

# 素過程・相互作用 プラズマ量子プロセス

- ハイパワーレーザーにより創り出す  
連成するエネルギー変換の系 -

基礎物理シミュレーション研究系  
坂上仁志

# NIF実験の成功により レーザー核融合研究は高効率化へ

- 間接照射中心点火実験で1.3 MJの核融合出力。
  - On Aug. 8, 2021.
  - 1.9 MJ laser shot

1.3 MJ

- 今後は高効率核融合燃焼と核融合エネルギー利用へ

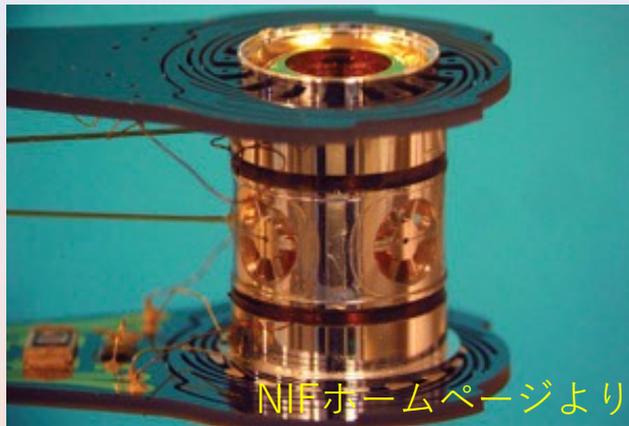
# 核融合としての課題

- ❁ レーザー核融合エネルギーの実現を目指すためには2つの連成する物理過程が重要である。
  - 高効率で核融合燃焼を起こし，レーザーエネルギーを核融合エネルギーに変換する。
  - 発生したパルス的な核融合エネルギーを高効率で熱エネルギーに変換する。
- ❁ レーザーエネルギーから始まる複合かつ連続した非平衡開放系において連成するエネルギー変換現象，特に，レーザーとプラズマの相互作用や粒子線と物質の相互作用の研究・モデル化，その連成する物理現象のコントロールが課題となる。

# 燃焼の効率化

間接照射・中心点火

高コスト・低変換効率



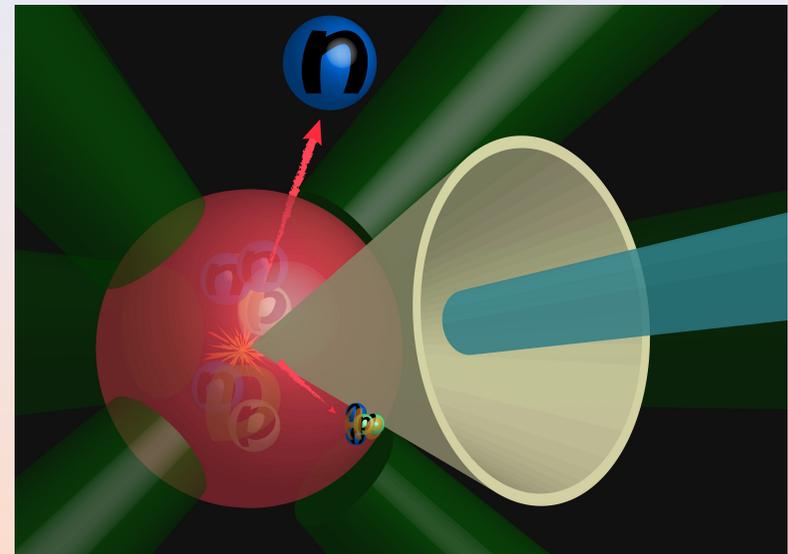
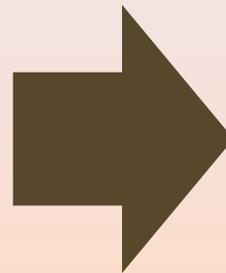
高出力レーザー



直接照射・高速点火

低コスト・高変換効率

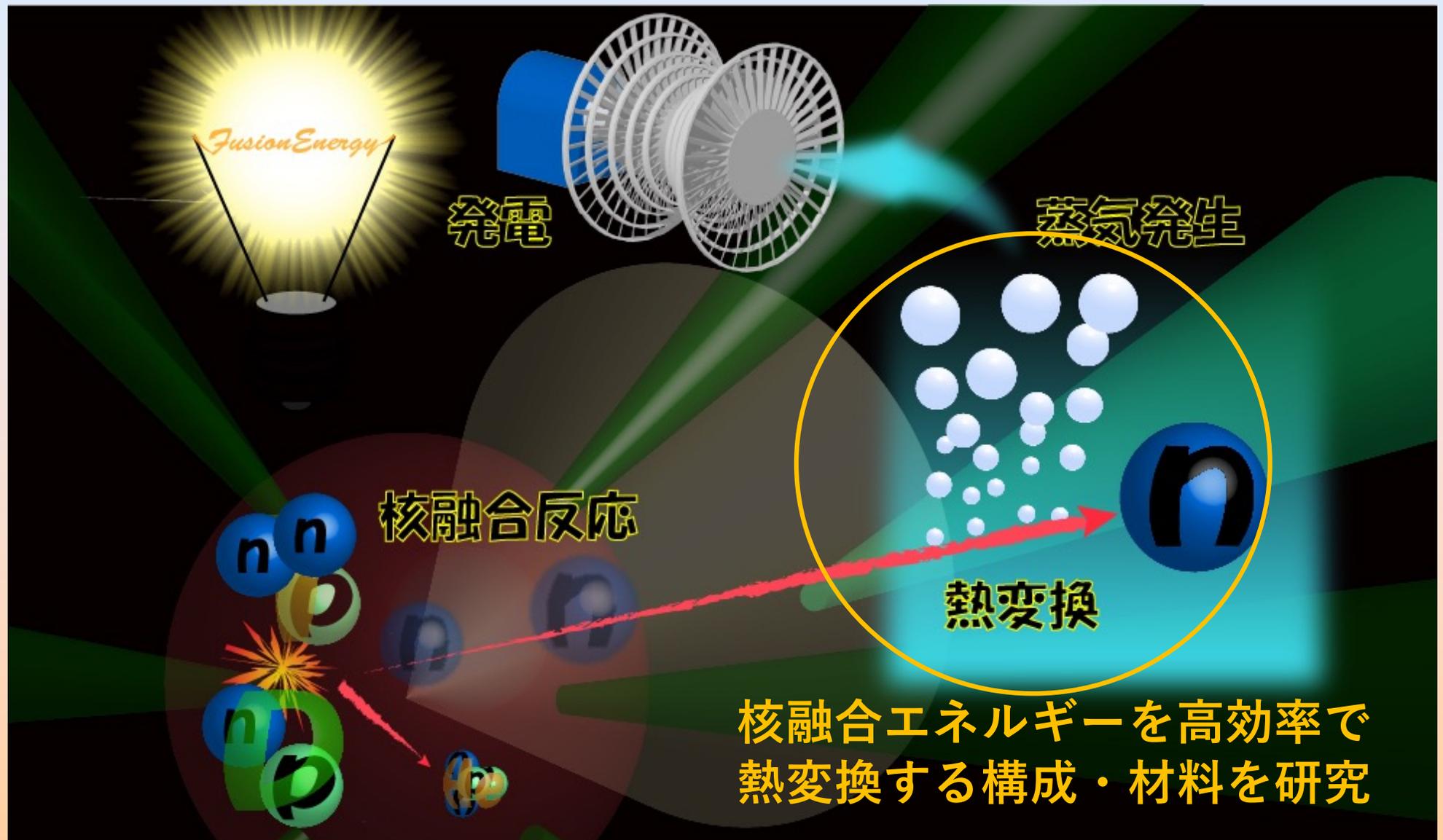
高効率化



- 爆縮～点火～燃焼までの過程を効率化
- 必要なレーザー出力を低減

# 熱エネルギーへの変換

これまでは手つかずの課題

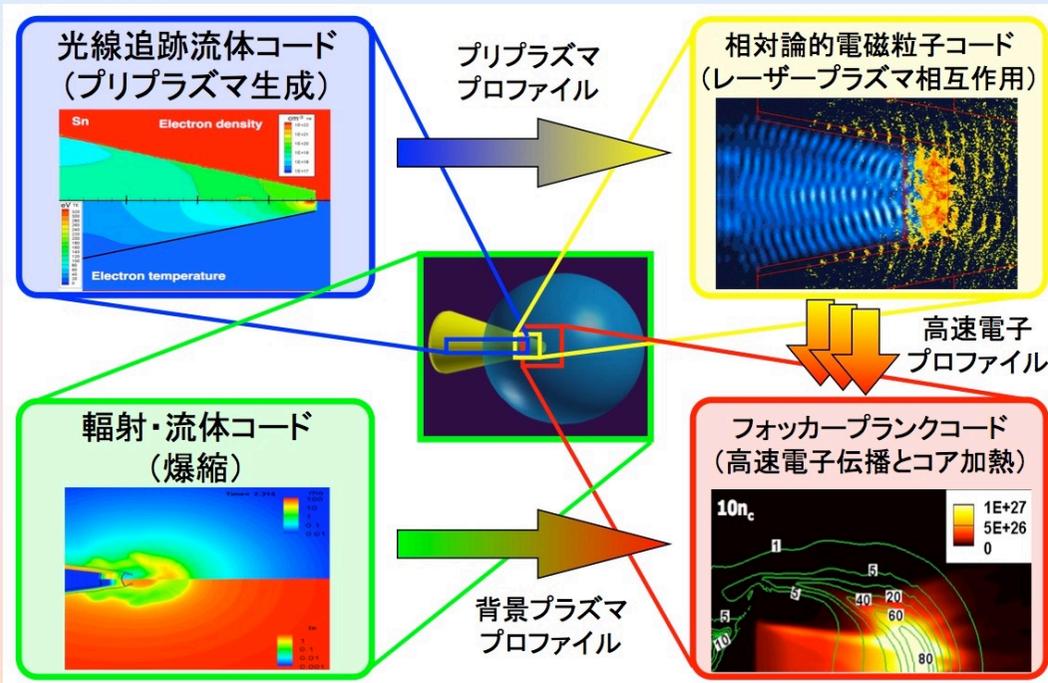


核融合エネルギーを高効率で熱変換する構成・材料を研究

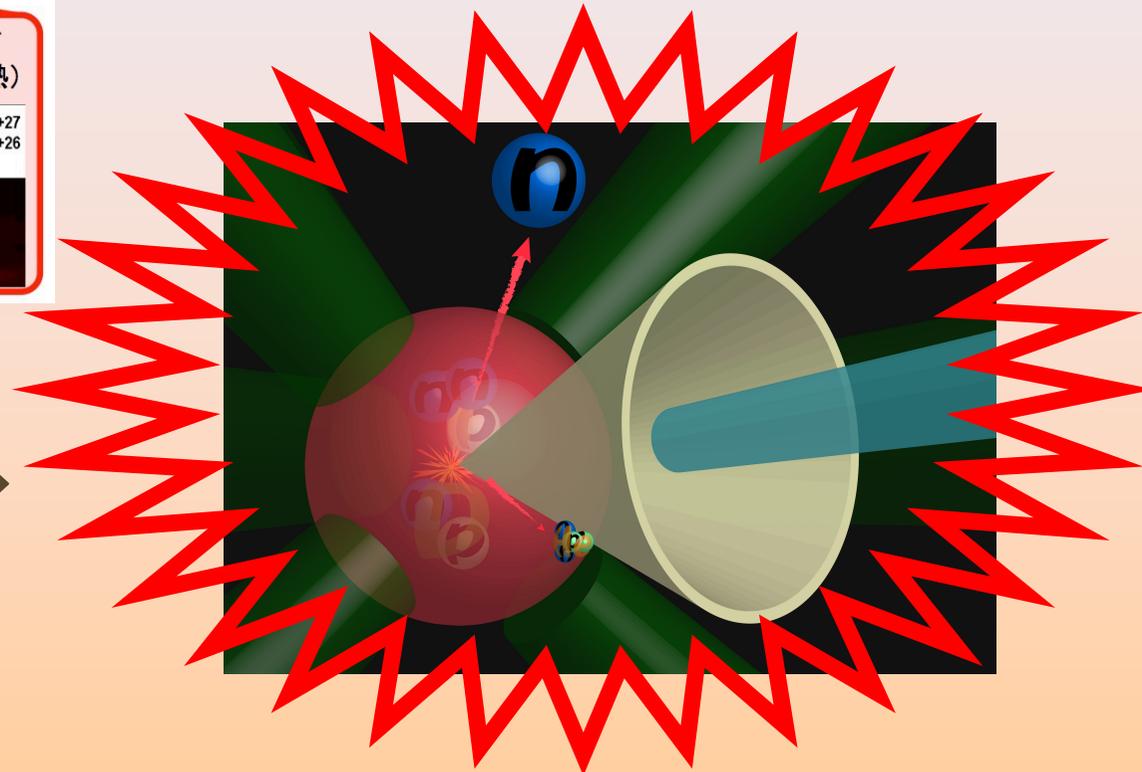
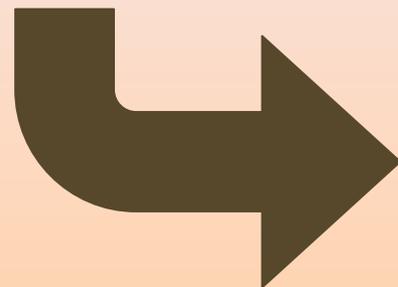
# 学術的な特徴づけ

- ❁ これまでにGXII/LFEXにおける高速点火の実験では中心点火方式と比較して約10倍の効率での核融合積を実証するなど、国内の研究がレーザー核融合の効率化に重要な役割を果たしている。
- ❁ レーザープラズマ相互作用は、非常に短い時間に完結する複合・連続したエネルギー変換過程である。
  - これまで個々の変換現象を切り出して、実験とシミュレーション結果を比較し、その個別現象を理解してきた。
- ❁ 個別の物理現象を複合かつ連続した非平衡開放系において連成するエネルギー変換現象へと発展させる。
  - レーザー研と連携して、レーザープラズマ相互作用のモデル化、粒子線物質相互作用の研究を進める。

# 個別現象の理解から 連成する物理の総合的理解へ



- より密接な連成
- 双方向の連成



# アプローチ

- ❁ レーザー核融合に関連する現象をハイパワーレーザーが創り出す連成するエネルギー変換の系として捉える。
  - エネルギー変換も量子プロセスである。
- ❁ 個別の物理現象を理解し、それらをコントロールすることで連成するエネルギー変換の系全体としての効率化を考える。
  - 連成した現象を構成する各現象を単純に組み合わせても必要な状態を創り出すことはできない。
- ❁ レーザーと物質の相互作用によりエネルギー変換過程の複合や連鎖の系を創り出すことができるため、この実験系を利用して研究を推進する。

# 学際的展開

- ❁ レーザー核融合の実験系は，連成するエネルギー変換の系を系毎の要素研究としてコンパクトに実施できる。
- ❁ ハイパワーレーザーを用いた研究ではレーザー加速による中性子・イオン加速の実証研究が進んでいる。
  - レーザー加速も応用した核融合研究を展開する。
- ❁ ユニット連携
  - 概念的に類似の現象を取り扱う「異相連成現象」
  - 様々な視点からの計測を可能にする「計測」
- ❁ 貢献できる分野
  - 核融合燃焼物理学，核融合炉工学
  - レーザー宇宙物理学，超高圧物性科学，レーザー量子ビーム科学，量子真空物理学，新材料，放射線科学，同位体科学，医療や中性子リソグラフィ等

# パワーレーザーのJ-EPoCH計画

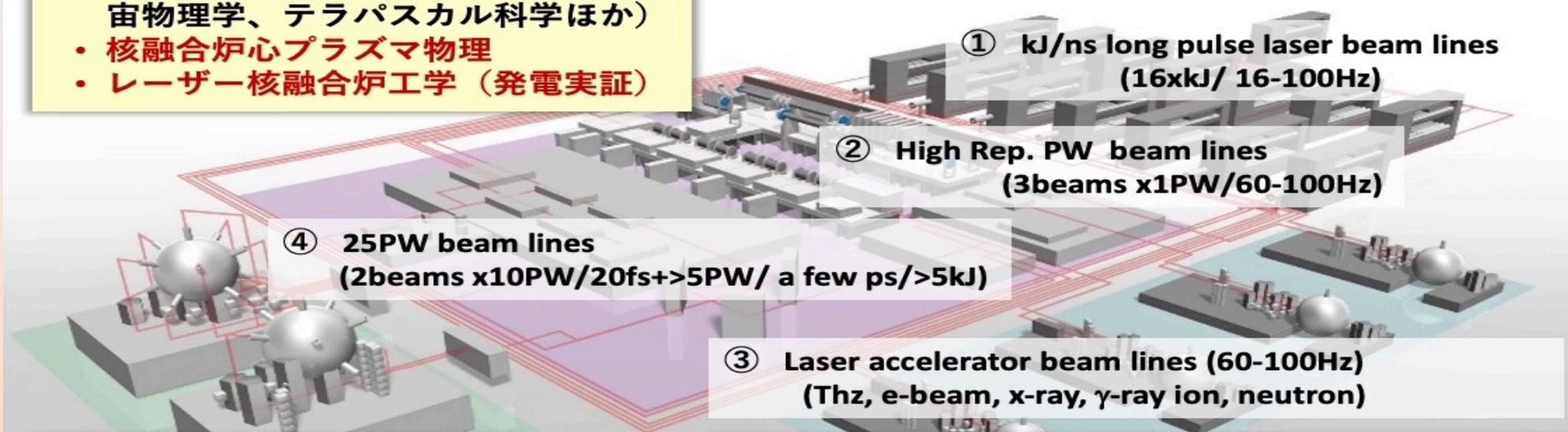
## 世界を先導する高繰り返し大型パワーレーザーシステム：J-EPoCH —パワーレーザーの新潮流—

J-EPoCH : Japan Establishment for a Power-laser Community Harvest

### ◆ 高繰り返し高出力レーザー

- 高エネルギー密度科学  
(超高压物理、惑星科学、レーザー宇宙物理学、テラパスカル科学ほか)
- 核融合炉心プラズマ物理
- レーザー核融合炉工学 (発電実証)

J-EPoCHは、レーザー核融合の専用装置ではない。



### ◆ 超高強度レーザー

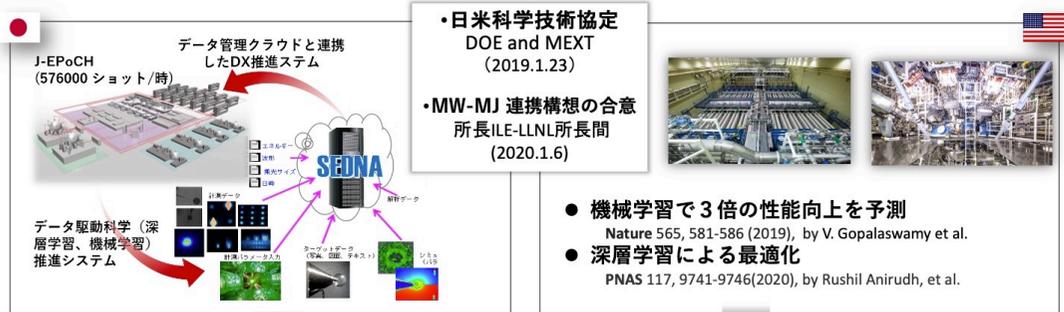
- 真空量子物理学
- レーザー核科物理学
- 超高強度場物理学
- レーザー宇宙物理学

### ◆ 高繰り返しパワーレーザー + 高輝度2次放射線源

- 新材料開発 (高機能材料、極限材料)
- 生命科学や創薬
- 高速化学・固体物性やデバイス開発
- ニュクレアフォトニクス

# J-EPoCHにおける核融合研究

メガジュール(NIF)ーメガワット(J-EPoCH)連携による  
データ駆動型解析による炉心プラズマ最適化と点火燃焼数値実験



高速点火方式の燃料爆縮と加熱に関するビッグデータ + 世界で唯一可能な核融合燃焼に関するデータ

データ駆動型解析・AI技術による最適化



数値実験による核融合点火を実現

FIREX Numerical Experiment Optimization

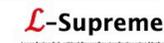
点火燃焼の物理  
(核融合点火数値実験)

レーザー核融合定常運転実証  
(未臨界発電実証)

10年以内で実現できるレーザー核融合未臨界発電炉  
～中性子→熱→電気変換実証 だけではない様々な用途～



A. Iwamoto and R. Kodama, *High Energ. Dens. Phys.*, 36 (2020), 100842.



定常発電実験: 中性子-熱-電気エネルギー変換技術

- 発生核融合エネルギー: 22.4 J/shot; 総回収熱エネルギー: 14.0 J/shot  $Q = 0.002$  (14 J / 8 kJ)
- > 1~100 Hz → 熱エネルギー: 14 ~ 1,400 W; 発電量: ~W

中性子利用: 核融合炉材料技術

- 発生数:  $10^{13}$  /shot
- > 1~100 Hz →  $10^{13} \sim 10^{15}$  n/sec
- > 直径20 cmでは  $6.6 \times 10^{13} \sim 10^{15}$  n/m<sup>2</sup> sec

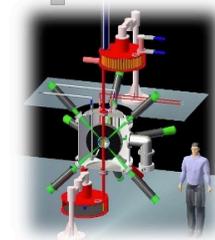
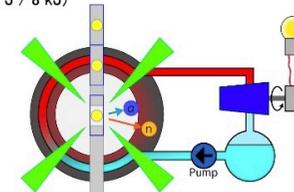
トリチウム増殖: 核融合燃料増殖技術

- 発生トリチウム数:  $3.8 \times 10^{13}$  個/100 shots
- 発生放射能:  $6.8 \times 10^4$  Bq
- > TBR:  $6.8 \times 10^{-9}$  ( $3.8 \times 10^{11} / 5.6 \times 10^{16}$  [LHART])

保護層熱負荷

- 熱負荷: 8 kJ/shot (ほぼレーザーの全エネルギーを仮定)
- > 1~100 Hz → 熱負荷: 8 kW~0.8 MW
- > 直径20 cmでは  $64 \text{ kW/m}^2 \sim 6.4 \text{ MW/m}^2$

- レーザー核融合発電炉のシステムを再現できる
- 小規模な実験環境
- 磁場核融合の課題であるダイバータの中性子環境熱負荷試験も可能



\*文部科学省第22回核融合科学技術委員会(2020/10/30)説明資料より

# 独自性，優位性

- ❁ 大阪大学レーザー科学研究所と連携研究を実施する。
  - kJ 級ナノ秒レーザーである激光XII 号と超高強度ピコ秒級レーザーであるLFEX を同時照射可能である。
- ❁ ハイパワーレーザーが創り出す実験系では線源からの距離によって，強力な極限環境から自然環境までの幅広いレンジの実験環境を再現可能である。
- ❁ 核融合分野においては，核融合燃焼物理学の確立および現実的な核融合炉工学の端緒になる。
  - 長期的には，核融合燃焼を理解する物理研究から燃焼を制御する工学研究までの一貫した学術体系が構築できる。
- 核融合プラズマだけではなく宇宙プラズマ中における高エネルギー粒子が拓く物理学への発展が期待できる。