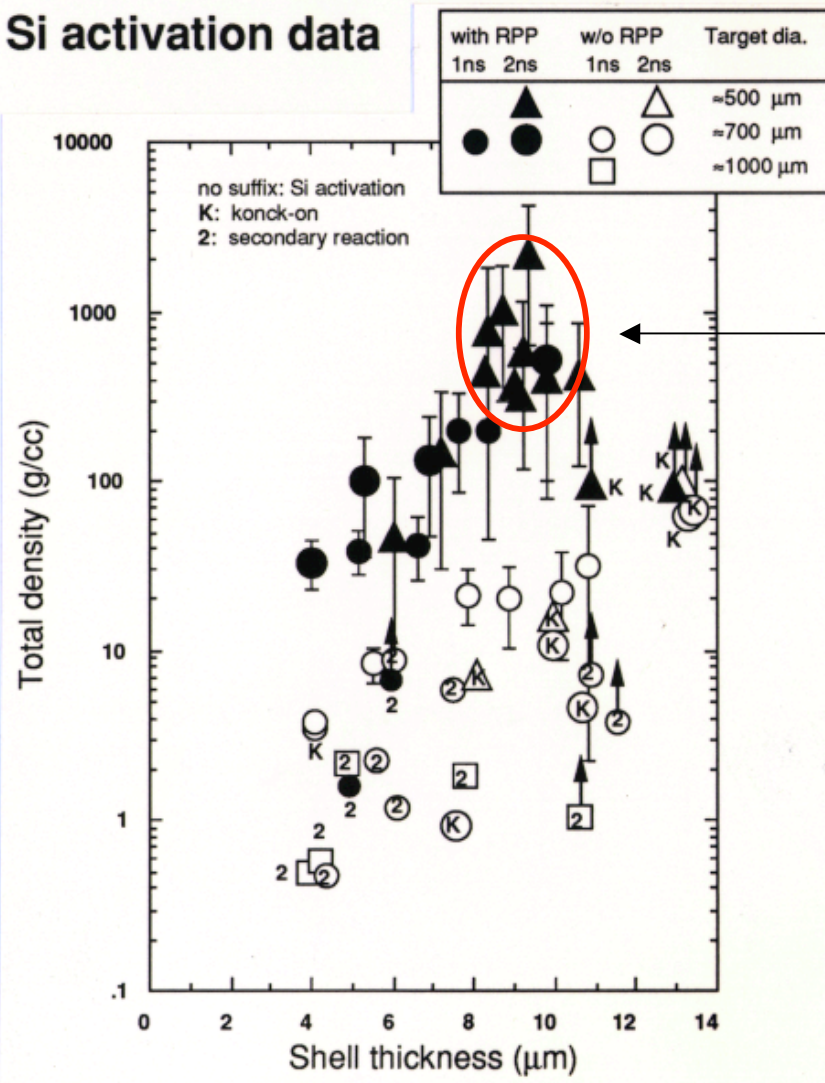
ターゲット表面の凸凹や空間的に非一様なレーザー照射を種として、レイリー・テイラー不安定性が急激に成長する

RTI suppression

高利得高速点火核融合のためには、
固体密度の2000倍に達する圧縮が必要


S. Fujioka
(ILE. Osaka)

Si activation data



600 XLD compression had been demonstrated using ultra-smooth plastic shell in the 1990's.

H. Azechi *et al.*, Laser Part. Beam 1991.

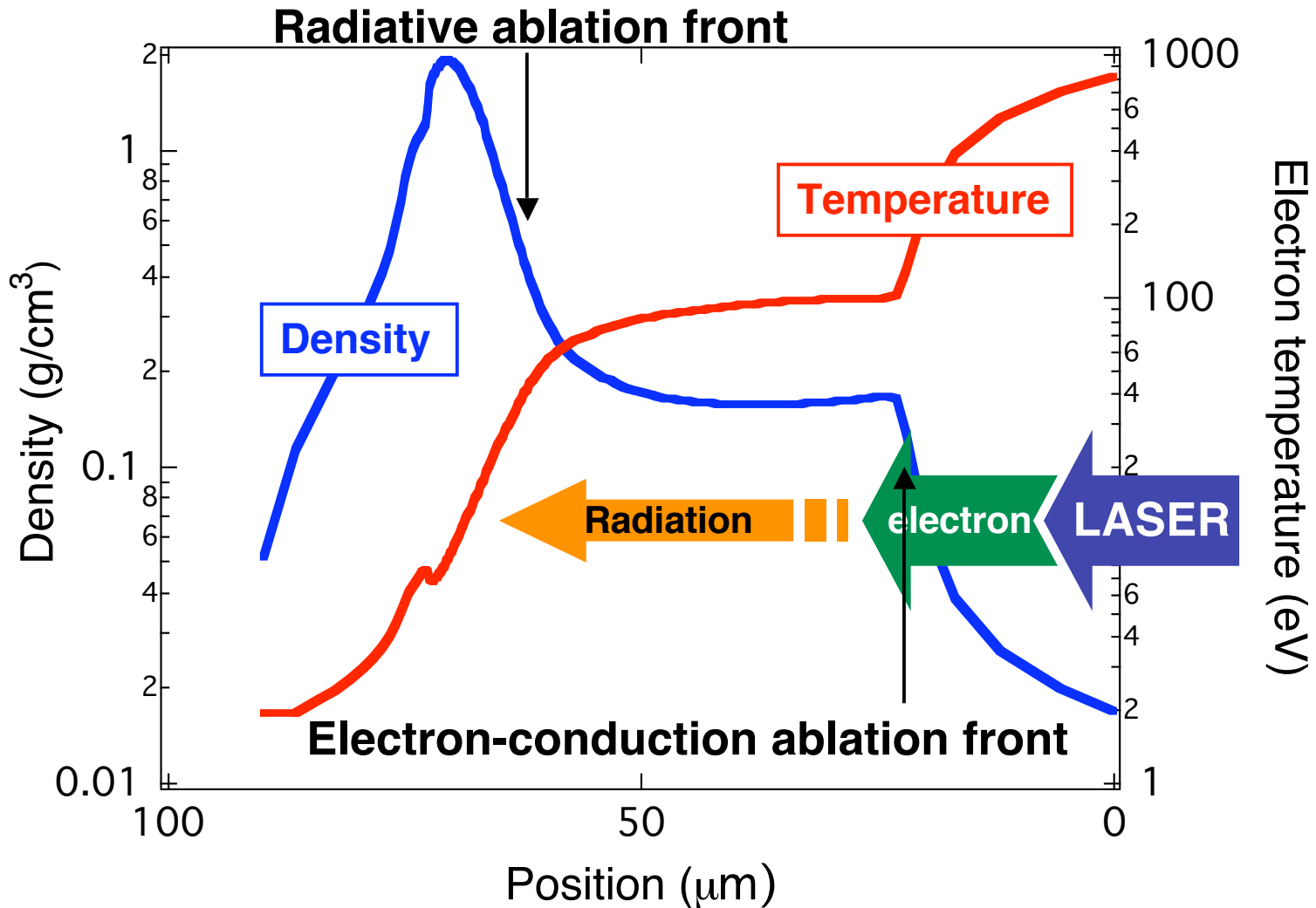
2000XLDは過去に達成された
密度の約3倍に達する

RTI suppression

ターゲット内部にHigh-Z物質をわずかに混ぜることで、
ホーラムを必要としないX線駆動爆縮が可能*



*S. Fujioka *et al.*, to be published Phys. Plasma & Phys. Rev. Lett

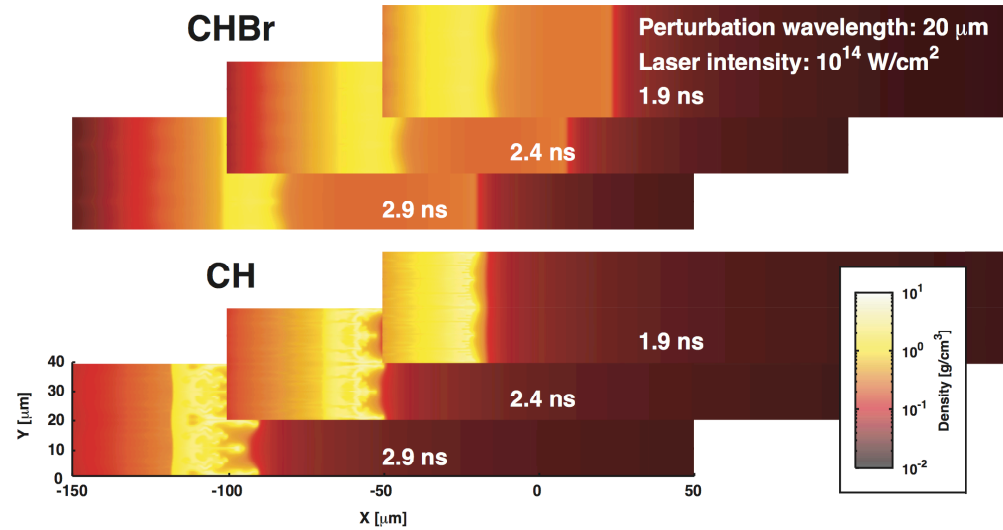


RTI suppression

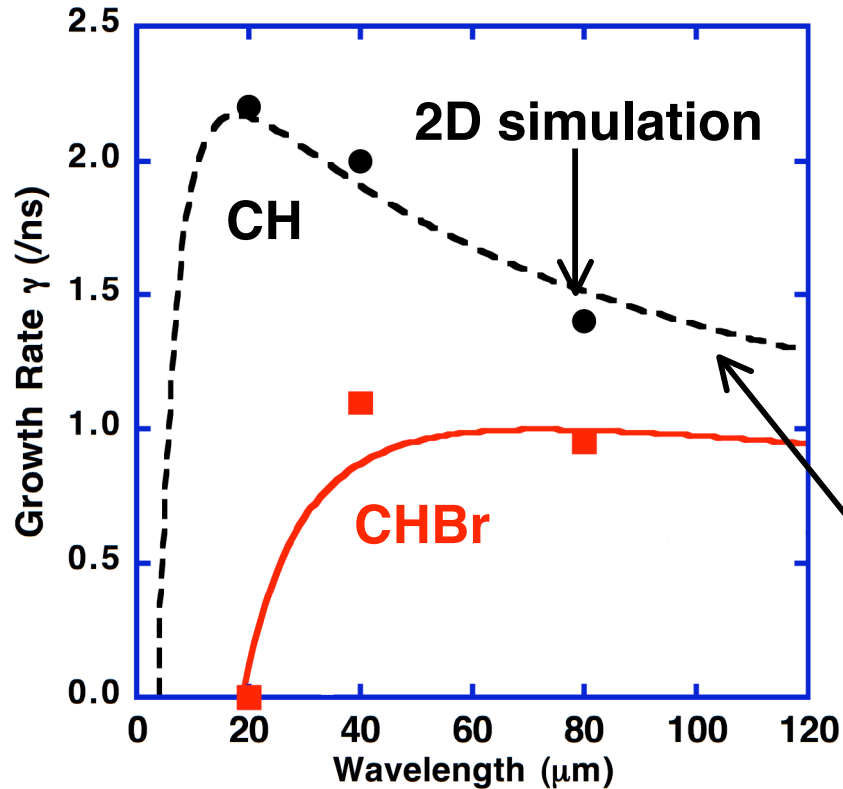
ダブル・アブレーション構造により、レイリー・テイラー不安定性が大きく抑制されることが2次元シミュレーションで観測された



Density contour image of 2D sim.



Growth Rate of RT inst.

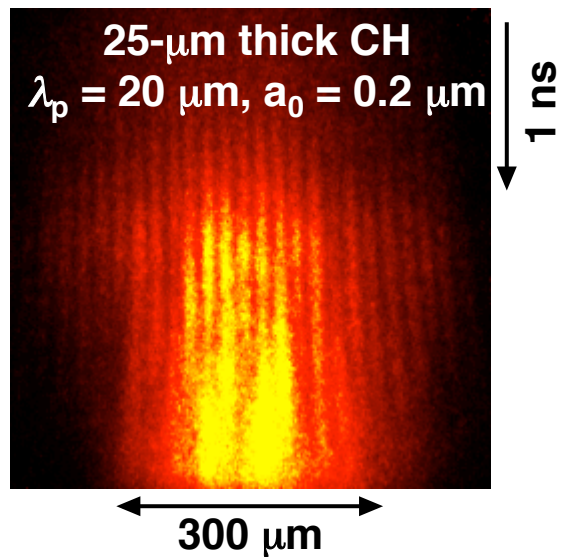
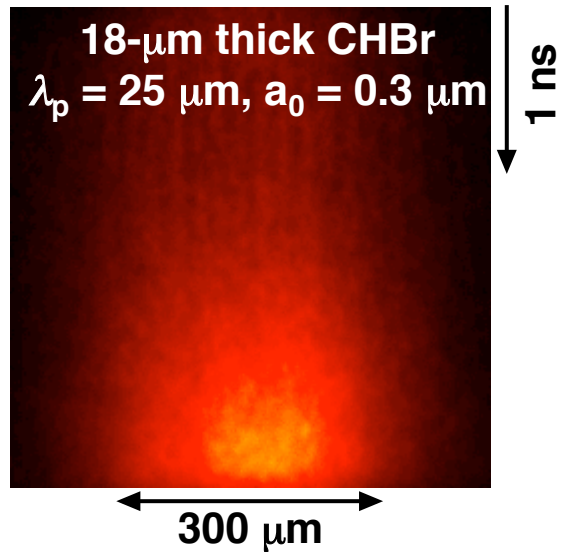


Theory coupled with 1D simulation

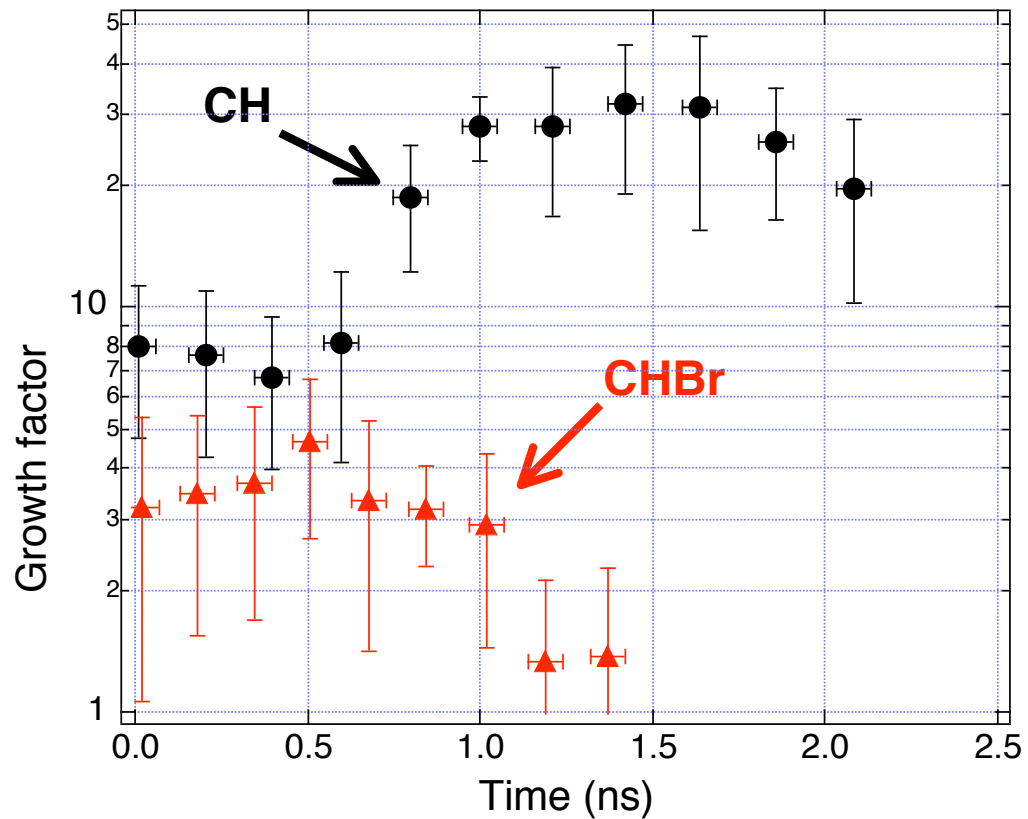
*Calculated with RAICHO code
by N. Ohnishi (Tohoku Univ.) and A. Sunahara

RTI suppression

ダブル・アブレーション構造により、レイリー・テイラー不安定性が大きく抑制されることを実験にて実証



Temporal evolution of growth factor



Contents



1. レーザー核融合の原理
2. 高密度プラズマ閉じ込めに向けたRT不安定性抑制
- 3. コーン・シェル・ターゲットによる高効率追加熱**
 - 高強度レーザー（1 kJ/ 1 ps）の導波路として、金コーンを球殻シェルに挿入し、高効率な追加熱を実現
4. コーン・シェル・ターゲットの爆縮実験
5. 核融合点火に向けたFIREXプロジェクト
6. 第三の点火方式（Impact ignition）
7. まとめ

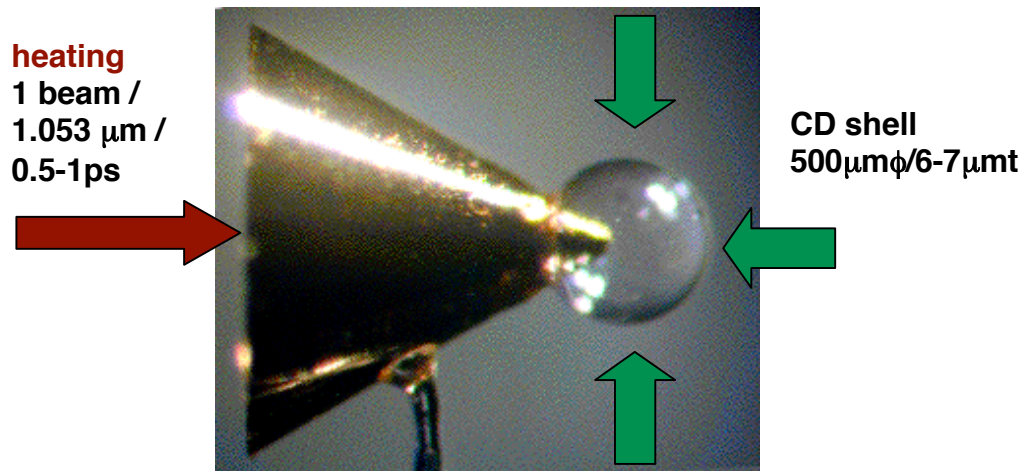
Efficient heating with cone-shell target

コーンを高強度レーザーの導波路として用いることで、
効率よく追加熱エネルギーをコアプラズマまで導くことができる



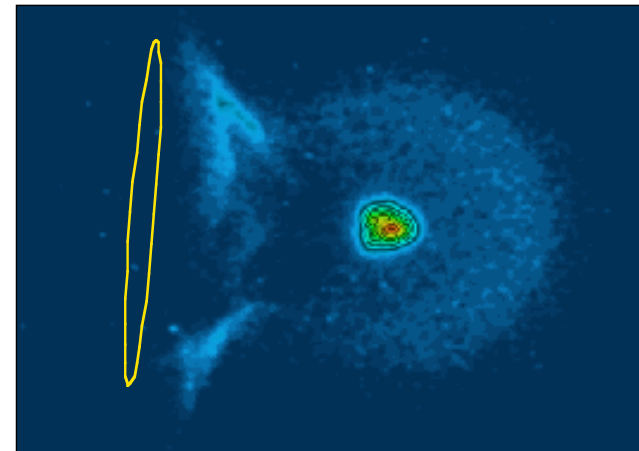
R. Kodama et al., Nature

Photograph of cone-shell



GXII for implosion
9 beams / 1.2-2.5kJ
0.53 μm /
1ns- Gaussian
or 1.2 flat top /
with RPP

X-ray image

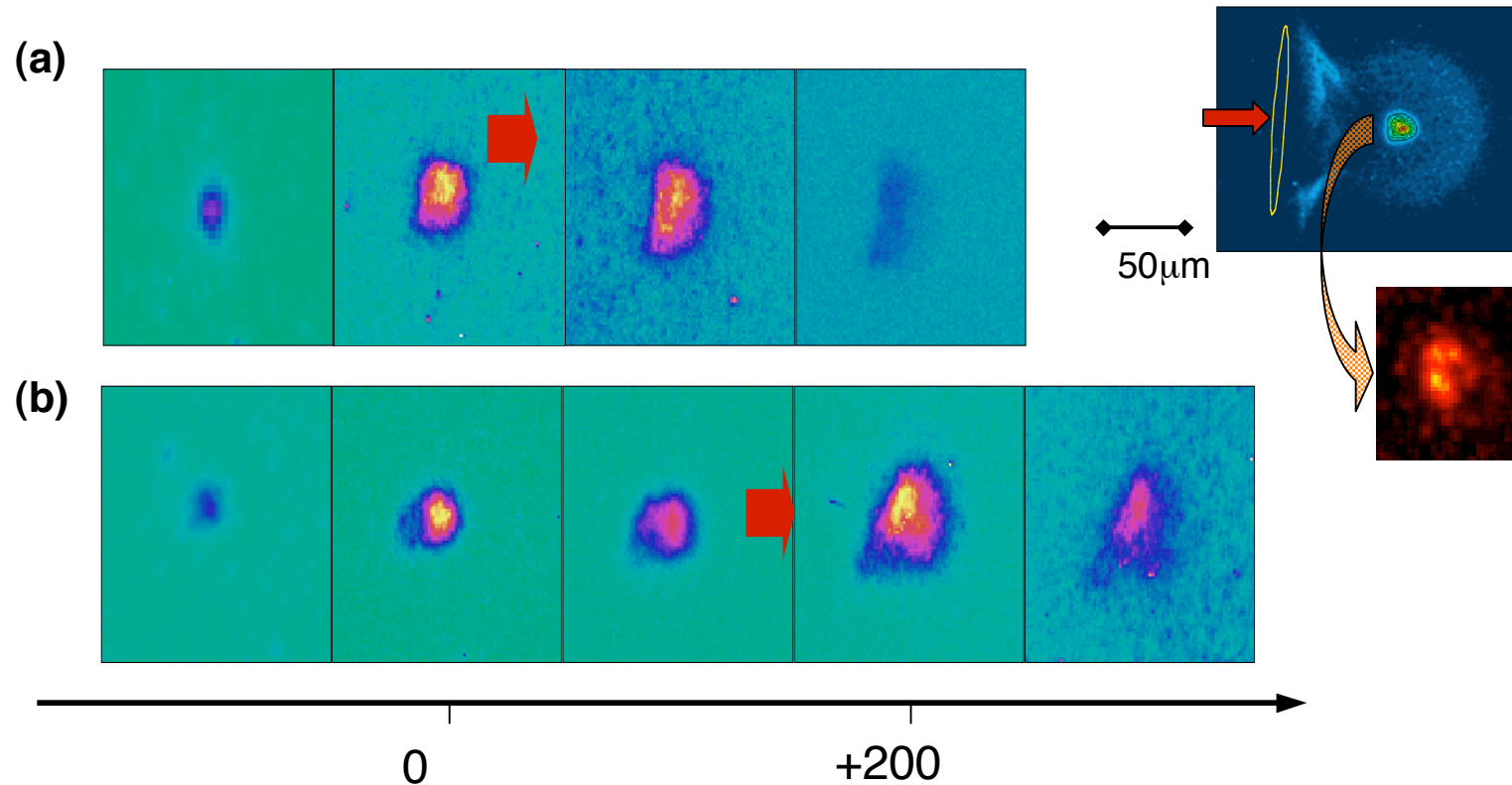


Efficient heating with cone-shell target

高強度レーザーを入射に同期した
コア・プラズマからのX線発光強度の増大が観測された


S. Fujioka
(ILE. Osaka)

X-ray framing images clearly shows the enforced heating of the core plasma. Enhancement of the thermal neutrons was proved only when the heating pulse was injected at the maximum compression.

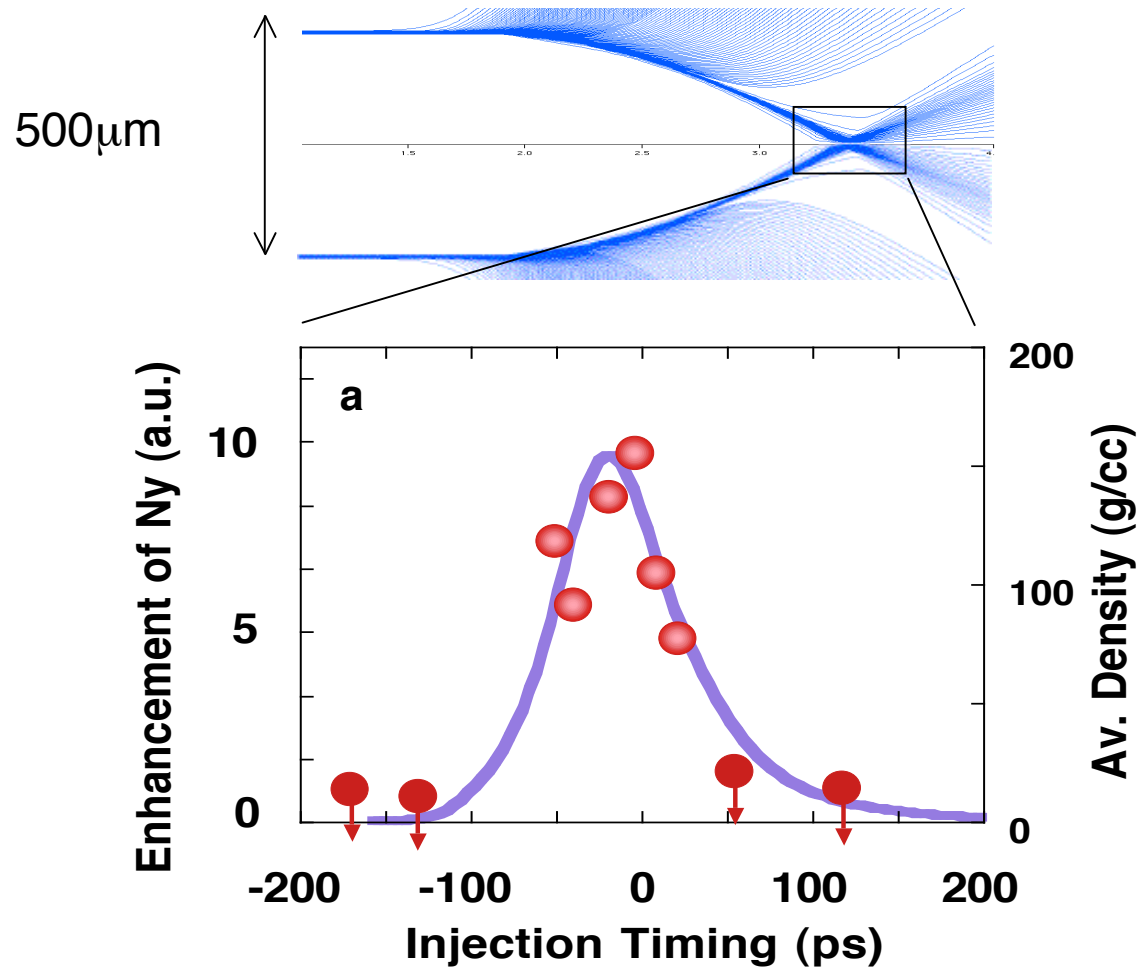


Efficient heating with cone-shell target

高密度プラズマの閉じ込め時間 (~ 100 ps) 内に加熱レーザーを照射したショットで追加熱による核融合反応の増大が観測された



Heating was realized in the time duration of less than 100ps at near the maximum compression.

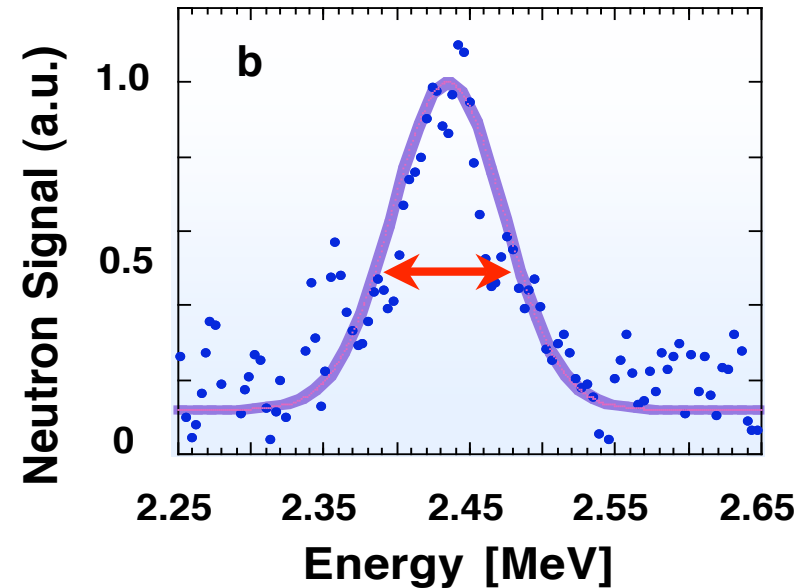
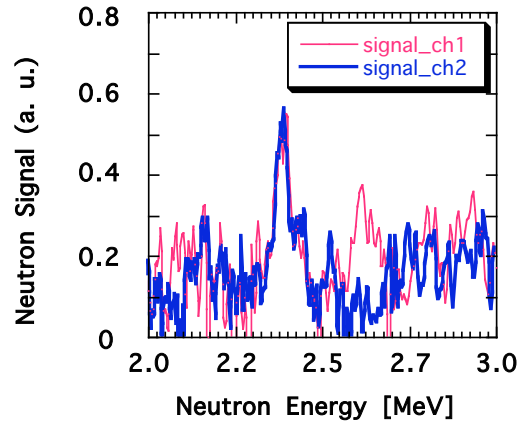


Efficient heating with cone-shell target

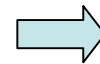
中性子スペクトルのエネルギー広がりから見積もられた
追加熱コアプラズマの温度は0.9 keV



Coincidence of the neutron detectors signals



FWHM: 90 ± 5 keV
Resolution: 50 keV



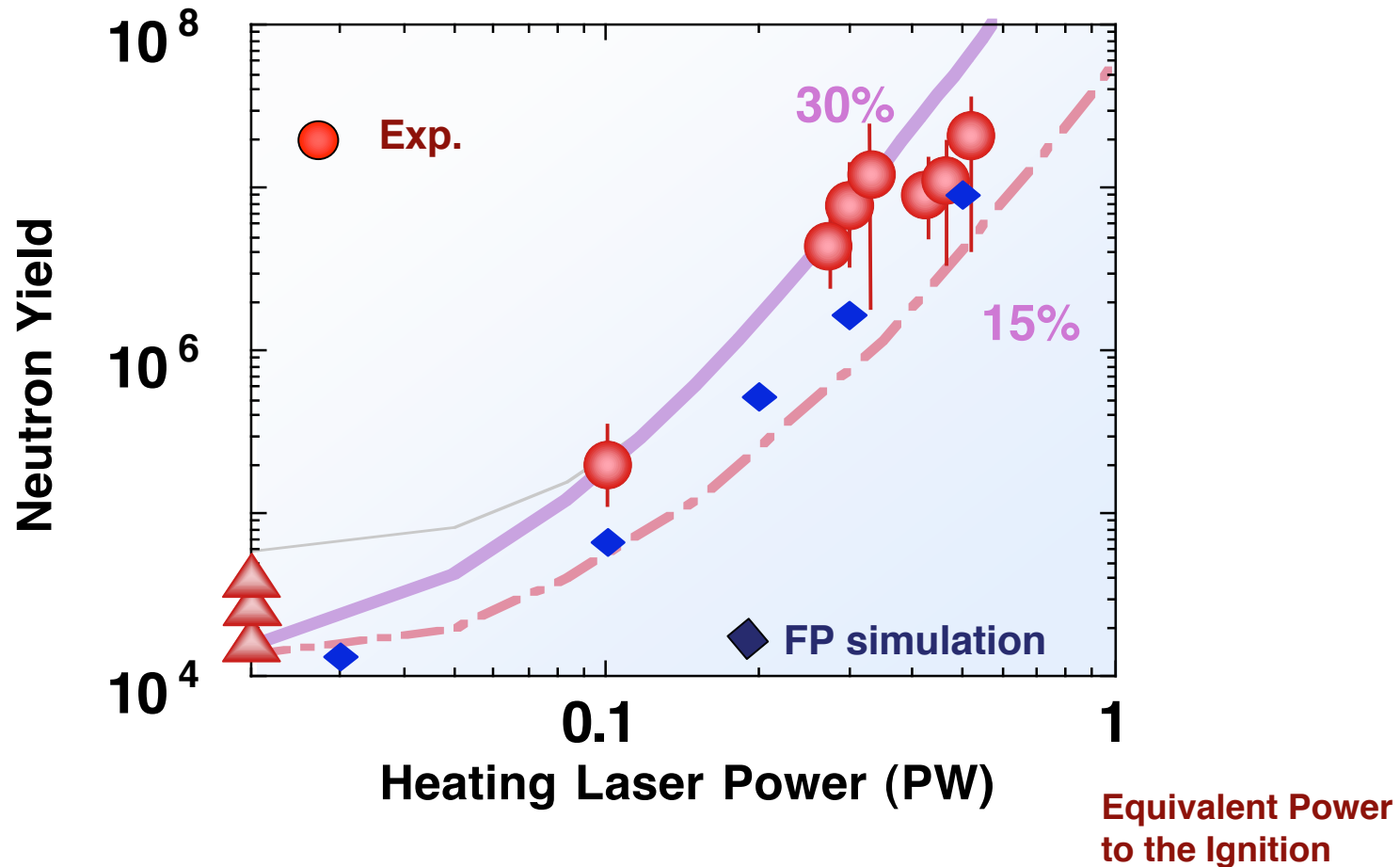
0.86 ± 0.1 keV

Efficient heating with cone-shell target

実験結果から点火に必要な追加熱レーザーの出力 (1 PW) での加熱効率は20%に達すると推定される



Enforced heating is realized at a heating power equivalent to the ignition condition on the current.



Contents



1. レーザー核融合の原理
2. 高密度プラズマ閉じ込めに向けたRT不安定性抑制
3. コーン・シェル・ターゲットによる高効率追加熱
4. **コーン・シェル・ターゲットの爆縮実験**
 - コーン・シェル爆縮では、高温低密度なホット・スポットが形成されないため、球対称爆縮よりも圧縮密度が大きくなる
5. 核融合点火に向けたFIREXプロジェクト
6. 第三の点火方式 (Impact ignition)
7. まとめ

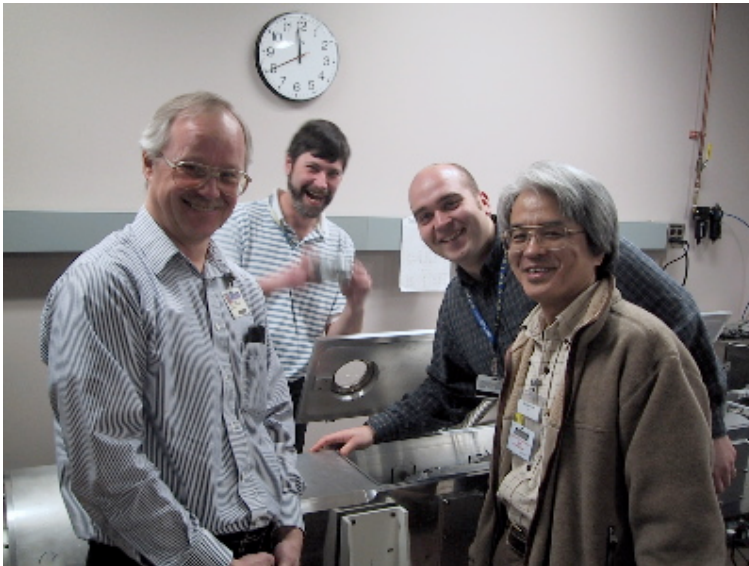
Cone-shell implosion on OMEGA

米国ロチェスター大学のオメガ装置を利用し
コーン爆縮に関する日米共同研究が進行中



OMEGA Laser Facility
University of Rochester
60 beams
30 kJ in 3w (0.35 μm)

collaboration with
R. Stephens (GA)
C. Stockel (LLE, UR)
P. J. Jannimagi (LLE, UR)



Cone-shell implosion on OMEGA

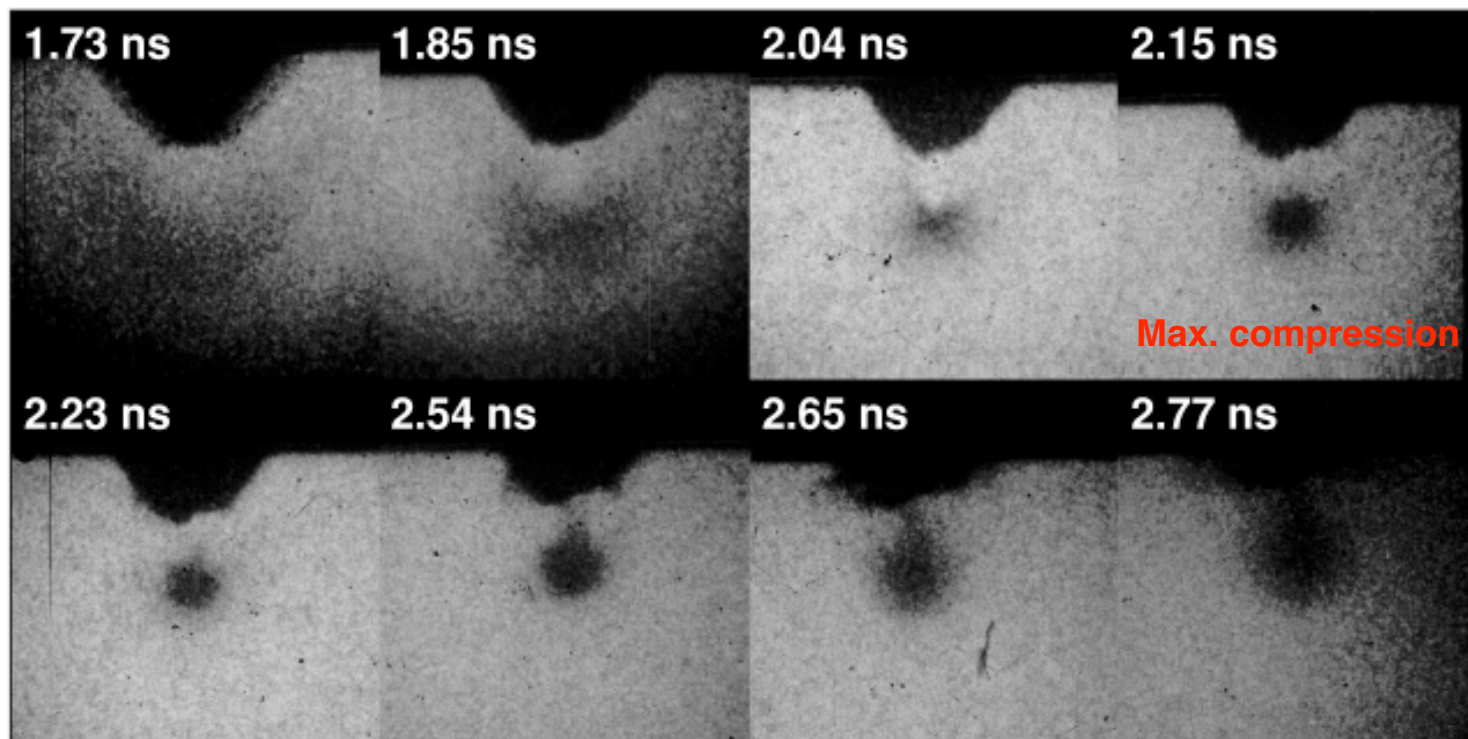
X線バックライトを用いて計測された面密度 ($\rho R = 60 \text{ mg/cm}^2$)は、球対称爆縮と比べて約50%高い



S. Fujioka
(ILE, Osaka)

Time-sequence images of backlit core plasma

35 beams 12 kJ on target
15 beams 6 kJ on backlighter (V)



870- μm CH shell
24- μm wall
10 atm D2 or DHe3 filled
35 deg half-angle gold cone

最大圧縮時でも金コーンは初期の形状を十分保っている

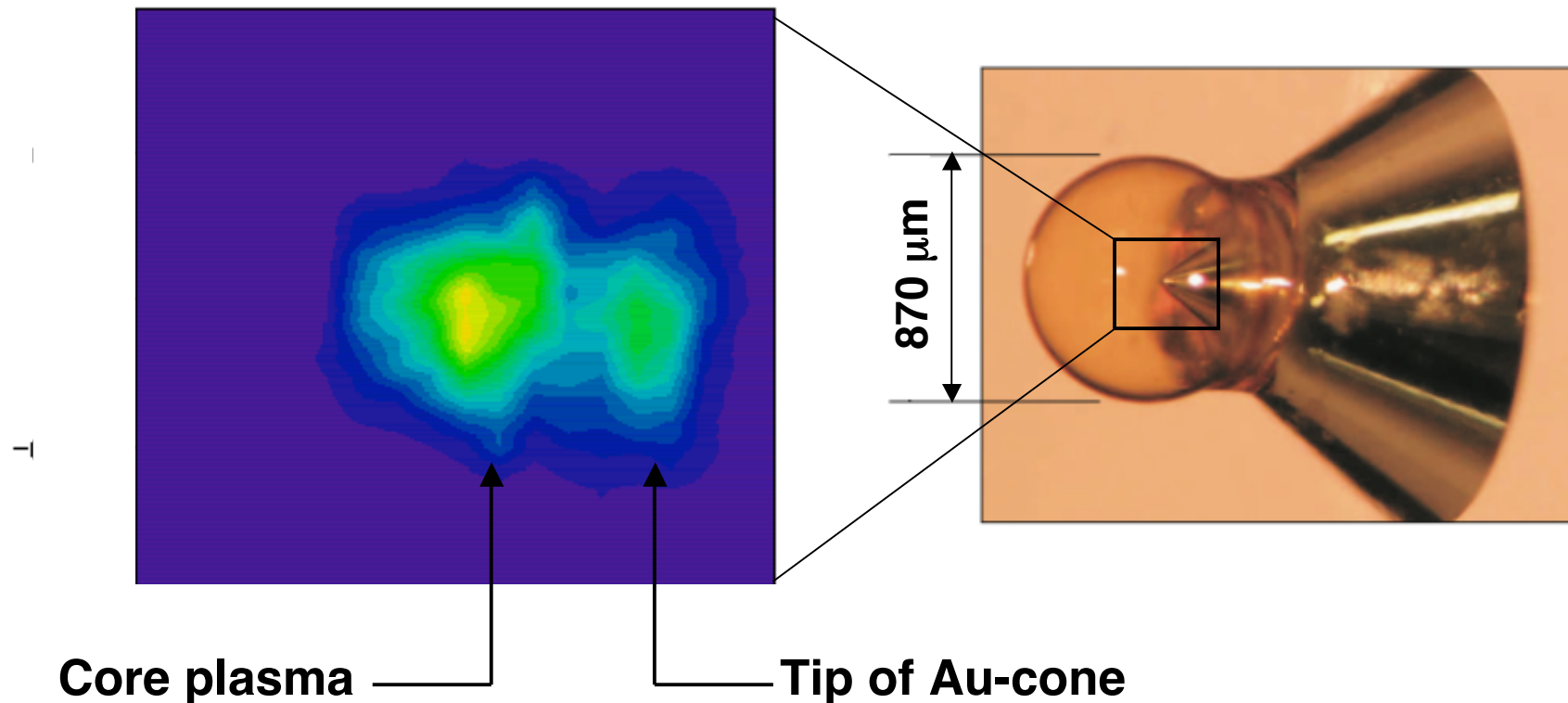
Cone-shell implosion on OMEGA

10-psの時間分解能を有する高速X線画像計測技術を用いて
コーン・シェル爆縮のダイナミクスを観測



X-ray emission
from core and cone tip

Photograph of cone-shell



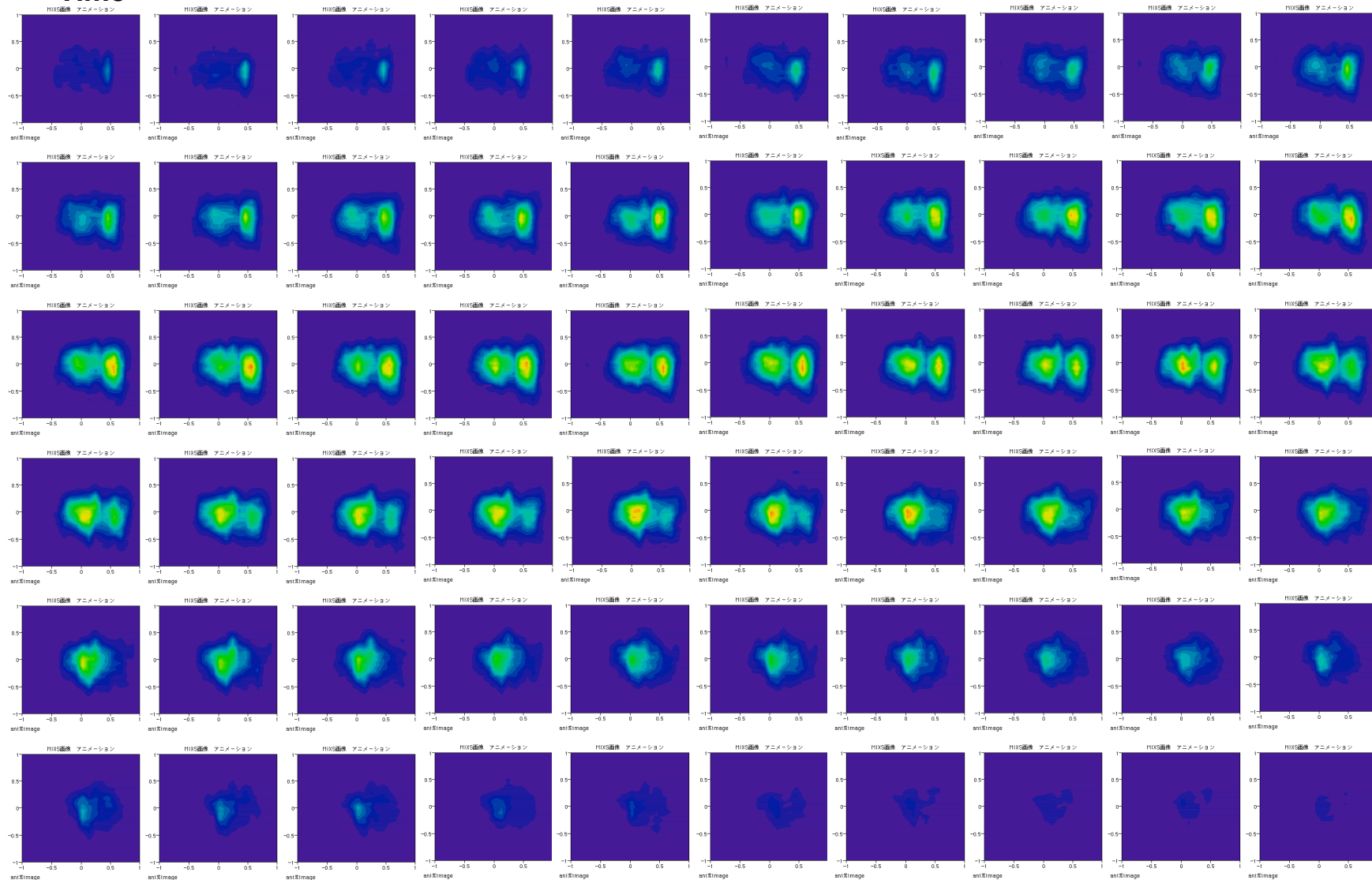
10-psの時間分解能を有するMIXS法をロチェスター大学に導入

Cone-shell implosion on OMEGA

コーンに向かって高温・低密度なガスが吹き出す様子を
明瞭に観測した



→ Time

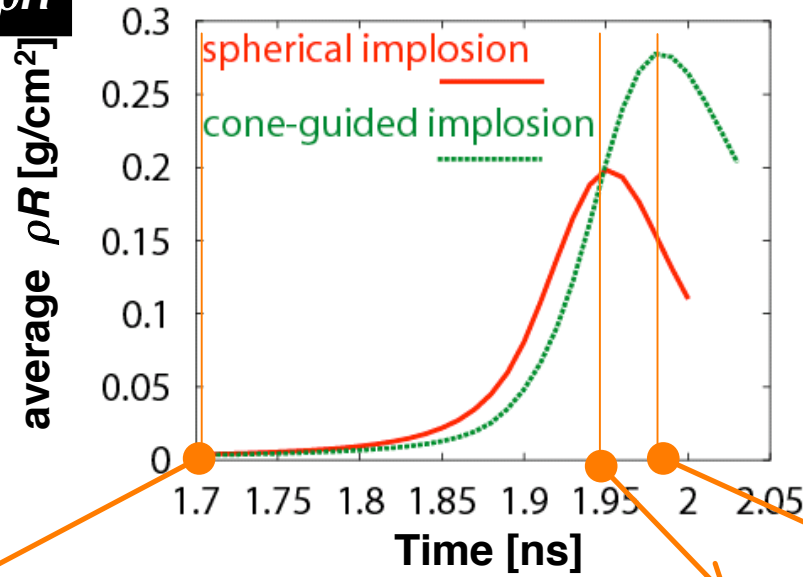


Cone-shell implosion on OMEGA

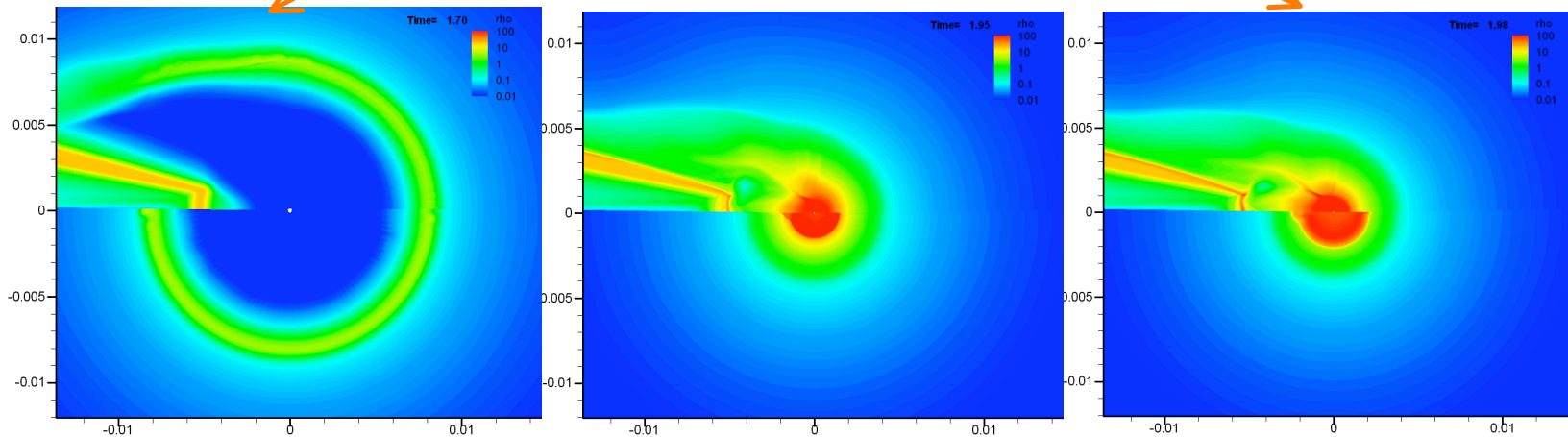
中心部に形成されたホット・スパークがコーン側に流れるため、コーンシェル爆縮の圧縮率は球対称爆縮よりも上昇する



temporal evolution of ρR



density contour (log scale)



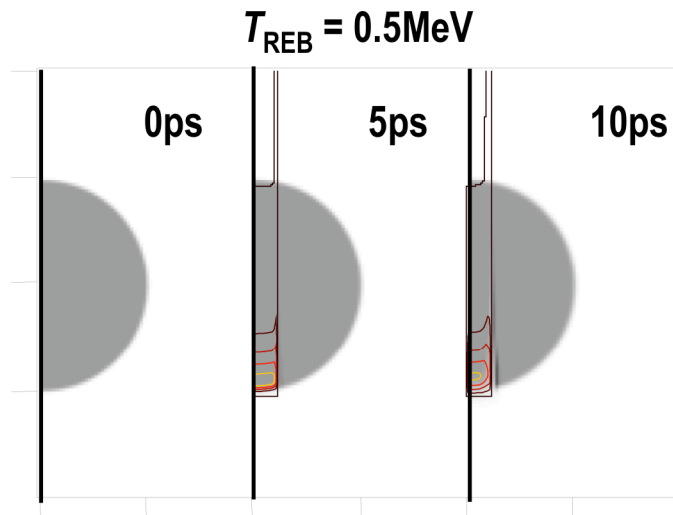
Contents



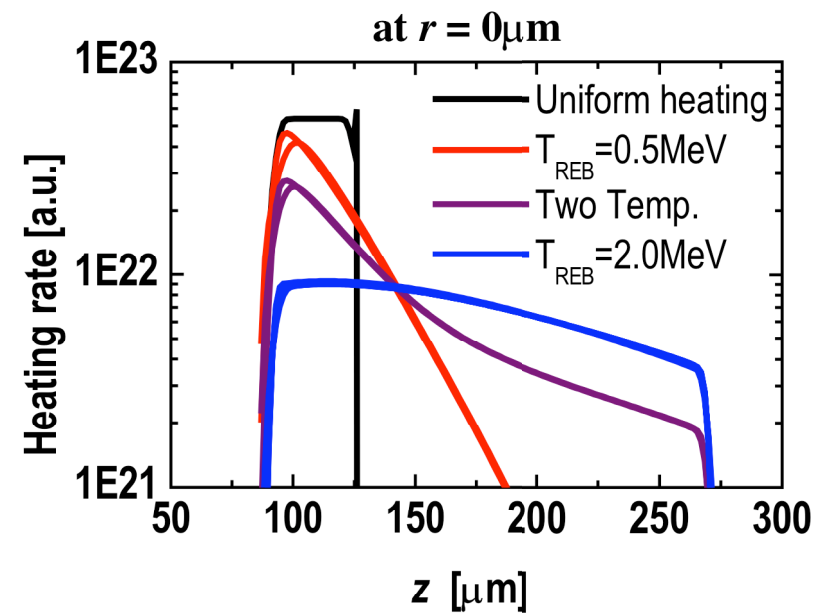
1. レーザー核融合の原理
2. 高密度プラズマ閉じ込めに向けたRT不安定性抑制
3. コーン・シェル・ターゲットによる高効率追加熱
4. コーン・シェル・ターゲットの爆縮実験
5. **核融合点火に向けたFIREX-Iプロジェクト**
 - 10 kJ/1 PWレーザーを建設し、既存の激光XII号と組み合わせ、点火温度5 keVの達成を目指す
6. 第三の点火方式 (Impact ignition)
7. まとめ

加熱の効率は、高強度レーザーで生成される
高速電子のエネルギースペクトルに強く依存する

FIREX: Fast Ignition Realization EXperiment



Contours of REB heating rate



Comparison of Core Heating Profiles

電子のエネルギースペクトルはレーザーの照射強度に依存
→ FIREXプロジェクトには、1 PW (1 kJ/1 ps) を保ちつつエネルギーを10倍にする (10 kJ/ 10 ps) 必要がある

FIREX project

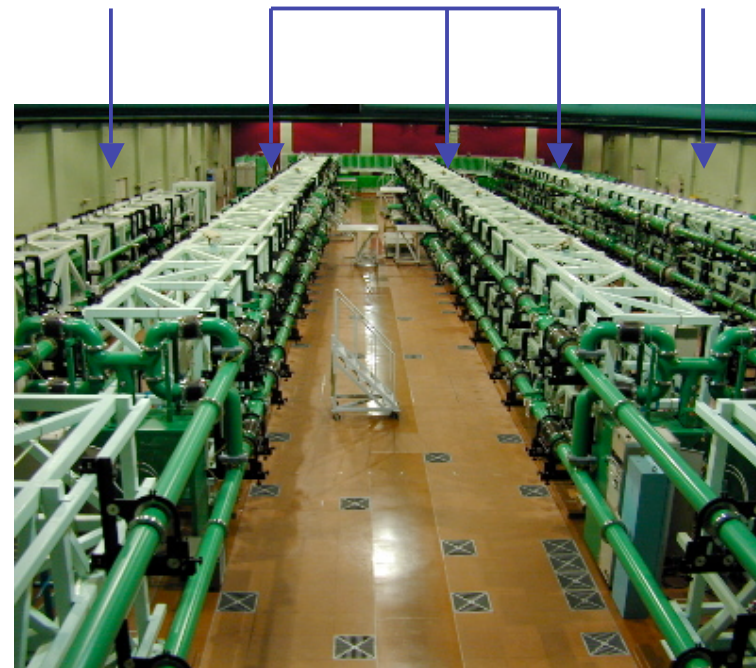
**10 kJ/ 1 PW LFEXレーザーを現在建設中
FY2006 - 07には加熱実験を開始**



**LFEX
(10 kJ)**

**GXII
(10 kJ)**

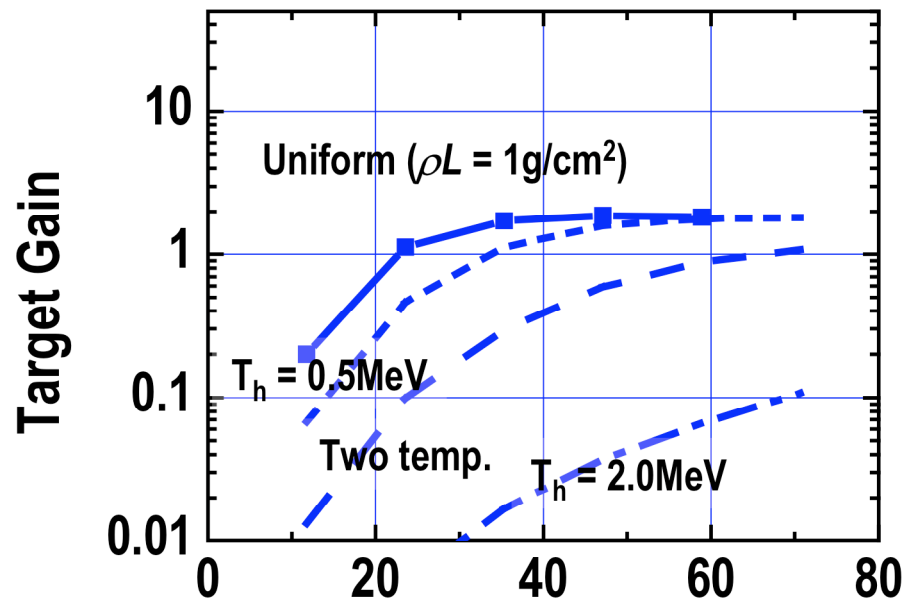
**PW
(1 kJ)**



**2.5 kJのビームを4本束ね、
10 kJ出力を実現**

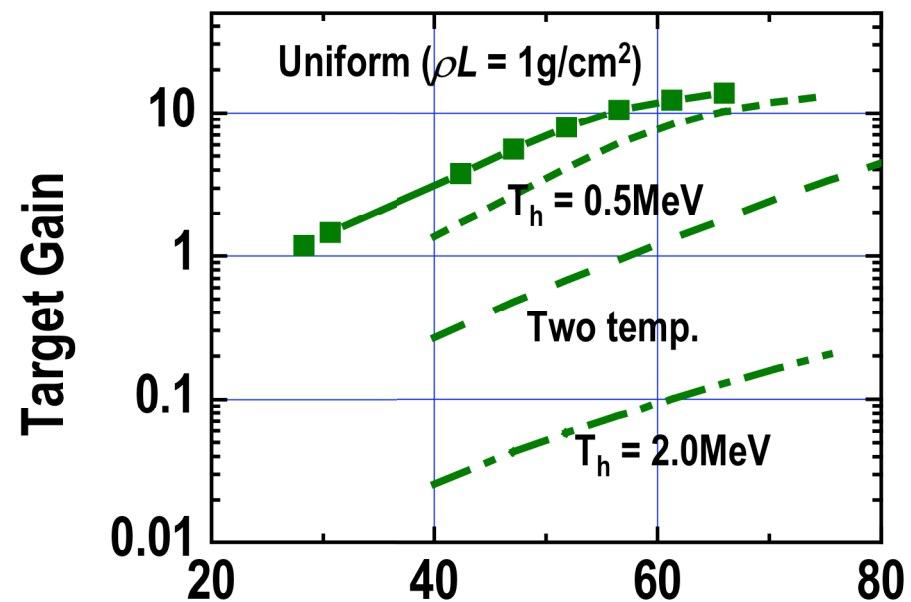
**FIREX-Iでは、100倍に圧縮した高密度プラズマを
点火温度 5 - 10 keVまで加熱することを目指す**

FIREX-1



Driver Energy for Core Heating, E_{dh} [kJ]

FIREX-2

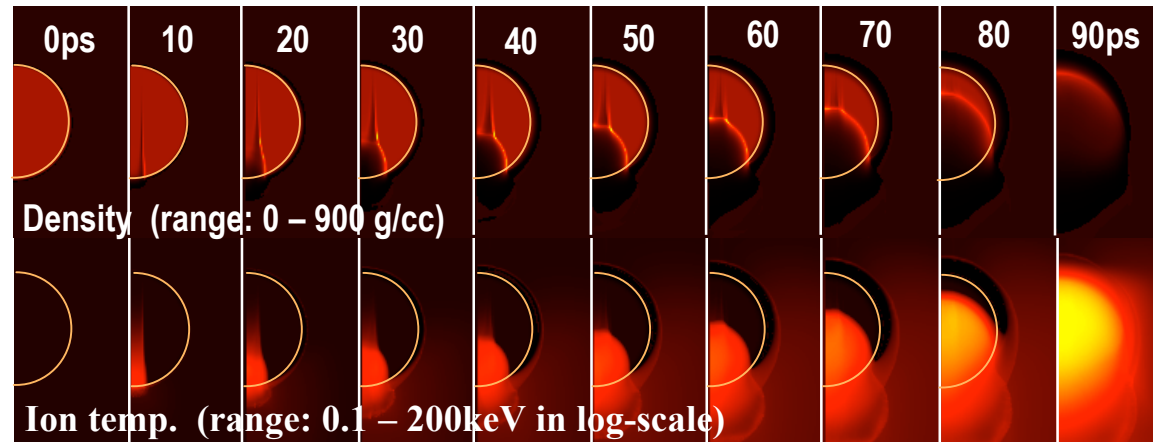


Driver Energy for Core Heating, E_{dh} [kJ]

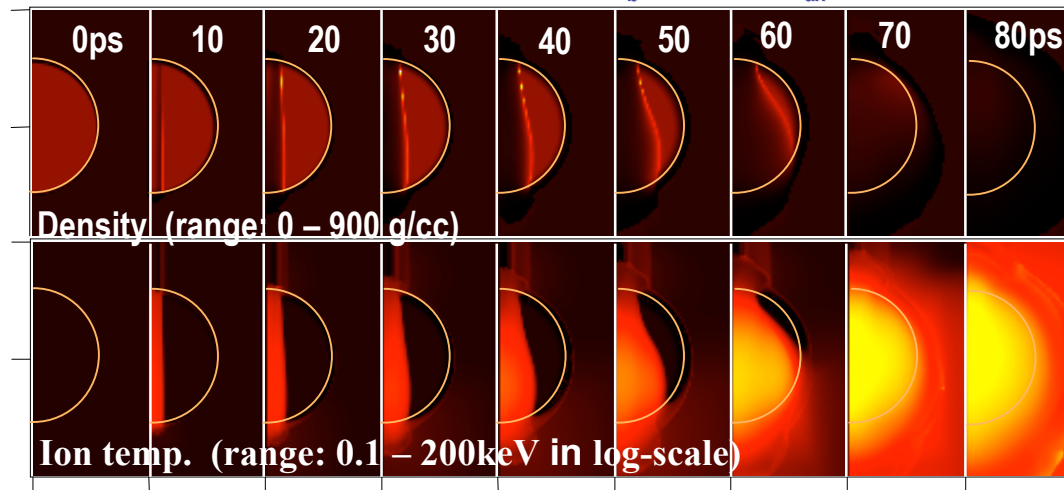
**FIREX-2では、爆縮用レーザー及び加熱レーザーを
増力 (50 kJ + 50 kJ) し、核融合点火・燃焼の実現を目指す**

**FIREX-Iでは、100倍に圧縮した高密度プラズマを
点火温度 5 - 10 keVに加熱することを目指す**

0.5MeV Maxwellian Beam ($I = 1.6E20W/cm^2$, $t = 10ps$, $r_b = 20\mu m$, $E_{dh} = 67kJ$)



2.0MeV Maxwellian Beam ($I = 6.0E20W/cm^2$, $t = 10ps$, $r_b = 15\mu m$, $E_{dh} = 140kJ$)



Contents



S. Fujioka
(ILE. Osaka)

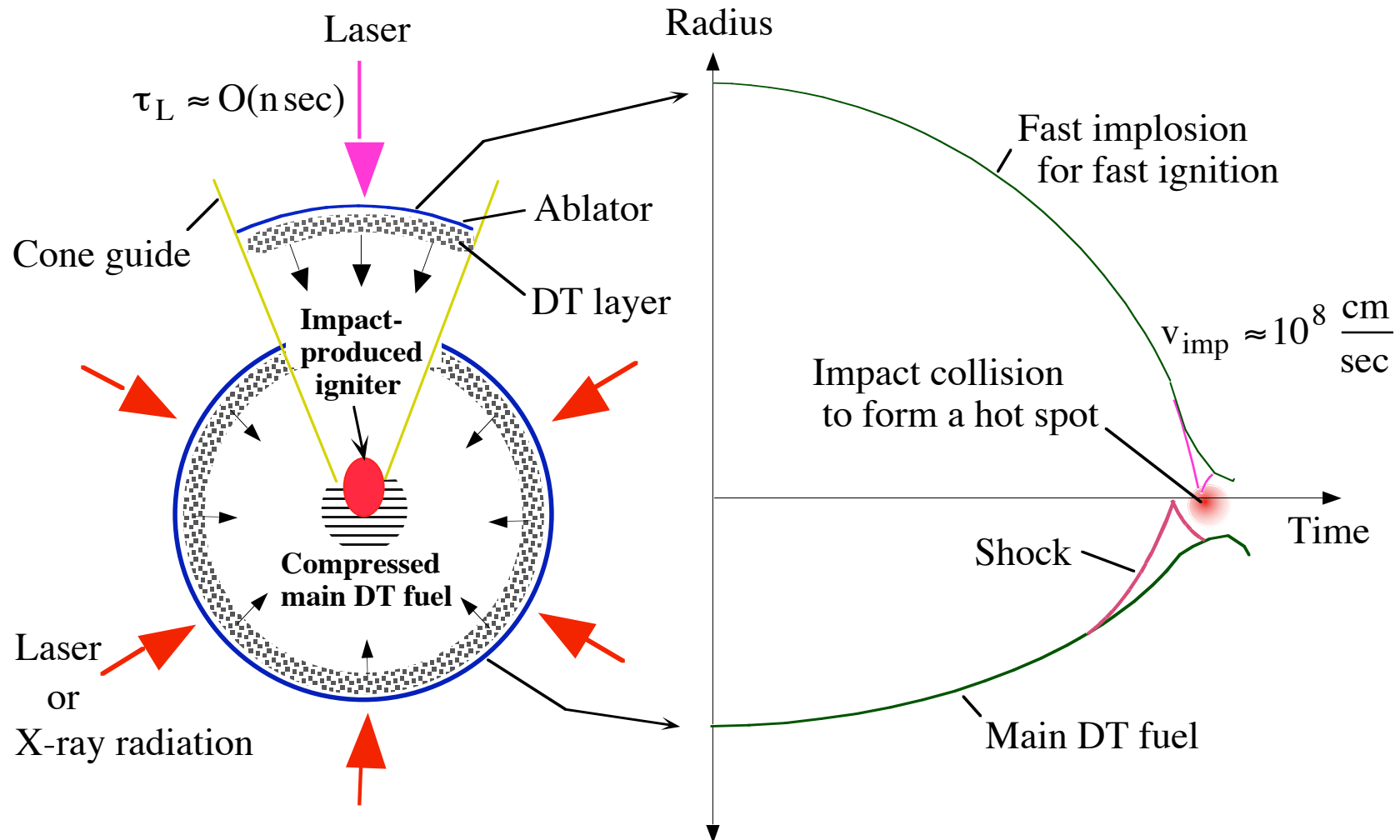
1. レーザー核融合の原理
2. 高密度プラズマ閉じ込めに向けたRT不安定性抑制
3. コーン・シェル・ターゲットによる高効率追加熱
4. コーン・シェル・ターゲットの爆縮実験
5. 核融合点火に向けたFIREX-Iプロジェクト
6. **第三の点火方式 (Impact ignition)**
 - 衝撃波を加熱媒体として使うことで、PWレーザーを使わない点火が可能
7. まとめ

Impact fusion scheme

衝撃波をエネルギー輸送媒体とすることで、
高密度プラズマの高效率な加熱が可能

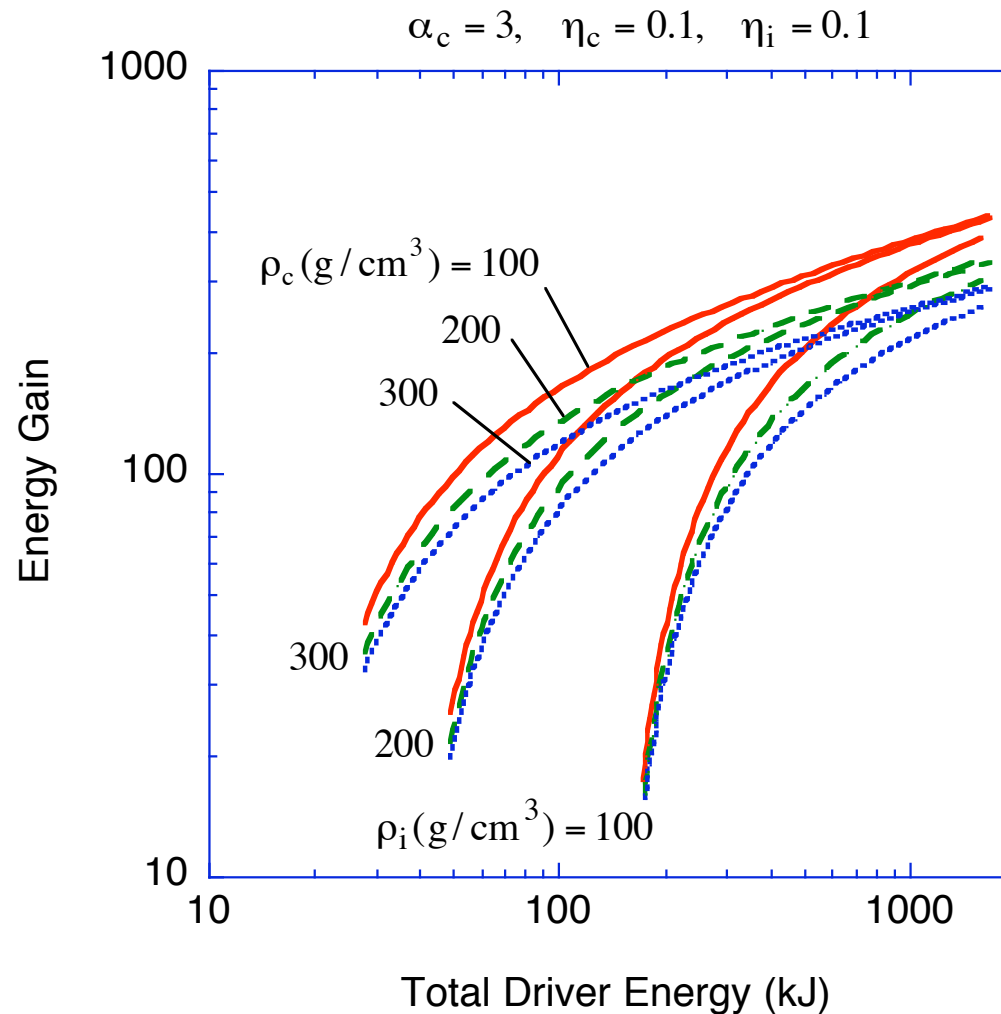

S. Fujioka
(ILE. Osaka)

M. Murakami et al., submitted to PRL



Impact fusion scheme

衝撃波加熱を用いることで、100 kJ級レーザーで点火が可能。
今後実験的に検証を進める

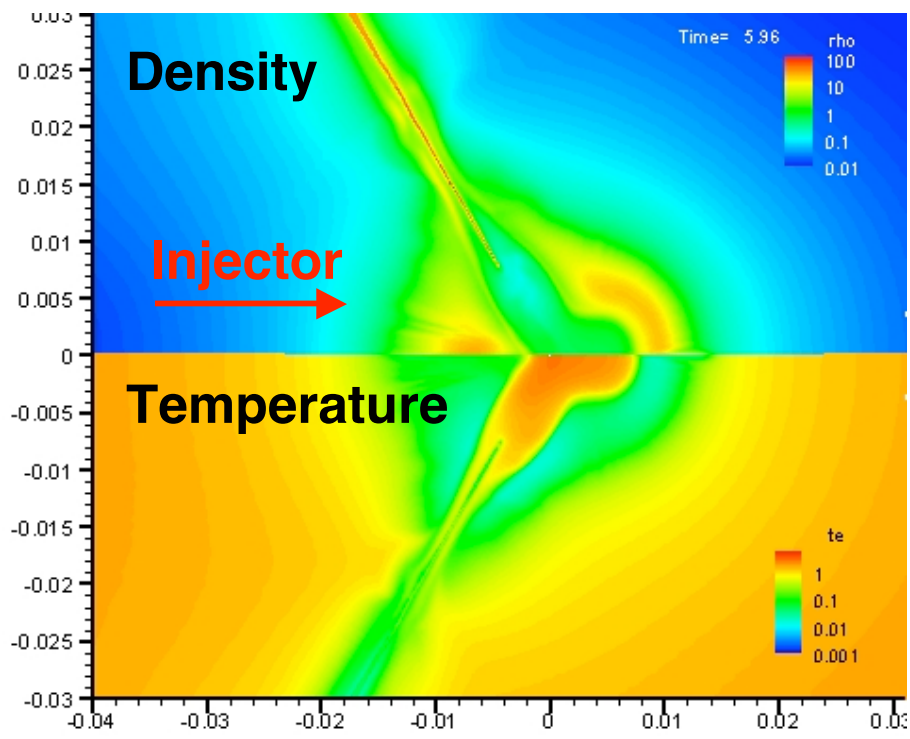


Impact fusion scheme

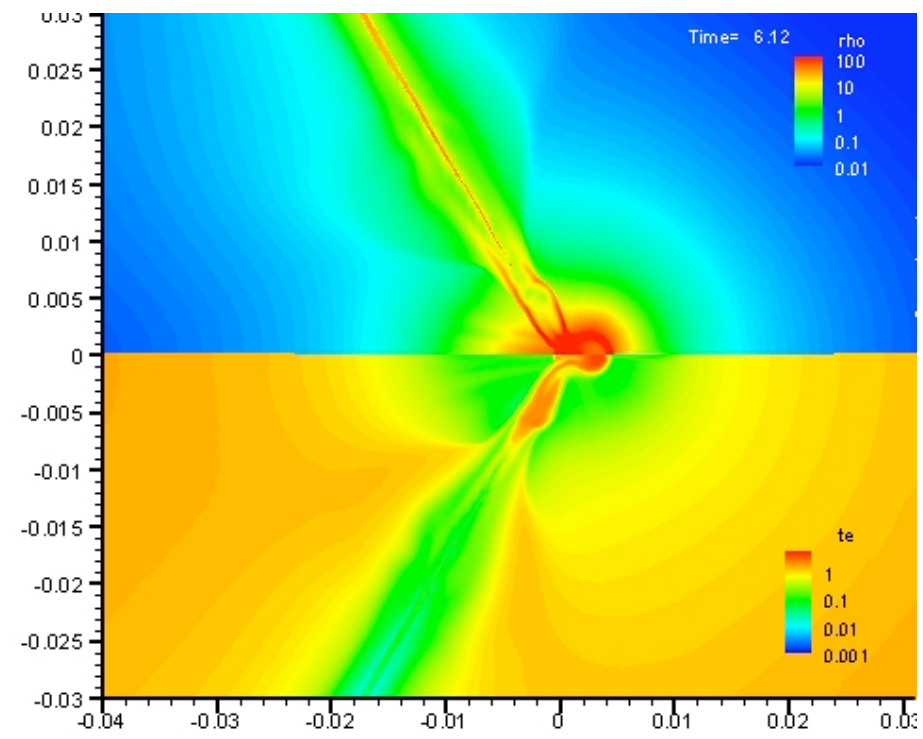
2次元シミュレーションでは、衝突によってコア・プラズマが加熱される様子が観測された



Before impact



After impact



Summary



1. 高密度圧縮に不可欠な**RT不安定性の抑制手法**が確立された。
2. 点火に必要な出力（1 PW）での**加熱効率が約20%程度**であることが明らかになった。
3. **コーン・シェル・ターゲット**は高密度爆縮に適した**特性**を有しており、点火・燃焼まで十分適用可能であることが明らかになった。
4. 核融合点火温度の達成に向けた**FIREXプロジェクト**が進行中である。
5. 高強度レーザーを必要としない新しい点火手法として**Impact fusion**が提案され、理論・シミュレーションによる解析が進められている。