

高速点火レーザー核融合の 多階層連結シミュレーション

城崎知至

大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

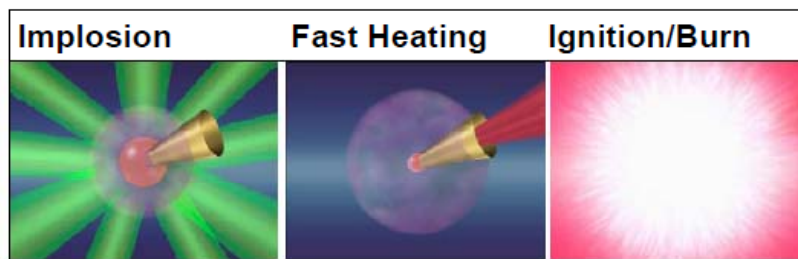
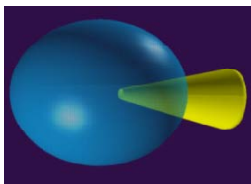
1. 研究背景・・高速点火核融合、FIREX project
2. 統合コードFI³による爆縮・加熱シミュレーション
3. 流体+Fokker-Planckシミュレーションによるコア加熱
4. まとめ



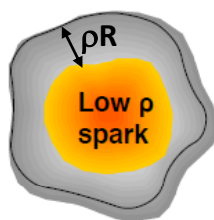
FI³



高速点火レーザー核融合



The same thickness yields the same Q.



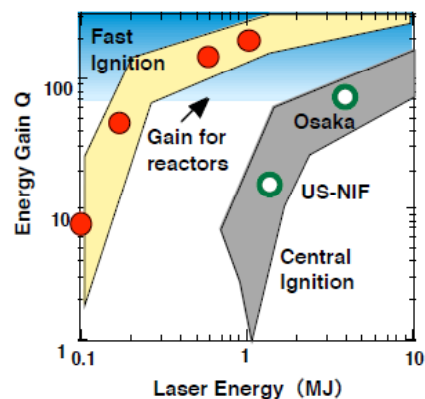
Central ignition

Large volume
→ Large driver energy



Fast ignition

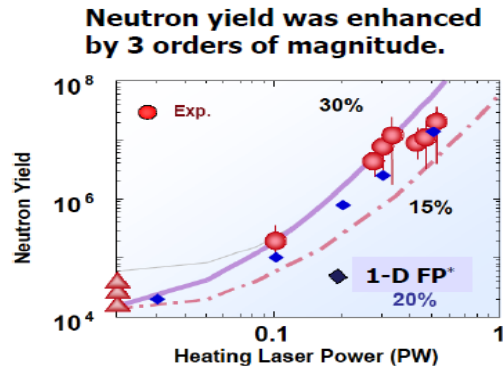
Small volume
→ Small driver energy



※ Gain Q = fusion output energy / driver energy

コーンガイディング高速点火 → FIREX-I

- コーンにより低密度膨張プラズマを排し、レーザー導波路を確保することで、爆縮コア近傍までレーザーを導入できるとともに、コーンによりレーザー光を集光コーン先端部にしゅうこうできる。
- このため、爆縮コア近傍で効率よく高速電子を生成でき、高効率なコア加熱が期待される。



Fast Heating of Cone-Guided CD Targets with GEKKO PW Laser at ILE R. Kodama, et al., Nature 418, 933 (2002)



Fast Ignition Realization EXperiment (FIREX) project at ILE, Osaka Univ.

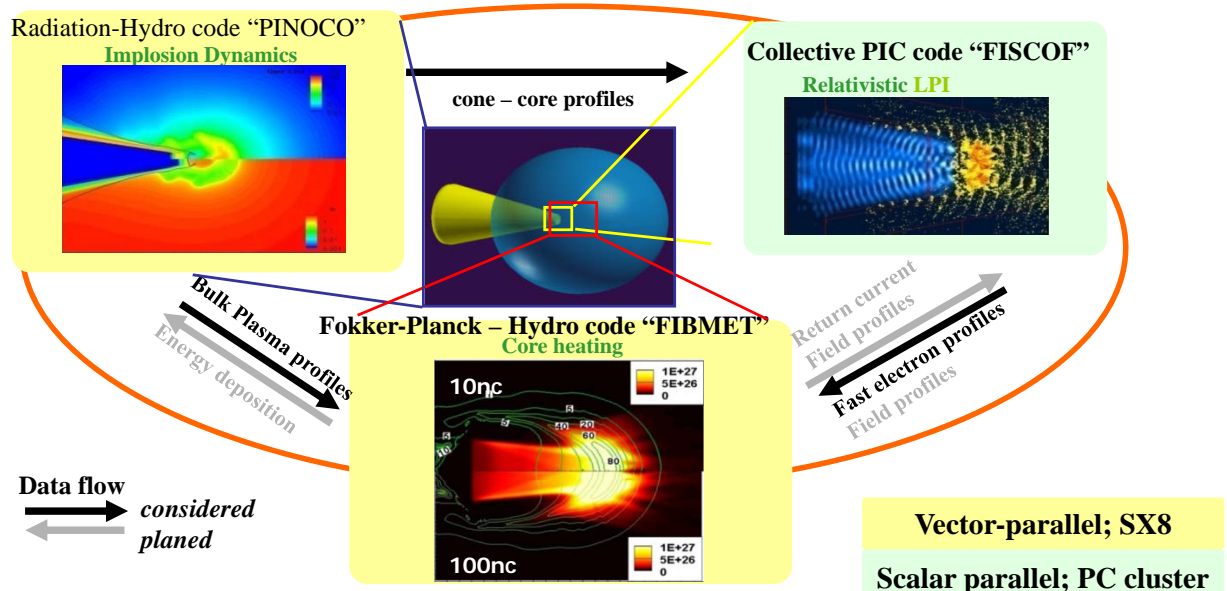
Phase I - to demonstrate fast heating up to the ignition temperature, 5[keV]

Phase II - to achieve ignition-and-burn

統合コードF³による爆縮・加熱シミュレーション

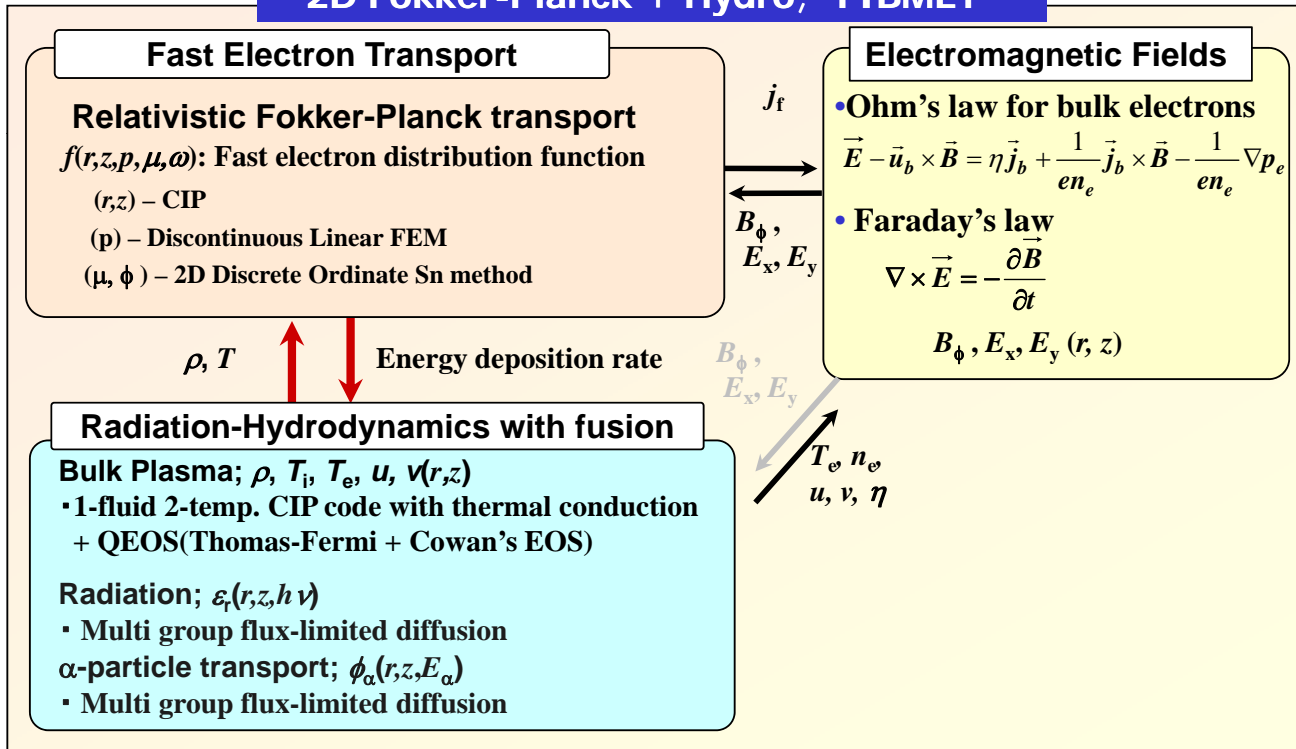
F³

- 爆縮からコア加熱、さらには核燃焼に至る過程において、重要となる物理現象を精度良く取り扱う必要がある。
 - 個々の物理現象はサブフェムト秒($<10^{-16}$ sec)・サブミクロン(10^{-8} m)スケールの相対論レーザープラズマ相互作用からナノ秒(10^{-12} sec)・数百ミクロン(10^{-4} m)スケールの爆縮過程まで時間・空間的に非常に大きく変化する。
 - 重要となる物理現象の物理モデル(輻射-流体・運動論的記述・粒子的記述)が異なる。
- 単一コードでのシミュレーションは不可能であり、モデルの異なる数種のコードを結合した高速点火統合シミュレーションコードF³(Fast Ignition Integrated Interconnecting code)を開発し、爆縮~コア加熱シミュレーションを行っている。



流体 + Fokker-Planckシミュレーションによるコア加熱 Simulation code

2D Fokker-Planck + Hydro; "FIBMET"



流体 + Fokker-Planckシミュレーションによるコア加熱 Simulation condition

Typical computational conditions

Real space; (r, z) – 50x100 ~ 80x210 mesh

Fast electron transport ; momentum $\rightarrow p$ – 25 group, $(\mu \times \phi)$ – 144 directions

Radiation transport ; energy $\rightarrow h\nu$ – 21 group

α -particle transport ; *Neglected*

Simulation time: 7 ~ 12ps (300,000 ~ 500,000 steps)

SX8@ILE node (1 node ; 4 or 8cpu), auto parallelization

Memory size: 7GB ~ 24GB, V ratio; >98%, P ratio; ~97%, CPU time; 500 ~ 5000hrs

Example of core heating simulation

Core profile: DT core

$\rho_0 = 200 \text{g/cm}^3$, Gaussian with $r_{\text{HWHM}} = 10 \mu\text{m}$,

$T_i = T_e = 0.4 \text{keV}$ uniform

$m_{\text{fuel}} = 2 \mu\text{g}$

Fast electron beam

Injection; 50 μm away from the core center.

Super Gaussian with $r_{\text{HWHM}} = 15 \mu\text{m}$ in r -direction

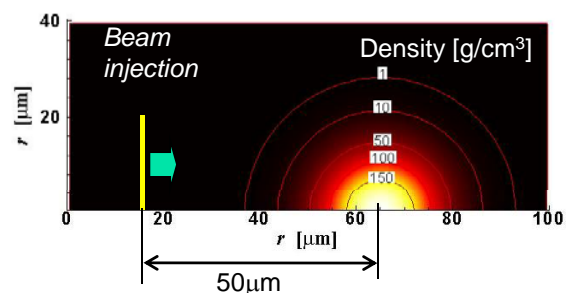
$T_{\text{fe}} = 1.0 \text{MeV}$ (slop temperature)

$E_{\text{fe}} = 4 \text{kJ}$

$\tau_{\text{fe}} = 10 \text{ps}$

$P_h = E_{\text{fe}} / \tau_{\text{fe}} = 0.4 \text{PW}$

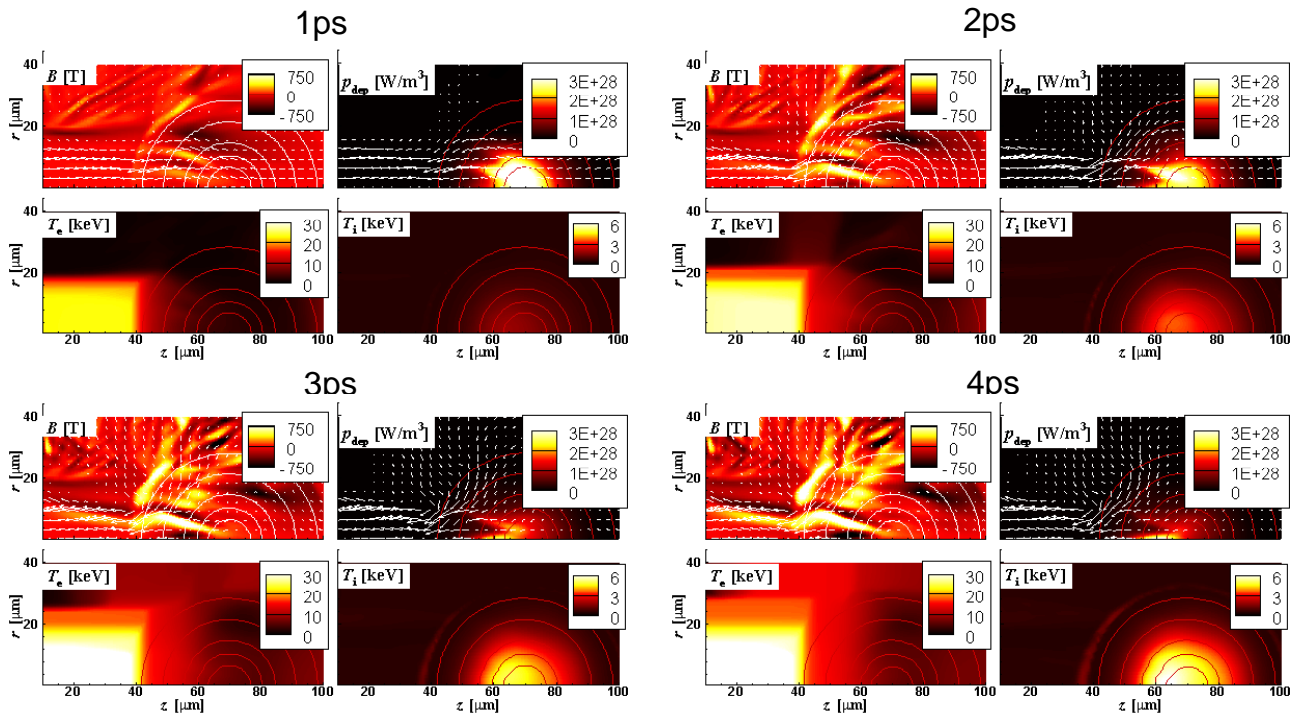
$I_h = 5.7 \times 10^{19} \text{W/cm}^2$ at the central axis



流体+Fokker-Planckシミュレーションによるコア加熱 Results 1/5

The Fast electron beam: $T_{fe} = 1.0$, $E_{fe} = 5\text{kJ}$, $\tau_{fe} = 5\text{ps}$

Spatial profiles of B-fields, heating rate, T_e and T_i



まとめ

- 高速点火レーザー核融合をはじめとするレーザープラズマの統合シミュレーションを目的とした2次元統合コードを開発。
 - 流体、運動論的輸送、粒子、原子過程、放射、拡散、電磁場、核反応など、様々な物理現象を取り扱う—大規模多階層
 - 各コード(流体・輸送・粒子)に適したマシン(Vector or Scalar)にて、コード間でデータの授受(on or off line)を行いつつ実行。
- 高精度化、大スケール・長時間化、ならびに3次元化を行う上では、数値解法上の改良が必要。
 - 共有メモリー&自動並列化;手動による並列化の手間が省け、物理モデルの改良等に集中できる。→さらなる共有メモリー増、高速化&コンパイラの高性能化に期待。
 - 一方、分散メモリー+MPI並列への対応も必要・