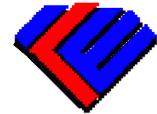


レーザー核融合分野の研究活動状況と展望



大阪大学レーザーエネルギー学研究センター長 三間 圀興

核融合研究作業部会タスクフォースヒアリング資料
平成18年8月21日



- **研究機関の沿革と活動実績**
- **レーザー核融合の位置づけ**
- **観点と指標**

高速点火レーザー核融合の重点化後の研究の進展

共同利用・共同研究の強化

重点化後の人材育成

国際的視点からの寄与

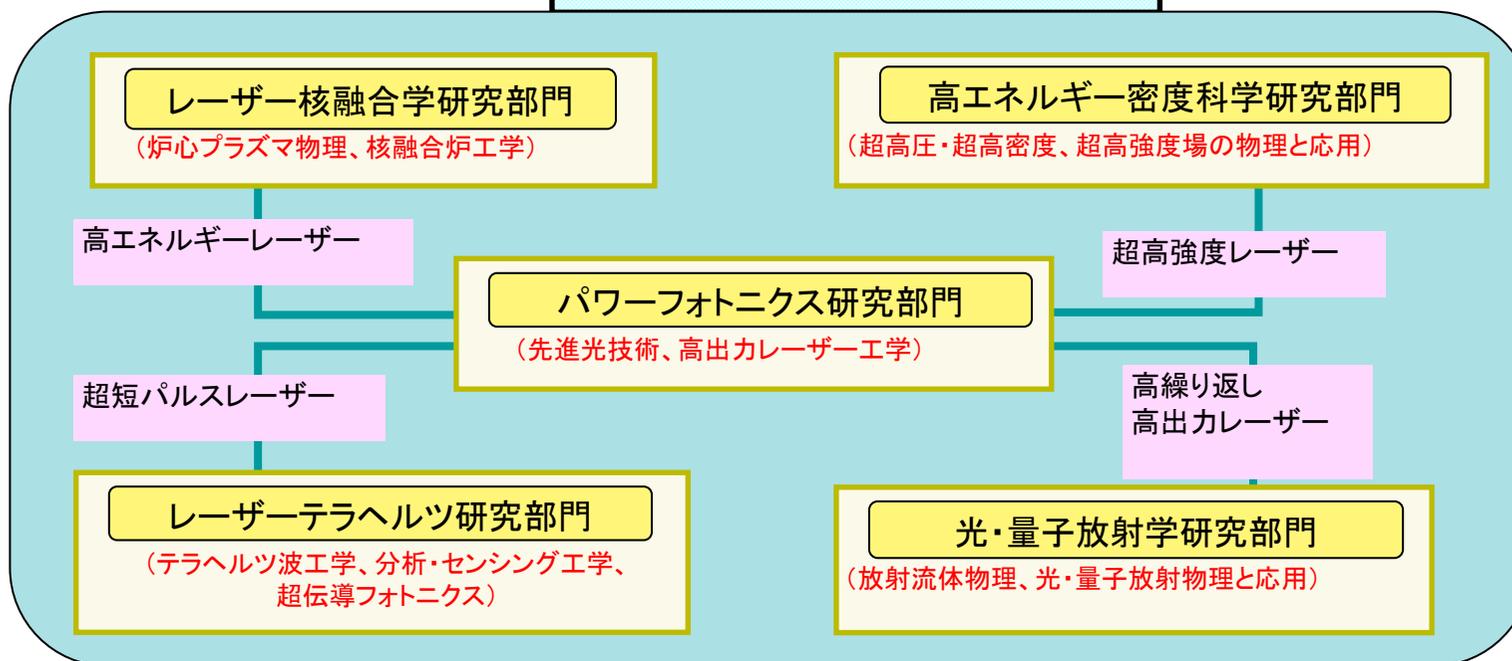
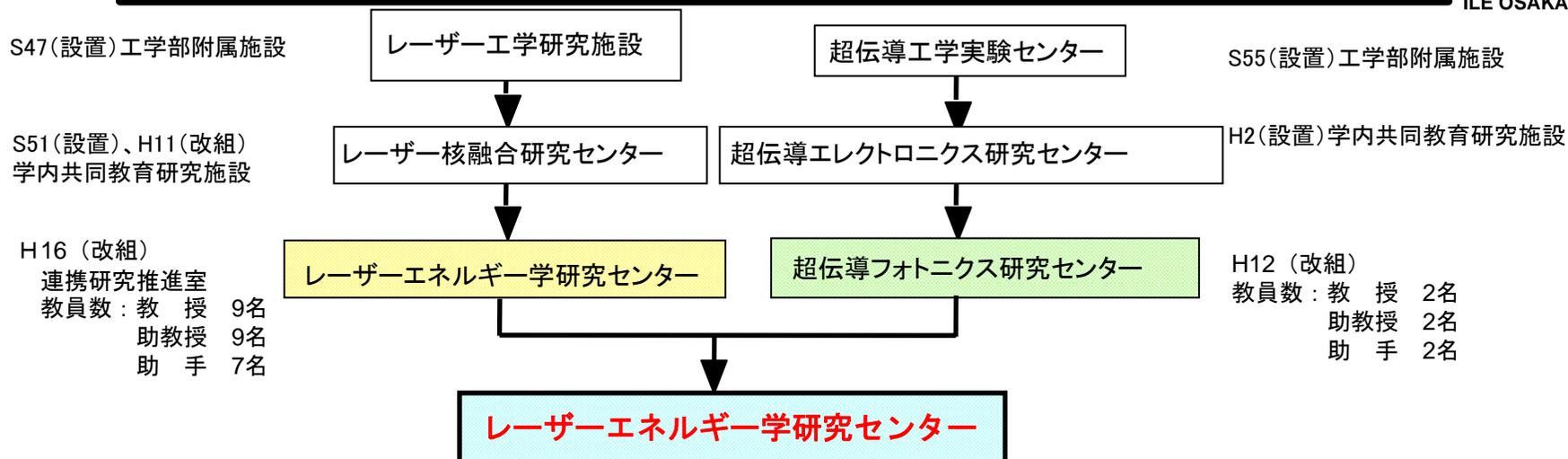
社会的視点からの寄与

研究センターの沿革と活動の背景

レーザーエネルギー学研究センターの組織構成



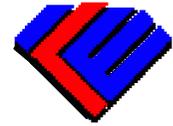
ILE OSAKA



構成員：

教授	11名
助教授	11名
助手	9名
兼任教員	5名
外国人客員	2名
招聘研究員	4名
特任研究員	24名
技術職員	11名
技術補佐員	5名
外部委託	30名
民間共同研究員	19名

レーザー核融合研究拠点としての実績

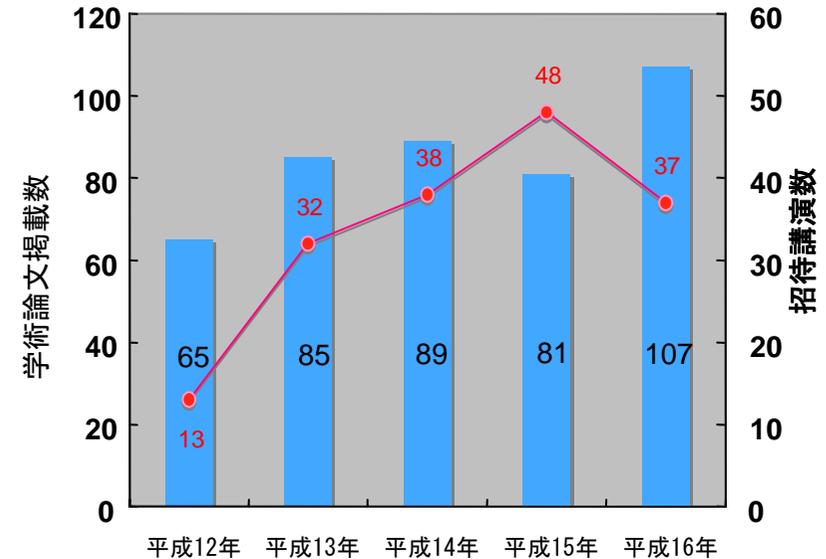


ILE OSAKA

過去五年間の研究実績

論文数	427 編
論文被引用数 (過去5年間に限る)	1260 件
招待講演件数	168 件
特許出願	60 件
特許取得	5 件
科学研究費採択数(金額)	86 件(5.05億円)
外部資金受入数(金額) (科研費を除く)	110 件(23.8億円)
外国人研究者招聘	588 名
国際シンポジウム主催	20 件
受賞	7 件

研究成果発表の推移



新聞等掲載件数(トピックス)

H12年	1 件(核融合研究の現状)
H13年	11 件(高速点火実証、等)
H14年	12 件(PWレーザー建設、等)
H15年	8 件(EUV光源開発、等)
H16年	11 件(レーザー電子加速、等)

レーザー核融合の我が国の核融合研究 における位置づけ



- 核融合エネルギー開発上の意義

- 磁場核融合と異なる原理に基づく →
磁場の万が一の困難が隘路にならない。
- 電力需要に対応できるコンパクトな炉が可能
- 比較的小規模の開発。

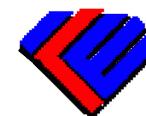
この3点から、レーザー核融合は、わが国の研究開発の重要なオプションとなる。

- 学術的・技術的意義

惑星、恒星の中心に匹敵する高密度、高温、
高強度電磁場の発生

→基礎学術、産業応用を核融合と同時にすすめる

外部提案者によるレーザー核融合関連共同研究の 重点化後の増加



ILE OSAKA

レーザー核融合関連の共同研究は双方向型共同研究が開始される等、平成15年度以降増加した。さらに、全国共同利用施設化に伴い平成18年度からは、新たに14件の激光XII共同利用実験が開始され、共同研究件数は重点化前の1.8倍になった。

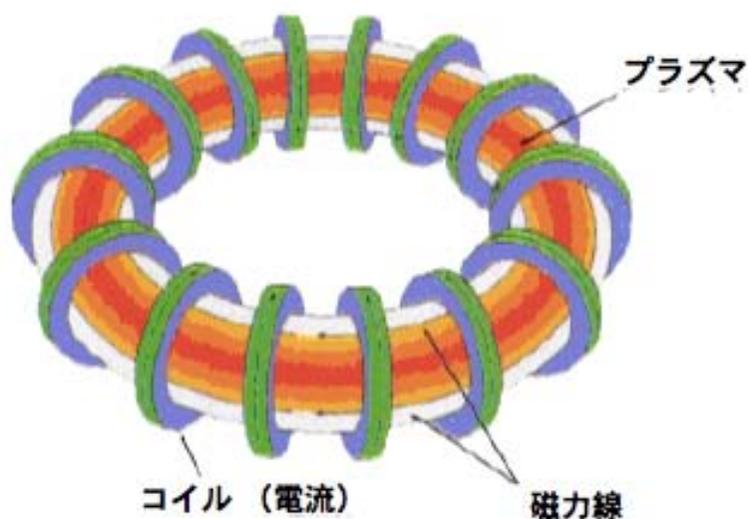
テーマ	提案者	期間	成果
衝撃点火	S. Obsenschain (NRL/米国)	H17.6, H18.5	650km/sの高速流体
X線源の開発	K. Fournier (LLNL/米国)	H18.3	プラズマ計測高効率X線源の開発
高圧物性	入船徹男 (愛媛大)	H17.5 H18.5	超高圧状態の音速計測
状態方程式	近藤建一 (東工大)	H17.5	Ta等の高圧状態方程式
実験宇宙	N.C. Woolsey (U York)	H17.6, H18.2	超高速爆風波の生成
レーザー加速	三浦永佑 (産総研)	H17.11	単色電子ビームの発生
クライオターゲット	三戸利行, 他(NIFS)	H15.4~	高速点火用重水素重点技術
高速点火統合コード	坂上仁志(NIFS)	H15.4~	高速点火統合コードの開発
高速点火診断技術	磯部光孝(NIFS)	H16.9~	ダイヤモンド検出器の応用
高速点火加熱実験	北川米喜 (光創成大)	H.16.12~	キャピラリー電子加速
コーンターゲット実験	P.Norreys (RAL/英国)	H.16.12~	相対論電子の伝搬機構
陽子ビーム加熱	M.Key (LLNL/米国)	H.15.12~	陽子ビームの収束と加熱
他			

核融合の2つの方式



ILE OSAKA

磁場閉じこめ核融合



固体密度の10億分の1

直径10m

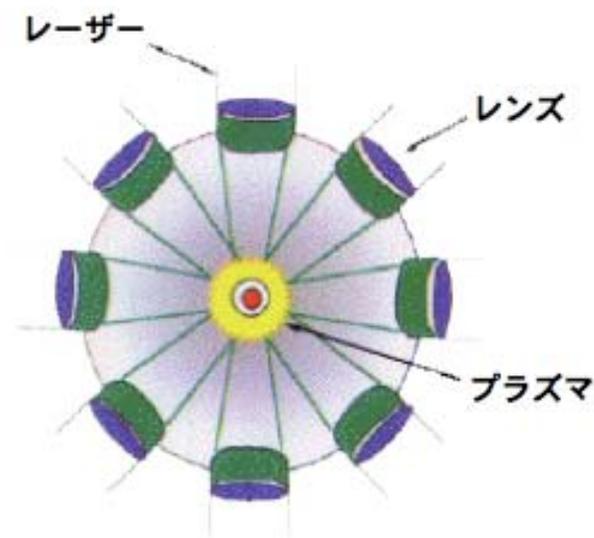
定常炉

原子力機構, 核融合研,

筑波大, 東大, 京大, 九大

科学研究のゴール=定常燃焼の実証

慣性閉じこめ(レーザー)核融合



固体密度の1000倍

直径5mm(初期)

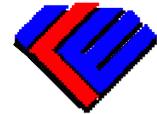
パルス炉

阪大

科学研究のゴール=1パルスの実証

観点1；高速点火レーザー核融合の重点化後の研究の進展

レーザー核融合の2つの点火方式

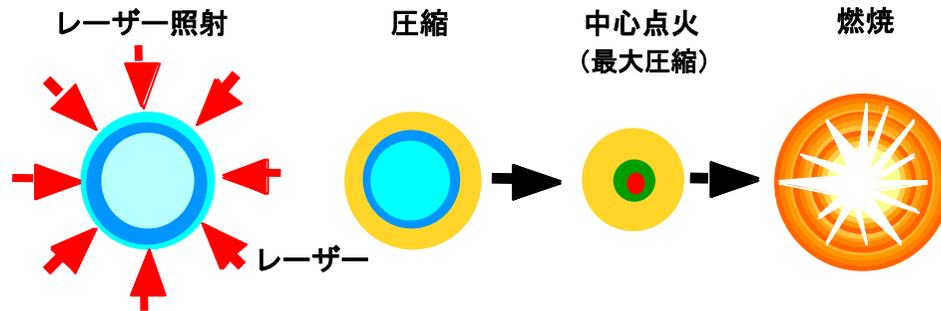


ILE OSAKA

高速点火は小さなレーザーエネルギーで大きな核融合利得が得られる

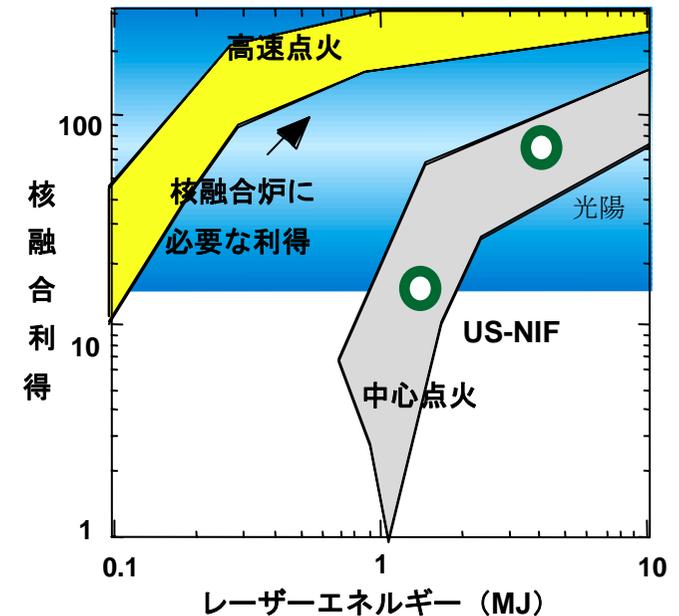
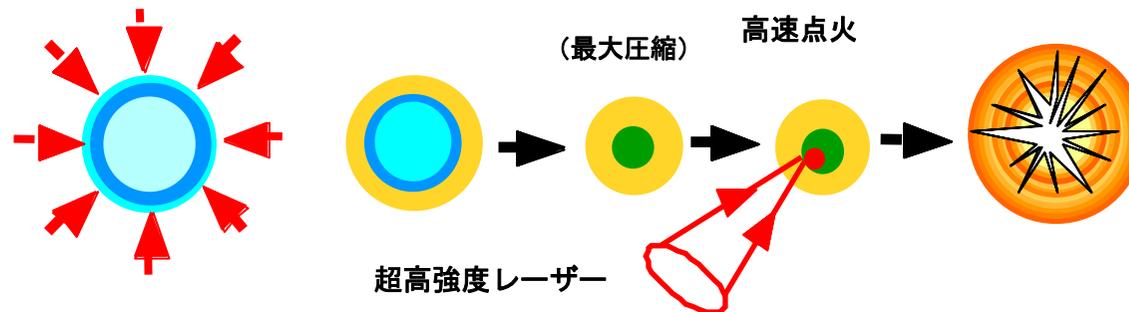
中心点火（従来方式）

燃料ペレットに多数の強力なレーザーを照射して、表面に発生するプラズマの圧力で超高密度に圧縮（爆縮）、中心に出来る高温プラズマで核融合反応を点火、燃焼させる。



高速点火（新方式）

圧縮された燃料に、超高強度レーザーを照射して点火、燃焼させる。中心点火よりも小さなレーザーで高い核融合利得が得られる。

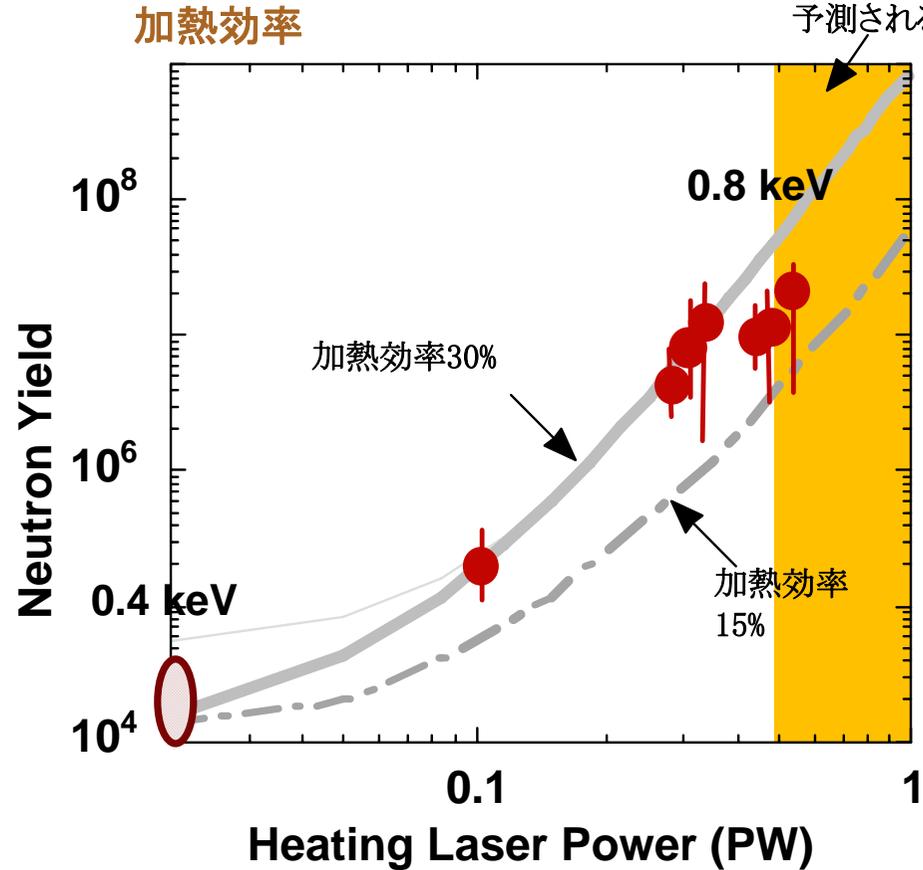
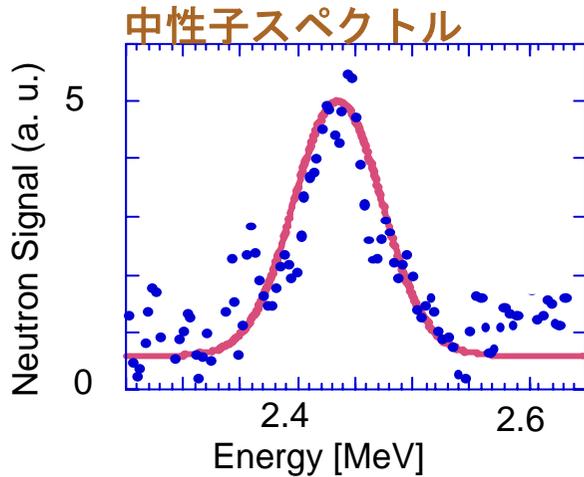
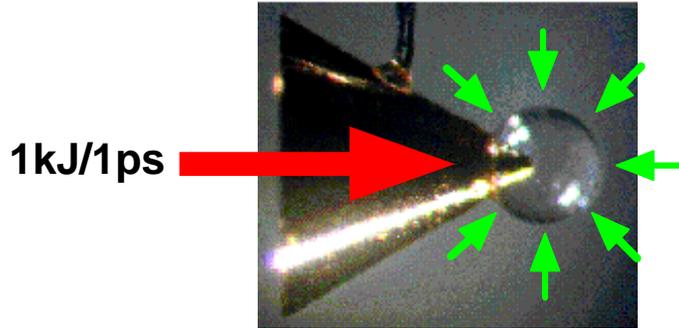


観点1 指標1 ; 高速点火実証計画FIREXの進展 高効率 (20-30%) の加熱が実証された。



ILE OSAKA
点火に必要なと
予測されるパワー

爆縮 + 加熱



FIREX第1期：次のステップは 10kJ/10ps レーザーにより
5千万度-10 億度の点火温度へ加熱することである

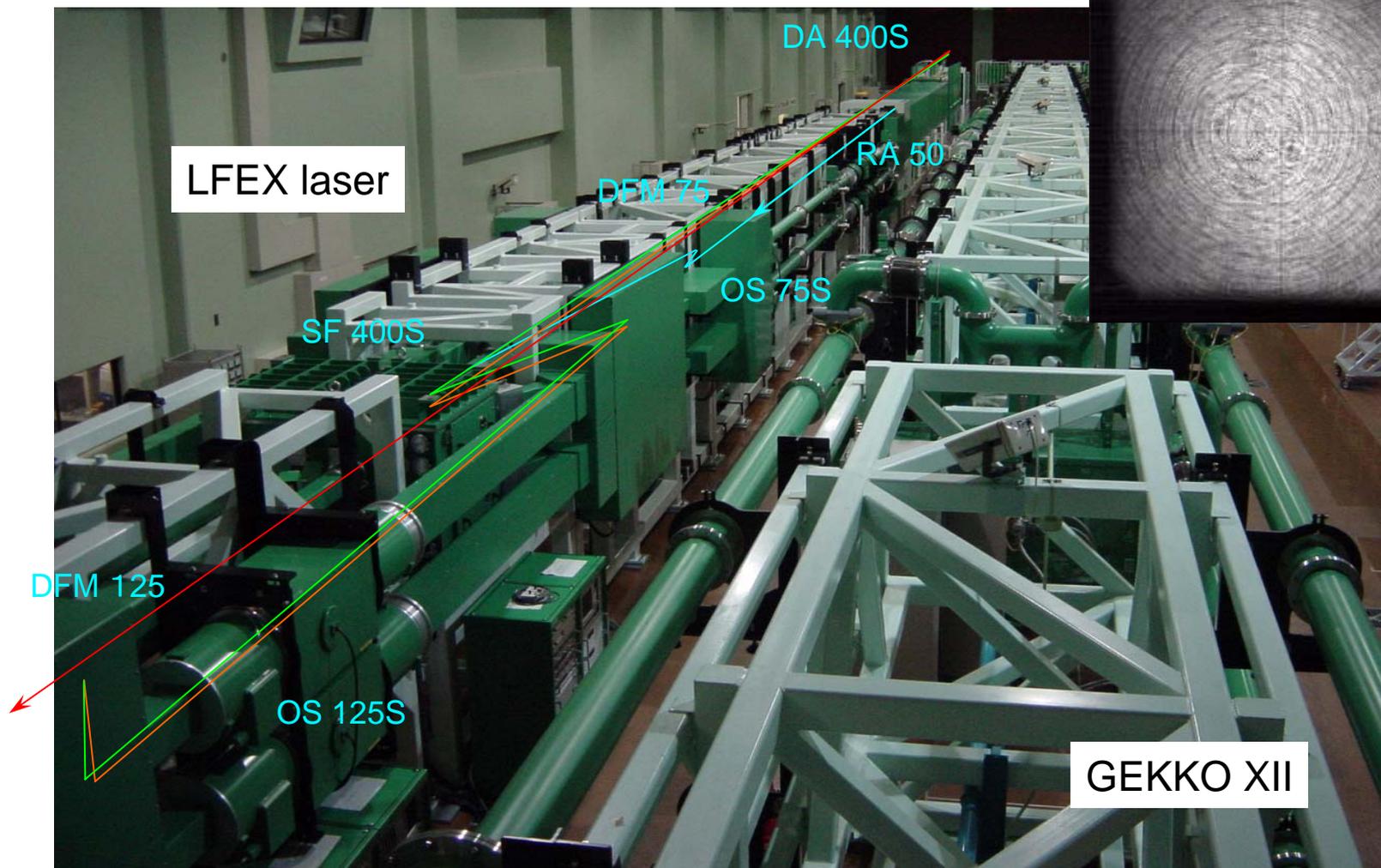
4-ビームの加熱レーザーLFEXが既設の爆縮レーザー激光XII号の横に建設された。1ビームは立ち上げを終え実験に供した。



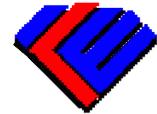
ILE OSAKA

- 05.5.17 1.2 kJ/1 beam
- 06.4.24 6.5 kJ/4 beam
- 06.5.19 3.6 kJ/1 beam (Full beam equivalent =14.4 kJ)

40 cm



最近の研究の進展；高速点火爆縮の重水素効果、 加熱物理；相対論電子輸送



従来の高速点火実験は燃料を模擬した重水素化プラスチック (CD) を使用していた。しかし、CDは放射損失のために点火温度に達しない→クライオ重水素ターゲットへの転換

- 爆縮

固体密度燃料のフェルミエネルギー：

17eV (CDT) → 5eV (DT)

先行加熱の影響を受けやすい；クライオターゲットで確

認

- 加熱

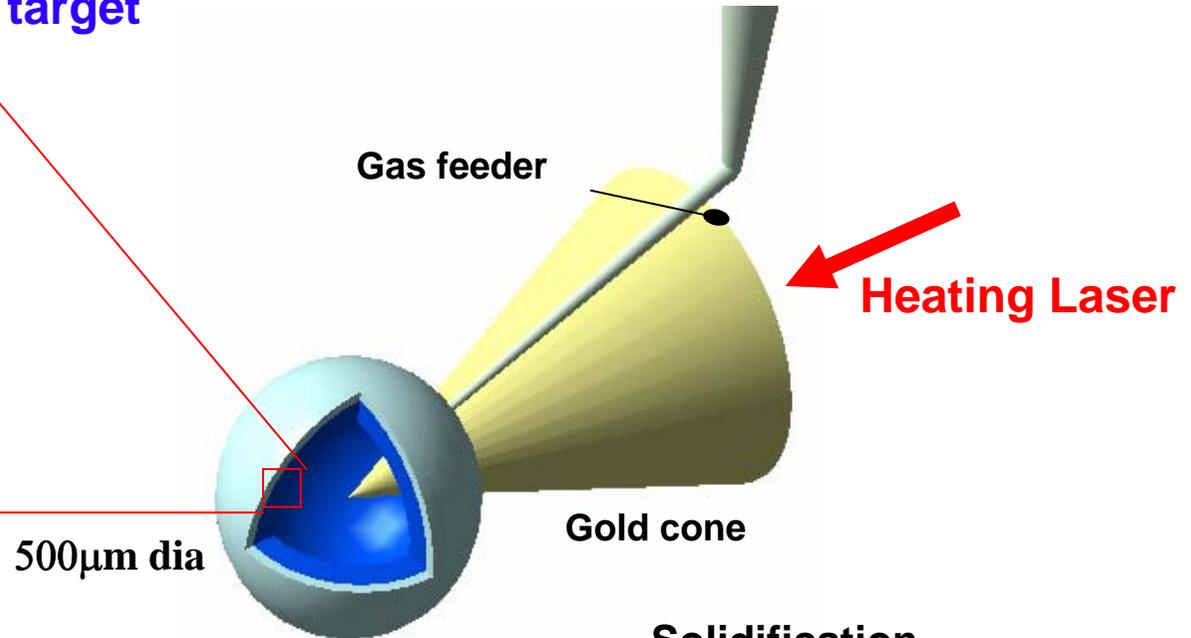
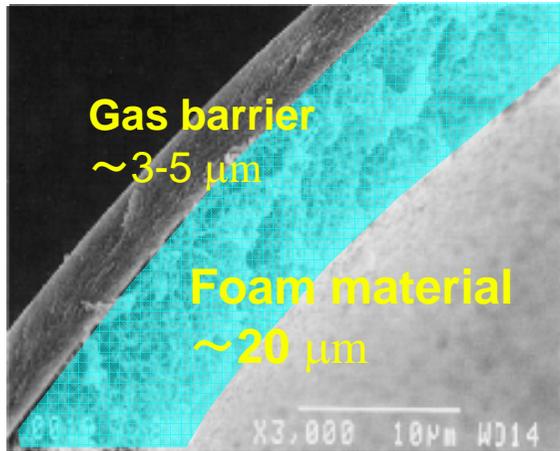
クライオターゲット中での相対論電子のエネルギー輸送の計測に成功。



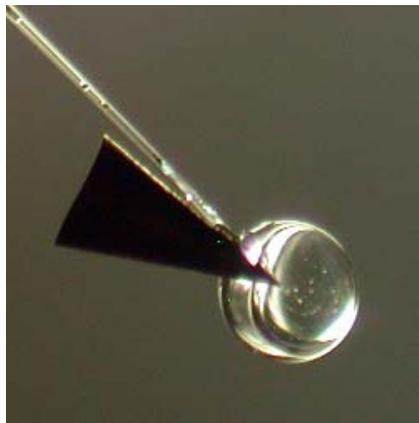
コーンフォームクライオ重水素ターゲットを核融合研と連携して開発中である。液化と固化を実

証

Foam cryogenic D₂ target



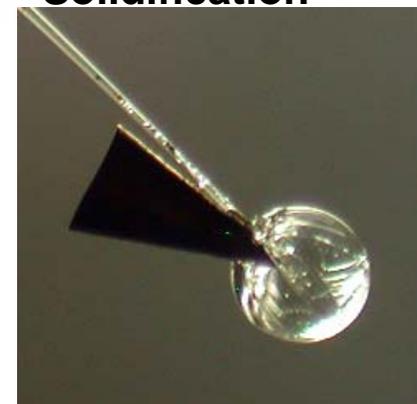
Liquefaction



@13.0 K, 7.96 kPa

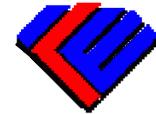


Solidification

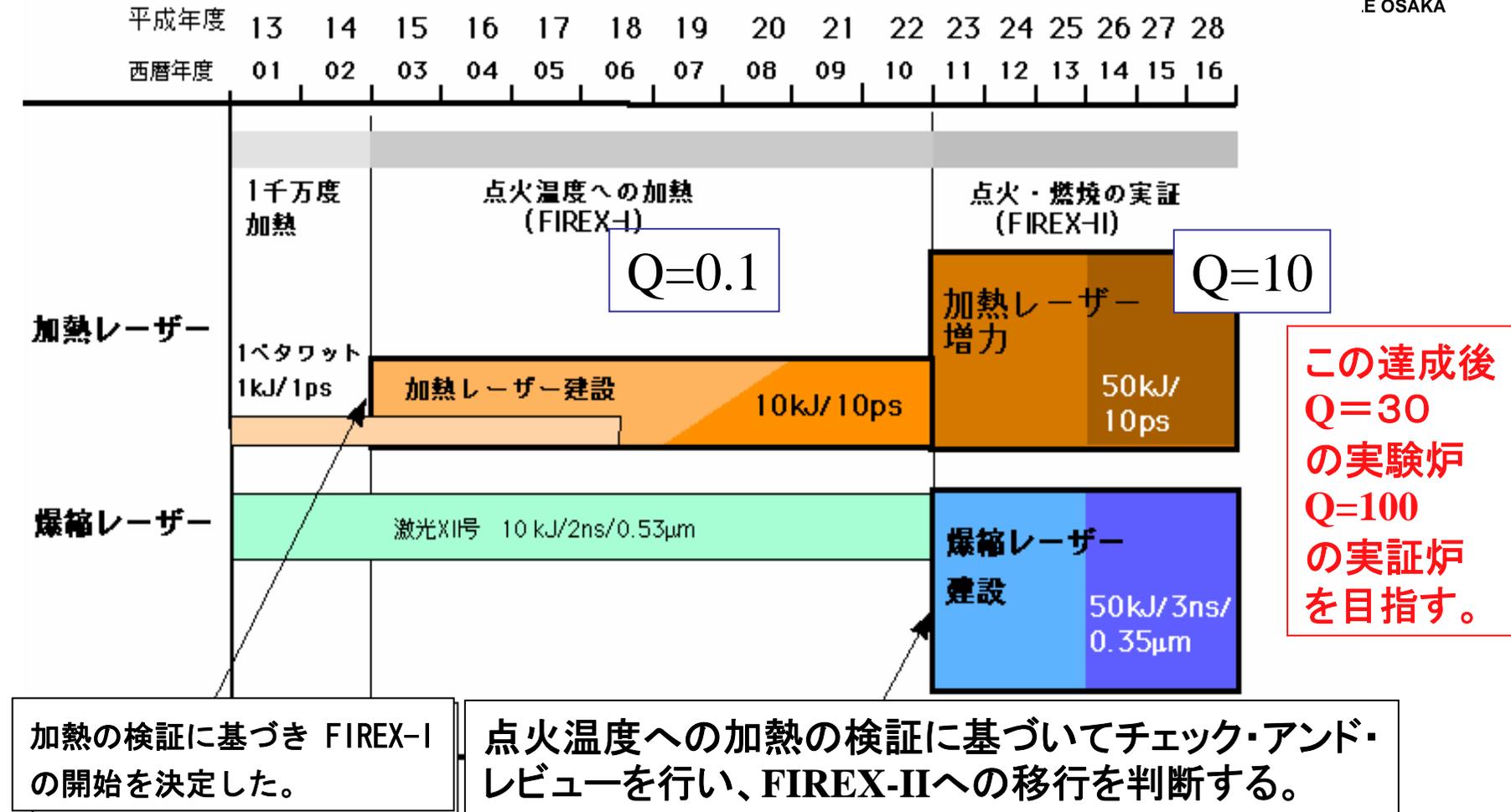


@12.7 K, 7.23 kPa

FIREX第2期計画の立ち上げにより、NIFと同時期に点火を実証できる可能性がある



OIT OSAKA



観点 2、指標 1 大学共同利用機関との連携の具体化



- ・ 連携研究及び双方向型共同研究では、核融合科学研究所、大阪大学、及びその他の大学等が連携し、激光XII号レーザーやペタワットレーザーを利用して共同研究を進め、高速点火の原理実証となる研究計画「FIREX-I」の実験を成功に導くことが目的。

連携の枠組み

- 核融合研レーザー連携研究部門（8名、内2名レーザー研からの客員）
核融合科学研—阪大レーザー研意見交換会
所長—センター長を入れた執行部レベルでの連携協議を年1-2回

具体的連携内容

- クライオ重水素ターゲットの開発
- 高速点火統合シミュレーションコードの開発
- クライオ重水素ターゲットの高速点火統合実験への参加

双方向型共同研究

- 双方向型共同研究によるレーザー核融合研究の推進
FIREX先導研究2件，計測器開発3件，炉設計9件（平成18年度）

指標 2 全国共同利用施設化に伴い、核融合共同研究はどのように強化されるか。



ILE ŌSANKA

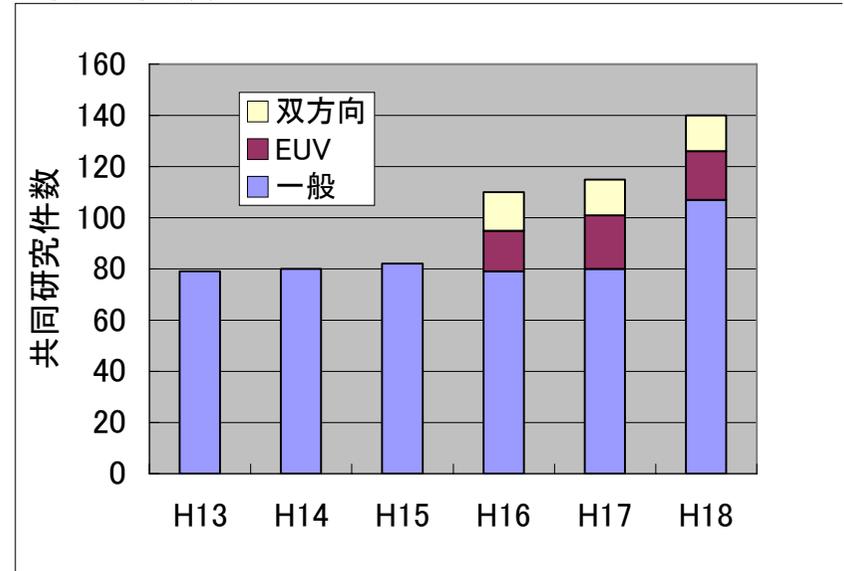
従来の共同研究の問題点: 激光XII等の大型レーザーを利用した、外部の研究者が代表者となる共同研究は、年2-3件の国際共同研究が主であった。

全共化の考え方: 激光XII号レーザーの全国共同利用への開放により形成される共同利用者コミュニティを、レーザー核融合研究の人材の登竜門として活用する。他方、核融合の基盤を利用して核融合の枠を越えた基礎学術、産業応用の展開を図る。国内からの研究を活性化するために、激光XII号ショット数を2交代制の採用により増加し、全ショットの半数までを外部の研究者に開放。

応募の内訳:

大型レーザーに関連した共同研究
大規模レーザー実験(A-1区分): 15件
(うち国外申請 2件)

グループ形成(A-2区分): 4件
⇒直接的に核融合研究に関わるものは約5割
他の5割も核融合研究の基盤となる研究。



重点化後の人材育成



ILE OSAKA

- 全国共同利用施設化を行い、レーザーの実験グループの育成を開始し、双方向型共同研究及びレーザー連携により核融合科学研究所及び大学との研究協力を推進。
- 15年度より18年6月までに計7名（教授1名、助教授4名、助手2名）の教員を公募
- 平成15年度より17年度の間、米国、英国、フランス、中国等と55件の国際共同研究を実施。内11件はレーザー実験。
- 「高出力レーザーによる単色量子ビームの生成と応用」に関する連携融合事業を日本原子力研究開発機構と18年度より開始して研究交流を進めている。また、国立天文台との連携研究を19年度より開始予定
- 若手特任研究員や大学院生に国内外における発表の機会を与え、国際的に活躍できる人材の育成を図っている。

特任研究員、博士後期課程 55名（平成18年7月現在）

- 当センターで研究する優れた若手研究者に対し賞を設け、成果を讃えるとともに、一層の研究の奨励を図っている。

観点 4 ; 国際的視点からの寄与

観点4-指標1

指標 1 海外の装置と比較しての独自性, 補完性 : NIF・LMJとわが国のFIREXとの比較



ILE OSAKA



2009 NIF 1.8 MJ blue in US



2007 FIREX-I laser
10kJ PW + 10kJ green
FIREX-II: 50kJ + 50kJ

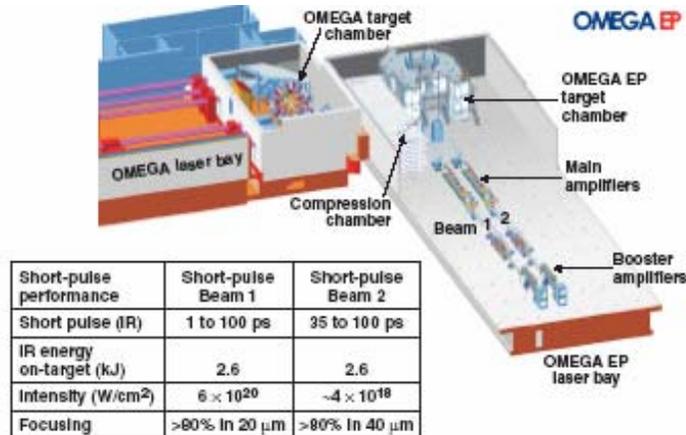
- | | |
|-----|---|
| 独自性 | <ul style="list-style-type: none">・コンパクトな点火方式の提案・世界初の統合的な高速点火研究を展開 |
| 補完性 | <ul style="list-style-type: none">・中心点火と高速点火の, 炉心プラズマとしての優劣を明らかにする. |

指標 2 世界的規模での研究の進展に対する寄与 — 諸外国の急速な立ち上げの引き金に —



ILE OSAKA

米 Rochester: OMEGA-EP



OMEGA 30kJ blue
+OMEGA-EP 5.2kJ PW(2007)

仏 CEA Bordeaux: PETAL



LIL 60kJ blue (2006)
+PETAL 4kJ PW (2009)

- 米国政府・議会 (2006)
- 超高強度レーザー科学 (高速点火) でのリーダーシップを握れ
→ OMEGA-EPの予算化

FIREX-I及びこれらの超高強度レーザー装置は、今後5年間の高速点火実証装置の設計の基盤となる。

観点5；社会的視点からの寄与 レーザー核融合研究が拓く先進科学技術



ILE OSAKA

高出力レーザーの技術開発をリードし、高出力レーザーの応用分野を開拓した。

- モードロック、CPA等のレーザー技術開発と、高耐力レーザーコンポーネントに開発により、従来のメガワット領域から、ペタワット領域へレーザーの可能性を飛躍的に高めた。

超高強度場→レーザー粒子加速、PET、重イオン癌治療

レーザーアブレーション(レーザー加工)、レーザー溶接、光学結晶

- 高速診断制御技術

ストリークカメラや超高強フレーミングカメラ等の開発により、ナノ秒、ピコ秒、フェムト秒へ超高速を学問・産業に導入する役割を果たす。

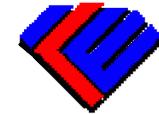
- レーザープラズマ物理

高密度プラズマを利用した高出力放射線源により学術・産業・医療における新領域を開拓する。

レーザー宇宙物理、高エネルギー粒子発生等、

観点5；学術への貢献

高出力レーザーに支えられた高エネルギー密度状態の科学



ILE OSAKA



球対称照射システム



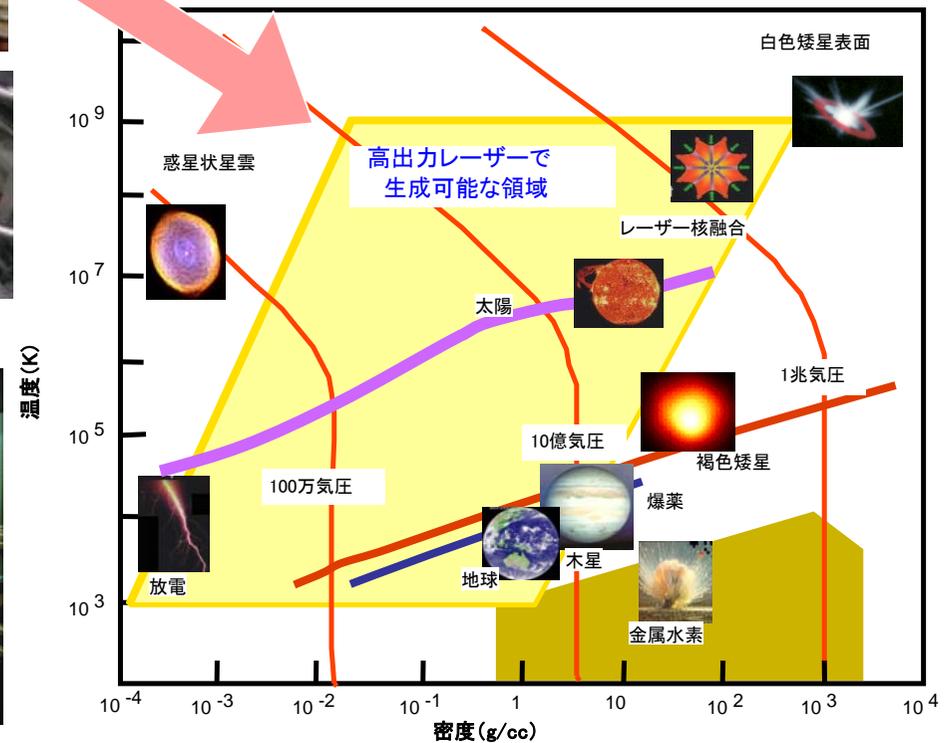
一方向照射システム

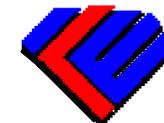


レーザーXII号 : 12ビーム、20kJ/1ns (波長1 μm)、
15kJ/1ns (0.5 μm)
10kJ/1ns (0.35 μm)

ペタワットレーザー: 1ビーム、2kJ/3ns、500J/500fs

レーザーMII号 : 2ビーム、0.5kJ/3ns、70J/300fs





産業界への貢献：レーザープラズマEUV光源の開発

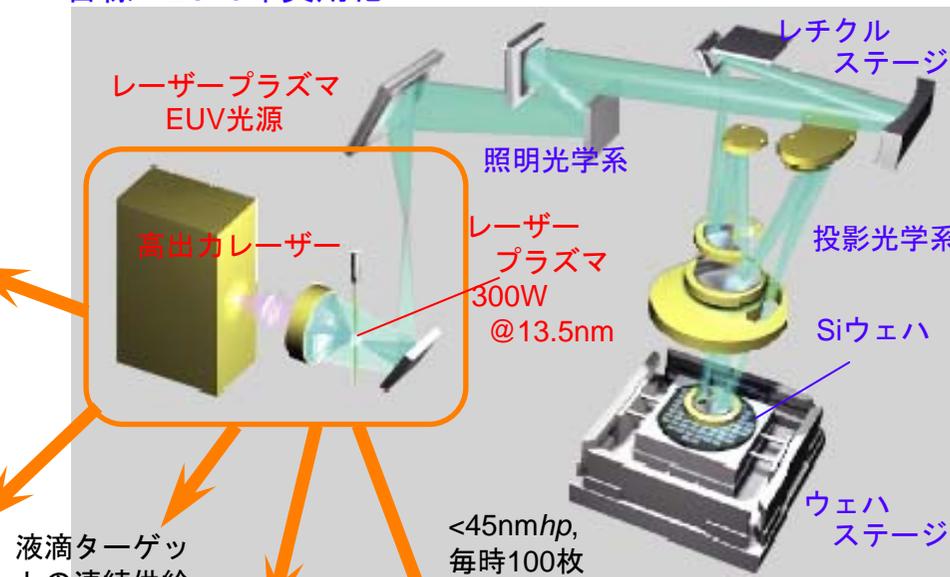
LD励起 5kW, 5kHz 高平均出力レーザー



EUV発生実験共同利用設備



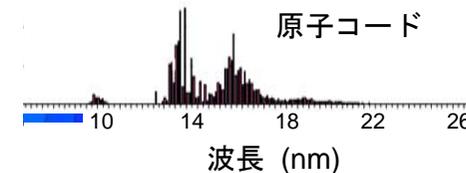
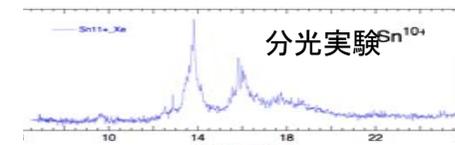
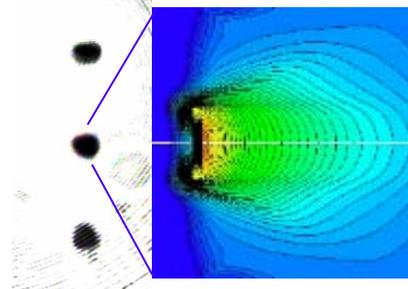
目標：2010年実用化



液滴ターゲットの連続供給

2D放射流体コード

原子物理：EUV放射スペクトル



文部科学省
リーディング・プロジェクト
11大学、3研究機関
光源基盤物理・技術開発

産業界と強力に連携

経済産業省
NEDOプロジェクト
技術研究組合EUVA
装置化・システム化技術



レーザー核融合研究の資源（ハード・ソフト）を活用

- ・レーザー
- ・ターゲット技術
- ・プラズマ診断
- ・理論・シミュレーション

まとめ：
重点化後，高速点火の研究は急速に発展した。



ILE OSAKA

- 高密度圧縮と加熱の実証に基づき，FIREX第I期計画を開始した。レーザー増幅部の1ビーム完成，パルス圧縮器のインフラ完成，平成19年度（2007）上半期に加熱実験を開始予定。
- 核融合科学研究所との連携により，クライオ重水素ターゲット，計測器，統合シミュレーションコードの開発が格段に進展。一方，核融合の枠を超えた基礎学術・産業応用の展開により，FIREX-第II期計画実施の基盤ができつつある。
- 約100名の学生が，世界第一線の研究に参加し，国内外での発表の機会を持ち，海外でポジションを得るなどして，国際的に活躍している。