



# 核融合研究の紹介と レーザーの高性能化に向けた期待

自然科学研究機構

核融合科学研究所

安原亮



## 本日の話題

- ① 核融合について、核融合科学研究所について
- ② 高度計測が開く新たな核融合研究
- ③ レーザーの高度化による高性能化
- ① まとめ

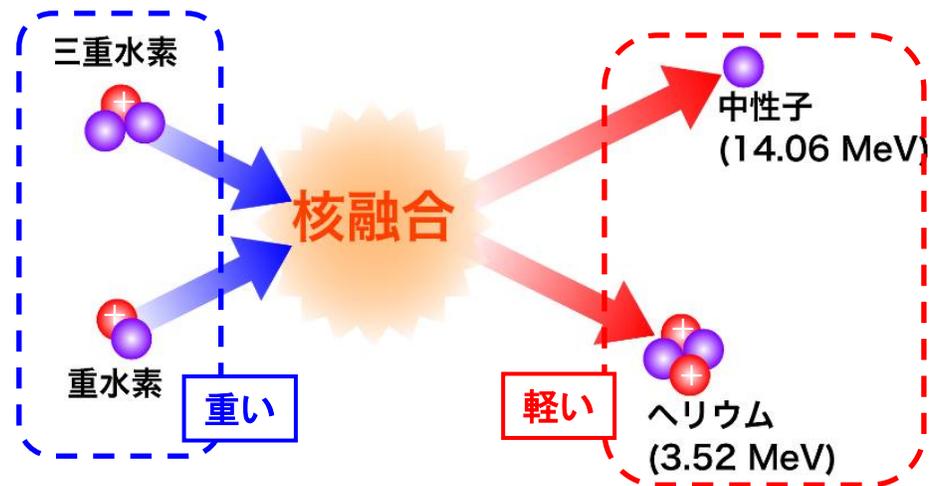
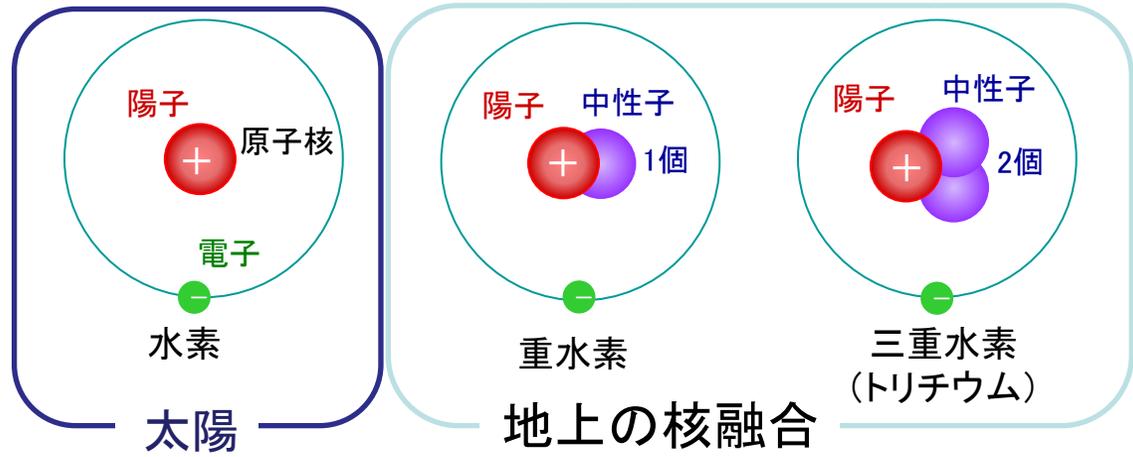
# ①核融合について

# 化石燃料に代わる新たなエネルギー源として、核融合エネルギーが期待されている

空に輝く太陽や星のエネルギー源は核融合



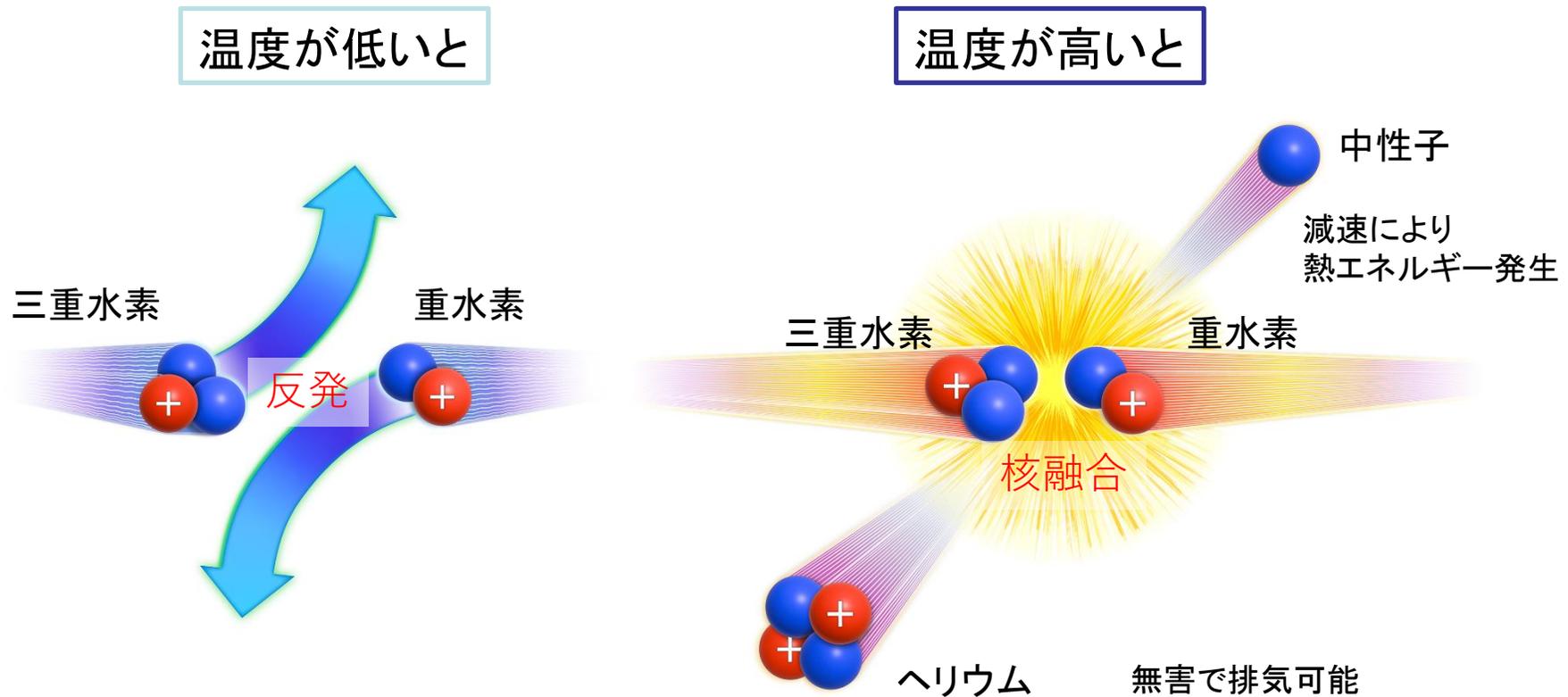
●核融合では軽い原子、水素の仲間を使います。ウランは使いません。



2つの原子核が合体して別の原子核を作った時に、出来た原子核の重さが軽いとエネルギーが発生します。

## 核融合エネルギーの特長

- 海水から原料がとれます
  - ◆ 燃料資源が無尽蔵
- 二酸化炭素を排出しません
  - ◆ 地球温暖化を防止します
- 安全性が高い
  - ◆ 暴走や爆発はしません



## 核融合に必要な条件(磁場閉じ込めプラズマの場合)

- 温度 **1億 2,000万度** (空気の25万分の1の密度)
- 水素粒子の密度 **1cm<sup>3</sup>当たり100兆個以上**
- 閉じ込め時間 **1秒** (エネルギーの逃げにくさを表す指標)





# 様々なプラズマ 星空の光はほとんどがプラズマによるもの

オーロラ 1千度



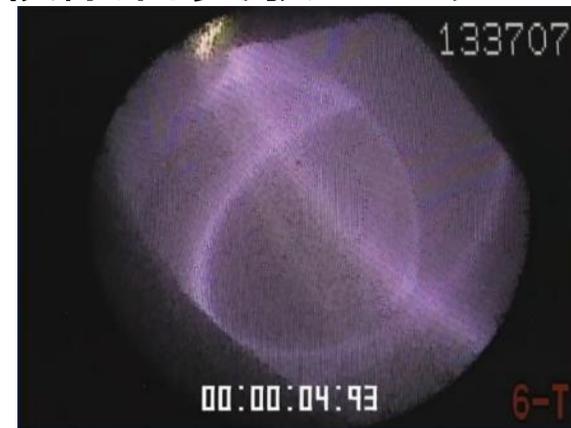
蛍光灯 1万度



炎 1千度



核融合実験のプラズマ 1億度





# 高温のプラズマをどのように閉じ込めるか？ ～ドーナツ状の磁力線「かご」でプラズマを閉じ込め～

プラズマが壁に当たると消える、壁が溶ける

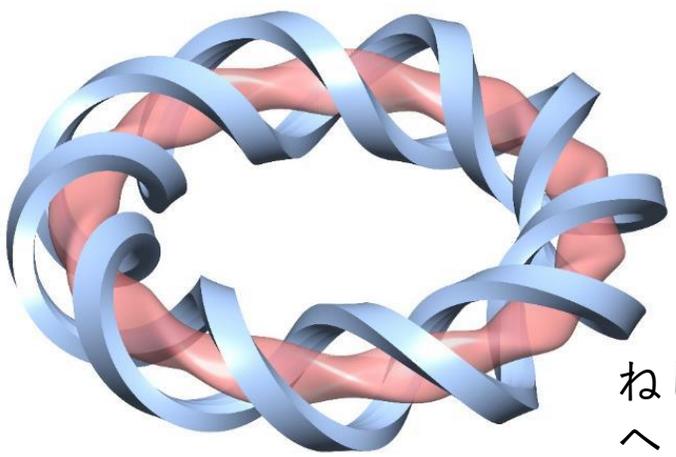


磁力線に巻き付く性質を利用する

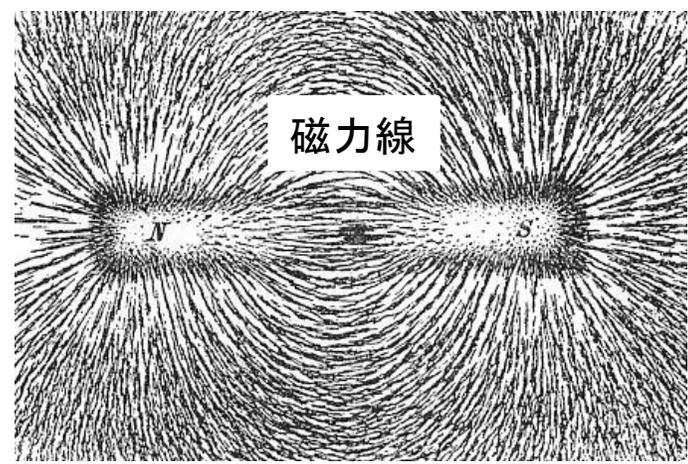
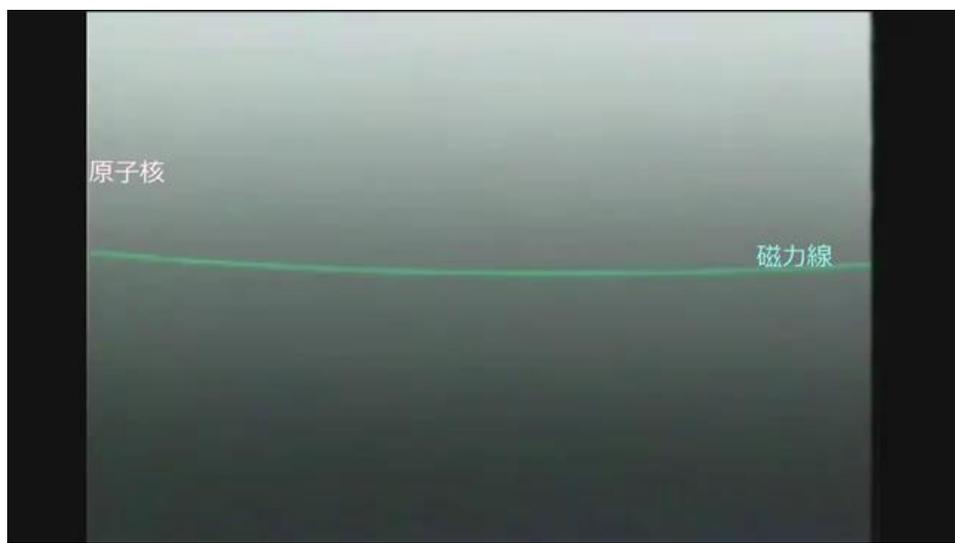
詳しくは  
**動画**で。



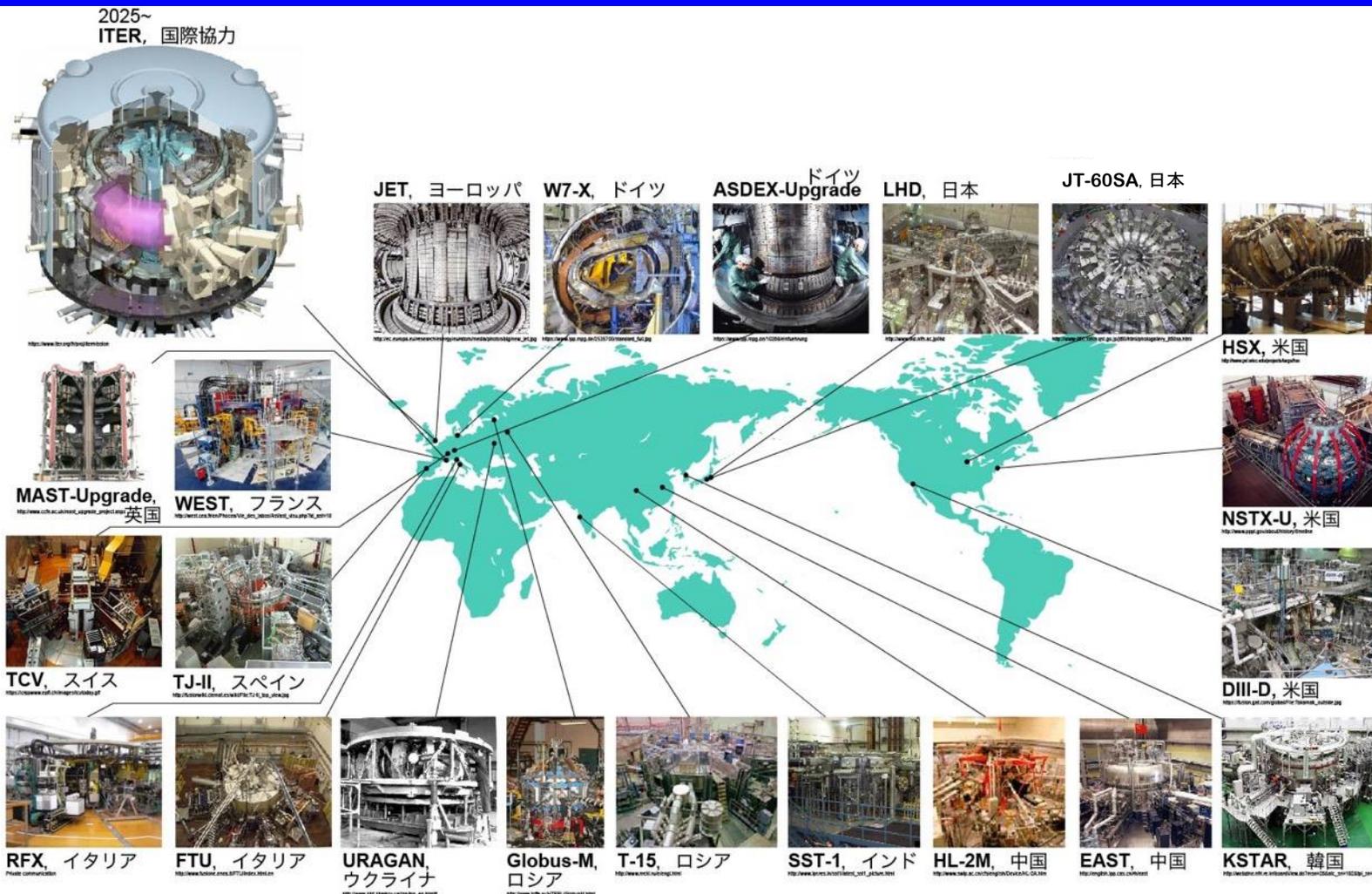
ねじれたドーナツ型の磁力線かご



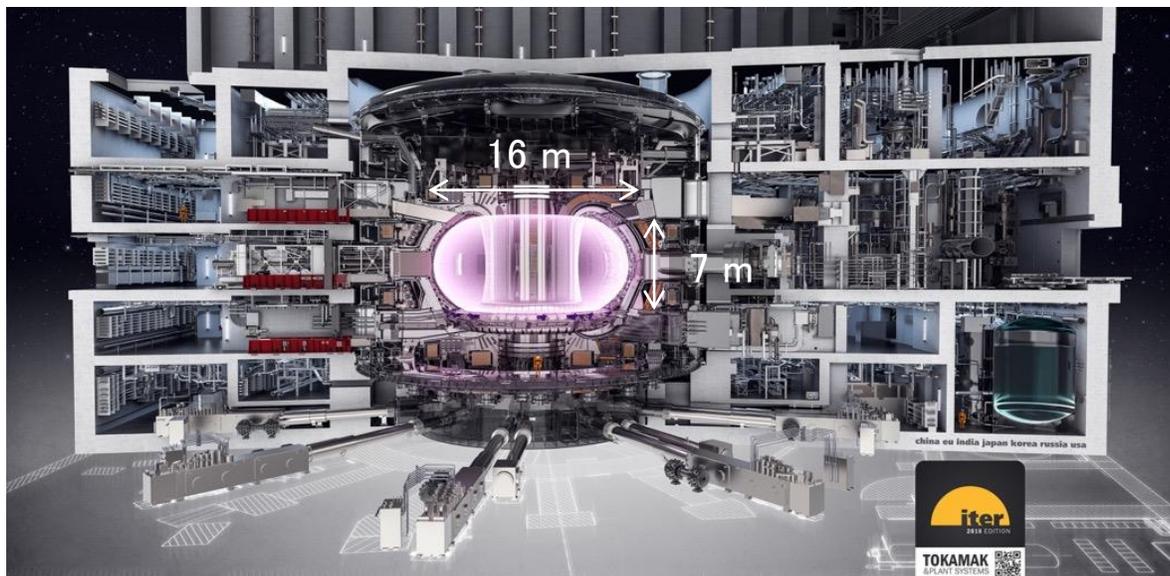
ねじれたコイル  
ヘリカルコイル



核融合は将来のエネルギー源として様々な国において研究開発が進められています。最近ではスタートアップ、ベンチャー等民間セクターでの開発も活発化



# 国際協力でITER（イーター）を建設中



35ヶ国が共同で建設  
現在77%完成

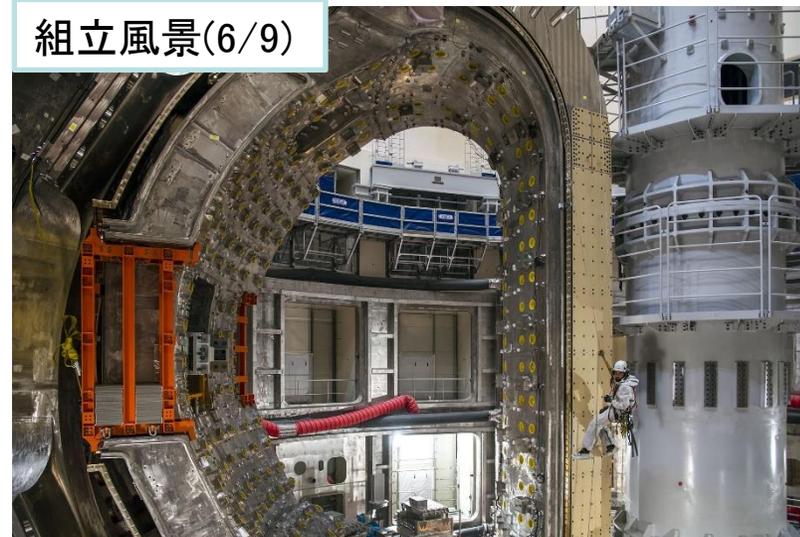
2025年  
運転開始

2035年  
実燃料での運転開始  
エネルギー発生：  
50万キロワット

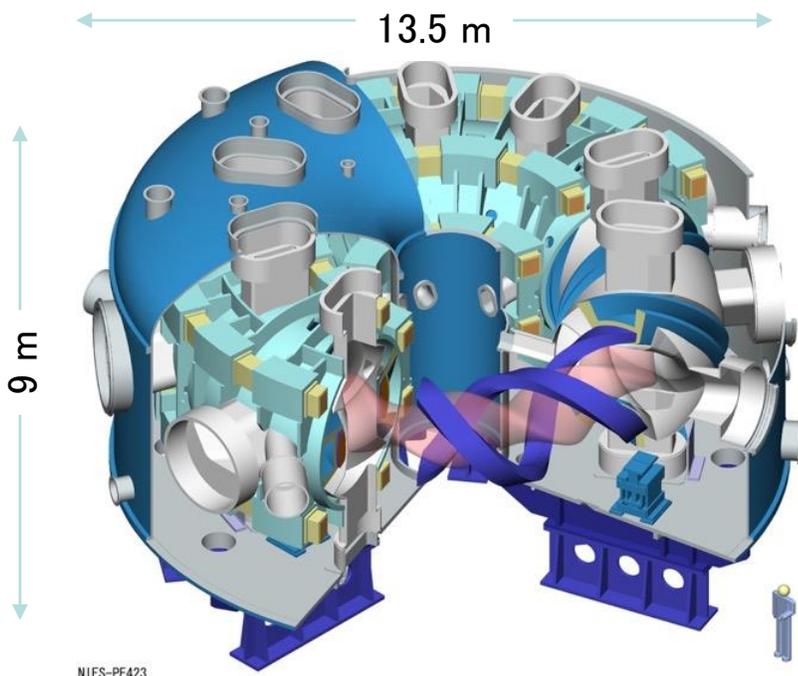
建設サイトの風景 (4/14)



組立風景(6/9)



## 大型ヘリカル装置 (LHD)

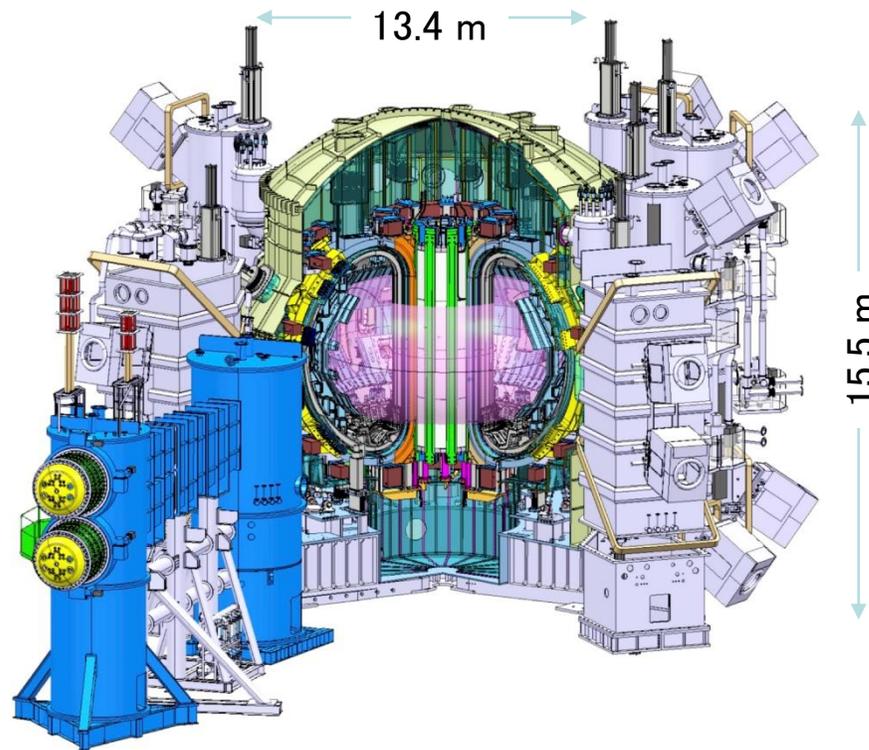


NIFS-PE423

核融合科学研究所 (岐阜県)  
ファーストプラズマ 1998年3月

ヘリカル方式

## JT-60SA



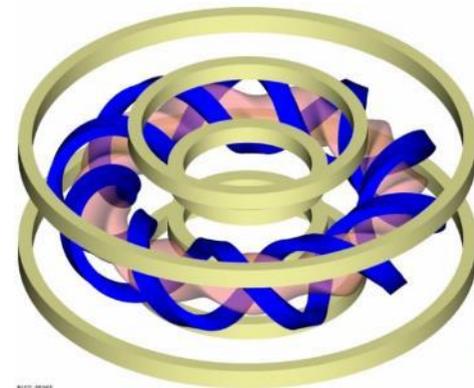
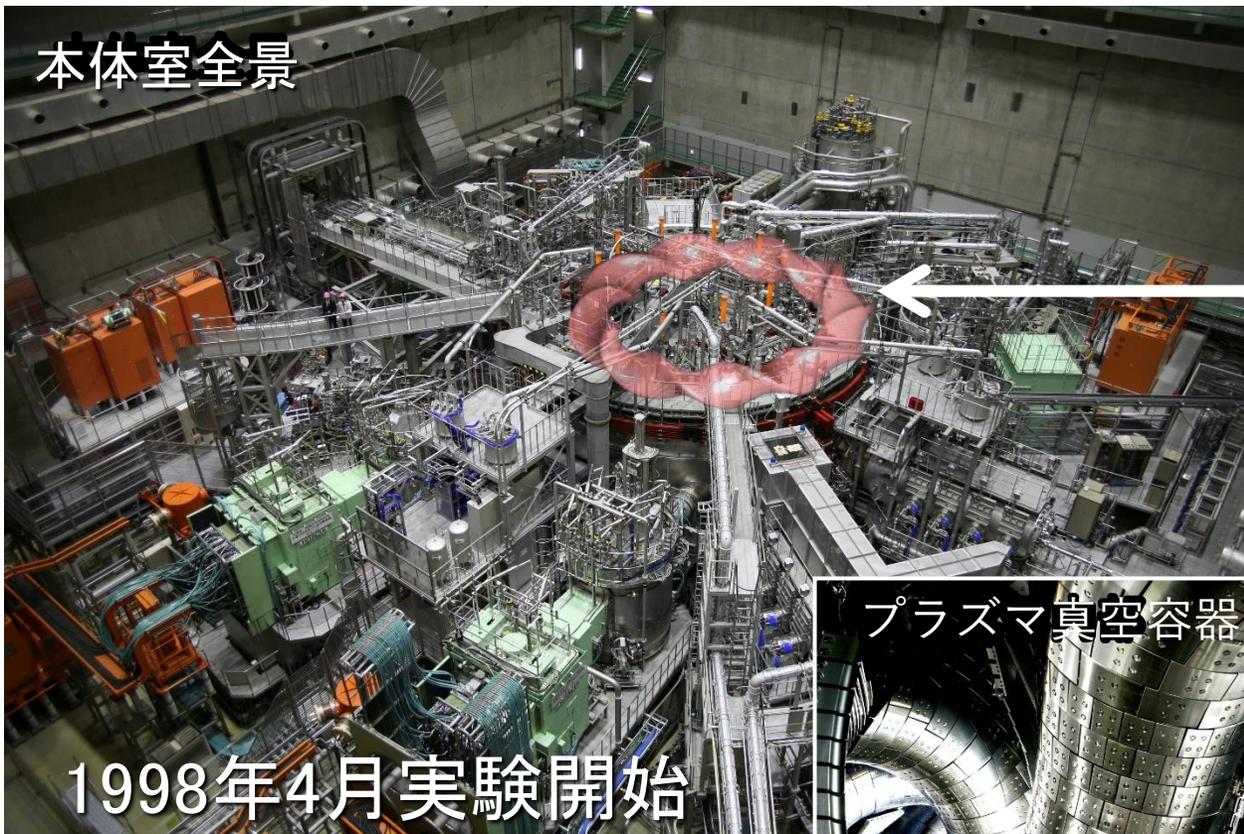
量子科学技術研究開発機構 (茨城県)  
まもなく稼働開始

トカマク方式



# 大型ヘリカル装置 LHD

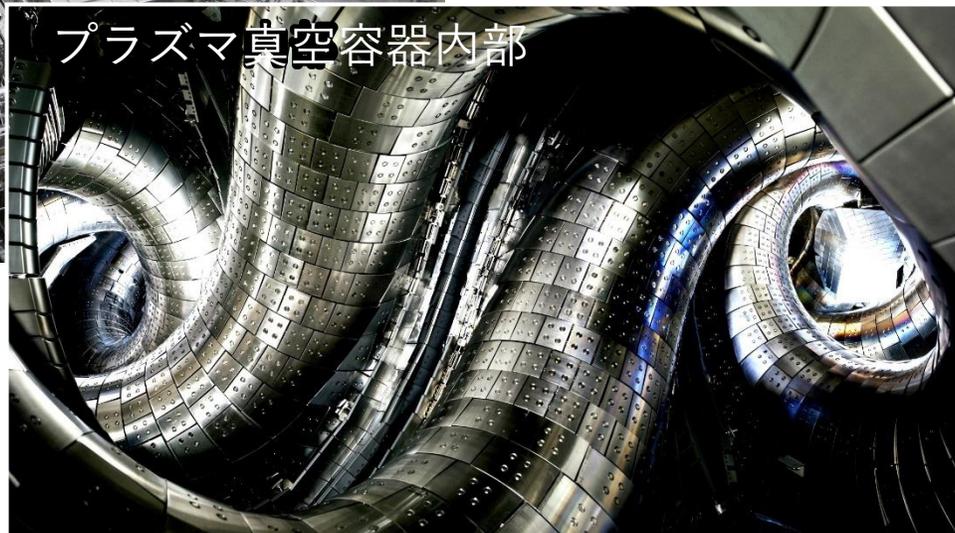
本体室全景



1998年4月実験開始

装置の直径 約 13 メートル  
装置の高さ 約 9 メートル  
装置の重さ 約 1,500 トン

プラズマ真空容器内部



## 欧米での核融合ベンチャー・スタートアップへの巨額投資

2021年以降(ほんの2年前から!!)、およそ**30億ドル(4470億円、1ドル=149円)**の投資が行われている[1]。



日本においても核融合スタートアップが資金調達を行っている。核融合の商業化はまだ先だが、すくなくとも研究フェーズでは経済圏が立ち上がりつつある。

[1]服部健一、J. Plasma Fusion Res. Vol.99, No.4 (2023) 127-134

## 5. 総括 [1]より引用

・VC投資の経済合理性・折り合い

本稿では、VCによる近年の欧米核融合ベンチャーへの巨額投資(数千億円)は経済的に妥当か、検討の考え方を紹介した。要は、逆算で考え、(1)数百兆円の巨大安定的な世界電力市場が見込まれ、(2)ゼロカーボンに貢献する新技術ベンチャーの上場には大きな経済価値がつき(数兆円)、(3)その上場経済価値を、リスクに見合った割引率でディスカウントして現在価値を評価し、(4)その現在価値が適切で(安く)、適切な(多くの)株式保有シェアを得られれば、投資に値する、というものである。リスク見合いの上昇価値が見込めるからである。

逆に今後は、数年後、実験炉の成果が出れば、バリュエーションを上げ、原型炉のための開発費を資金調達する(おそらく数千億円)。その結果、既存投資家の保有シェアは低下するが、それ以上に保有価値は増加し、原型炉開発もうまく進めば、バリュエーションはさらに上がり、2030年代に株式を上場し、投資家は株を売却しリターンを得る、というシナリオが期待される。勿論計画通りに行かず、損失に終わる場合もあり得る。

以上のように、研究から社会実業への相変化の境界でVC投資と巨大応用科学の折り合いがつくわけである。

- 1989(平成元)年5月に核融合プラズマの学理とその応用の研究の推進のため、全国の大学の共同利用機関として設置(文部省学術審議会1984(昭和59)年答申)
- **大学共同利用機関**として、また、**核融合科学研究の中核的研究拠点**として、核融合研究のための盤石な学術基盤を構築・維持するとともに、**人材育成・教育**を牽引することを目的とする
- **大型ヘリカル装置計画**、**数値実験炉研究**、**核融合工学研究**を3つの柱として、国際的にトップレベルの最先端の研究を実施

- 沿革 : 1989年 大学共同利用機関核融合科学研究所設立  
1997年 大型ヘリカル装置(LHD)完成  
1998年 大型ヘリカル装置実験開始  
2004年 大学共同利用機関法人「自然科学研究機構」  
設立、同機構の一研究所に再編  
2017年 LHD重水素実験開始  
2022年 LHD重水素実験終了  
2023年 ユニット制移行、学術研究基盤事業としてLHD運用開始

職員数(2023年4月1日現在) :	220名
・ 所長	1名
・ 研究教育職員	105名
・ 技術職員	45名
・ 事務職員	42名
・ 年俸制職員(特任教授他)	15名 (うちURA職員 4名)





# ユニット体制による学際的共同研究の推進

## 核融合の「未解決問題」を「学術的に定式化」し「学際的な共同研究体制」を構築して取り組む

### 現象論

軸	ユニットテーマ	核融合科学としてのキーワード	学際的なキーワード
ダイナミクス・時空	メタ階層ダイナミクス meta-hierarchy dynamics	プラズマ-物質界面層の物理階層    速度空間ダイナミクス    多階層モデリング    非平衡プラズマの加熱	渦・輸送現象・自己組織化    非平衡開放性と突出現象    有効理論    非線形波動粒子相互作用
システム	構造形成・持続性 Structure formation and sustainability	閉じ込め遷移現象    フロー分布と安定性    プラズマ加熱    先進的閉じ込め配位    統合モデリング	自己組織化    エントロピー    非熱的粒子    隠れた対称性    多目的最適化    不変測度    レジリエンス
揺らぎ・乱流・輸送	位相空間乱流 Phase space turbulence	乱流輸送    非加熱・非同所輸送    異常・突発輸送    無衝突プラズマ    速度空間計測    位相空間構造計測	多次元乱流スケールリング    乱流ミキシング    非平衡プラズマ物性    ゆらぎの定理    エントロピー    集団性
素過程・相互作用	プラズマ量子プロセス Plasma Quantum Process	高Z多価イオン    非等方非平衡プラズマ    プラズマ物質相互作用    レーザープラズマ相互作用    非等温・非線形・非弾性衝突	原子分子素過程    ミュオン原子分子    高エネルギー密度プラズマ    天体プラズマ    重元素起源    極端紫外・軟X線光源開発
異相連成現象	プラズマ・複相間輸送 Transports in Plasma Multi-Phase Matter System	周辺プラズマ・不純物輸送    非接触プラズマ    プラズマ・壁相互作用    粒子・エネルギー循環    プラズマ対向機器	プラズマと固・液・気体相互作用    非平衡交差輸送    原子・分子過程    プラズマ凝結構造形成    微細構造解析

### 方法論

計測・データ	可知化センシング S&I: Sensing and Intellectualization	プラズマ計測技術    高時間・高空間分解能    速度分布関数    乱流・振動計測    環境放射線(能)計測	統計物理モデリング    データ駆動    レーザー・光工学    可視化情報学    オープンサイエンス    地球化学・環境科学
装置学・技術	プラズマ装置学 Plasma Apparatus	プラズマ装置技術    プラズマ・荷電粒子の生成・閉じ込め・輸送・制御技術    プラズマ加熱装置技術    基礎応用プラズマ装置	量子ビーム科学    反物質科学    ミュオン科学    アクション探査    宇宙機
計算科学	複合大域シミュレーション Complex Global Simulation	核燃流プラズマ    MHD    ジャイロ運動論    乱流    周辺プラズマ    不安定性・飽和	大域的シミュレーション    多階層    秩序構造    散逸構造    データ科学    計算科学

### 工学

材料学	超高流束協奏材料 Ultrahigh-flux concerting materials	核融合炉材料    低放射化材    燃料増殖材    中性子増殖材    水素同位体挙動    真熱流束    重陽子	放射線損傷    自己組織化    メソスケール構造    水素透過    拡散    複合材料
低温	超伝導・低温工学 Applied Superconductivity and Cryogenics	高信頼性    安全性    先進超伝導導体    大型超伝導コイル    極低温液体    高強度・高組構化	SDGs (省電力)    超伝導応用    極低温流体    量子技術    AI予知保全    規格化・標準化
核融合炉システム	核融合安全性科学 Safety Science for Nuclear Fusion	核融合原型炉    水素同位体挙動    制御システム    安全解析    ブランケット    ハイブリッド電力システム	閉鎖系物質循環    熱化学分解    水素製造    エネルギー貯蔵    エネルギー変換    モデル予測制御



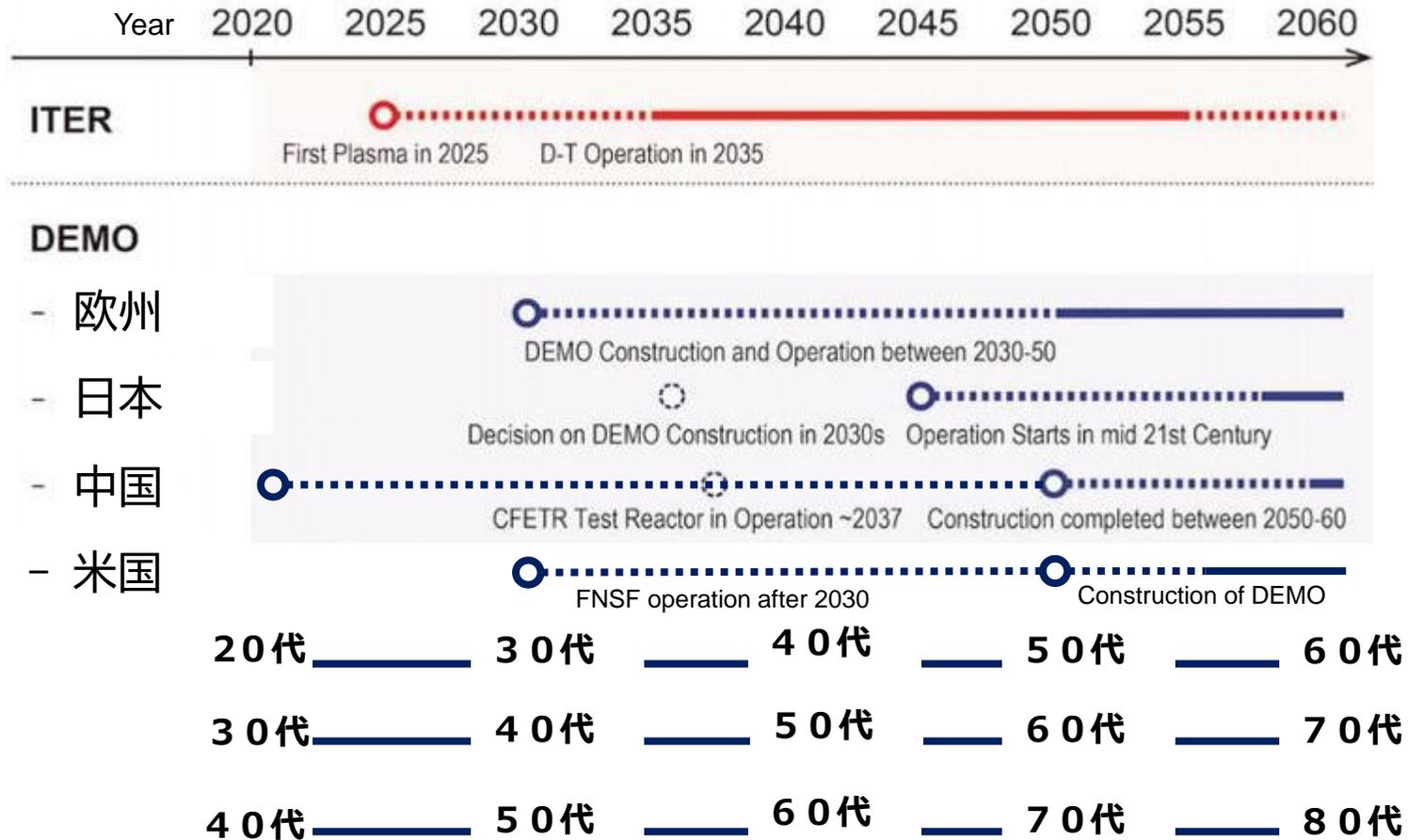
# 核融合科学研究所ではなにをやっているのか？

## ■ 核融合科学に関連するすべての学術研究

- ▶ 核融合は非常に幅広い技術分野や学術分野の集積となっている。核融合を研究することで、学際性豊かで、ユニークな研究活動を展開している。
  - ▶ プラズマ制御（物理に基づく実験と理論）
    - ✓ 閉じ込め性能の向上、磁場装置、レーザー装置の研究
  - ▶ プラズマ計測技術開発
    - ✓ 計測器の高時間・空間分解能化、解析手法の研究
  - ▶ 加熱技術開発
    - ✓ プラズマの高温化、加熱機器高効率化・高パワー密度化
  - ▶ 超伝導技術開発
    - ✓ 高電流（密度）・高強度・大口径マグネットの実現
  - ▶ 材料工学、機械工学
    - ✓ 耐超高熱負荷・耐腐食・耐放射線・低放射化材料の開発
  - ▶ システム設計
    - ✓ 冷却・熱除去、高効率発電・水素製造、遠隔保守、連続排気、同位体分離濃縮



# 商用核融合発電を目指すためには



➤ 非常に長いタイムスケール：一人の人生を費やす（足りないくらい）時間が必要

第5回IAEA DEMOプログラムワークショップ（2018年5月）より

<https://www.iaea.org/newscenter/news/charting-the-international-roadmap-to-a-demonstration-fusion-power-plant>

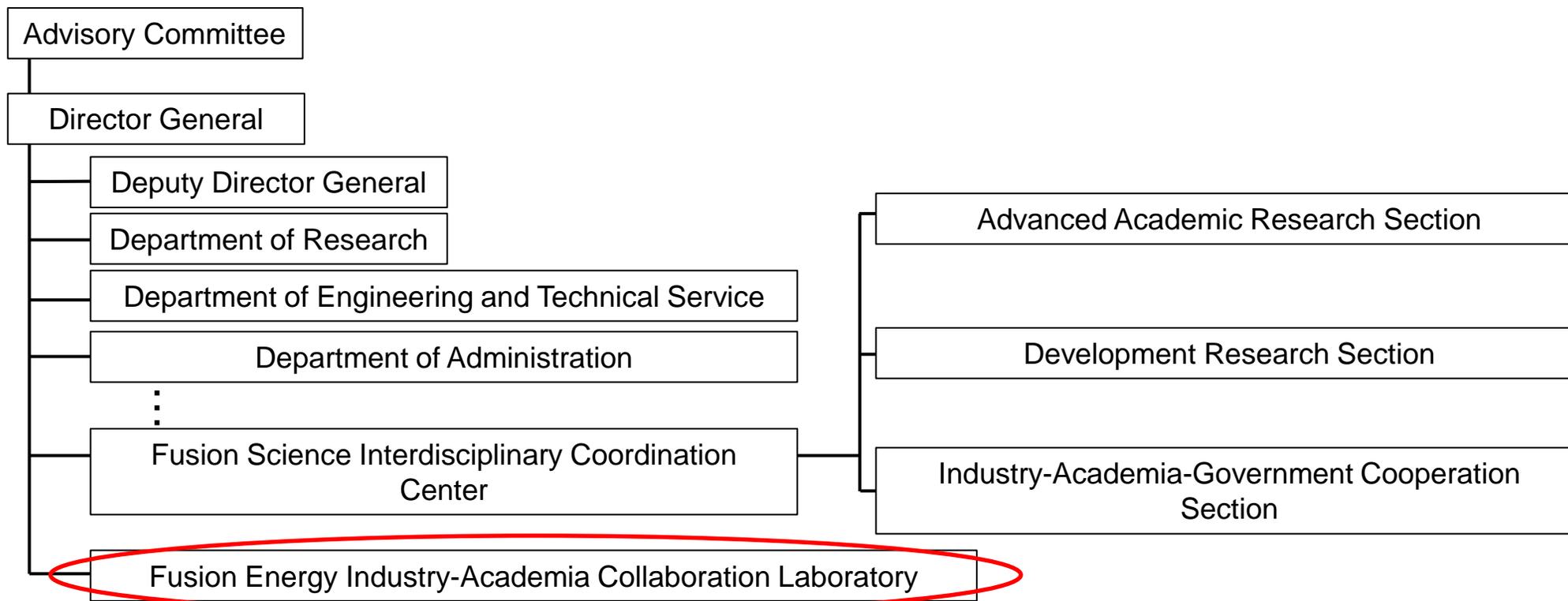
<https://www.intechopen.com/books/power-plants-in-the-industry/nuclear-fusion-power-plants>

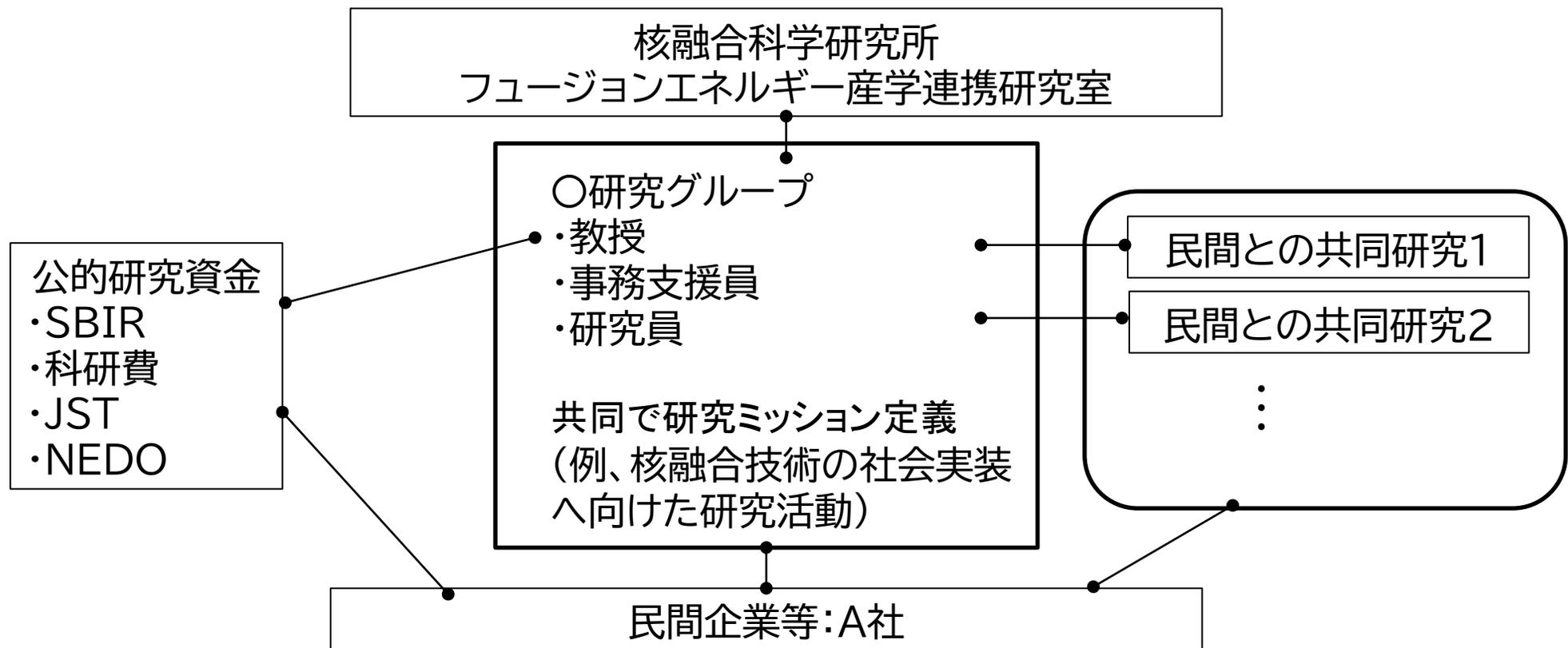
- 核融合科学には極限的な技術を追求しながら、長期にわたり研究活動を行うことが望まれる。
- 企業や政策目標、人生などの経済社会人間の時間スケールで、すなわち短期的に、成果を社会還元していくことは、長期にわたり継続的な研究が必要な核融合科学という学術分野を形成していくためには重要。
- 核融合の極限技術は企業や社会においても課題解決に役立つ。これが成り立てば、短期的に核融合科学からの成果物が社会実装されていく。長期的には、核融合発電は、核融合科学からの社会実装の究極的な一形態になる。





# 組織：フュージョンエネルギー産学連携研究室





フュージョンエネルギー産学連携研究室において、  
ミッション、場所、時間、予算、情報を分離して健全な産学連携活動を推進する。



## ●核融合科学研究所（NIFS）の大学院教育・人材育成の特徴

NIFSが提供する学術研究基盤＝プラットフォーム、そこで実施される最先端の学術研究及び技術部の協力によって、世界トップレベルの大学院教育及び若手研究者の育成を行い、今後30年を要する核融合エネルギー開発を人材育成の面から支える。

### ・ 総合研究大学院大学 物理科学研究科 核融合科学専攻

最先端のプロジェクト研究に参加する5年一貫制博士課程の大学院大学

○核融合科学専攻在籍者：22名（2023年4月1日現在）

（外国人9名） ※中国・タイ・米国・カナダ・メキシコ

○博士号取得者：162名（1994年度～2022年度）

### ・ 大学と連携・協力した大学院教育（2023年度）

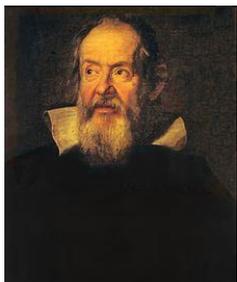
○連携大学院学生（26名）：名古屋大学（理学研究科・工学研究科）、九州大学（総合理工学府）、  
東京大学（新領域創成科学研究科）

○特別共同利用研究員（12名）：東北大学、名古屋工業大学、名古屋大学、大阪大学、  
京都工芸繊維大学 等

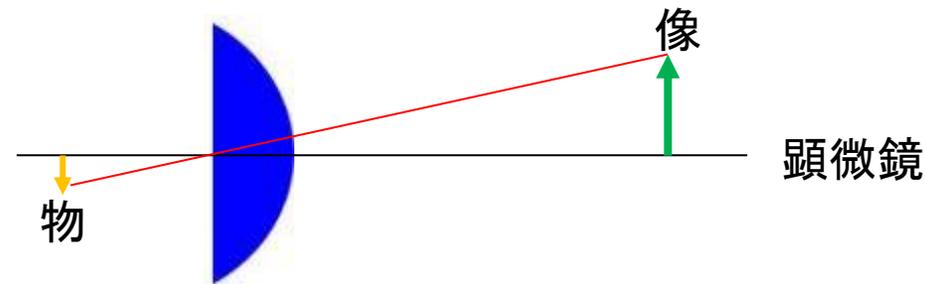
○共同研究による全国の大学院生の教育・人材育成：東京大学、京都大学、九州大学 等

## ②高度計測が開く新たな核融合研究

光学手法の技術的飛躍によって、ガリレオは望遠鏡を高性能化し天文学を切り開き、レーウエンフックは顕微鏡を作って微生物を発見した。

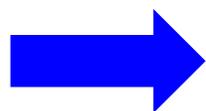


ガリレオ (1564年~1642年)  
課題：レンズシステムの光量不足  
➤ 凹面鏡を組み込んだ、ガリレオ式光学システムの開発



レーウエンフック (1632年~1723年)  
課題：研磨技術では到達できない短焦点レンズの実現  
➤ 溶融法による微小球レンズの開発で短焦点化

基本原理



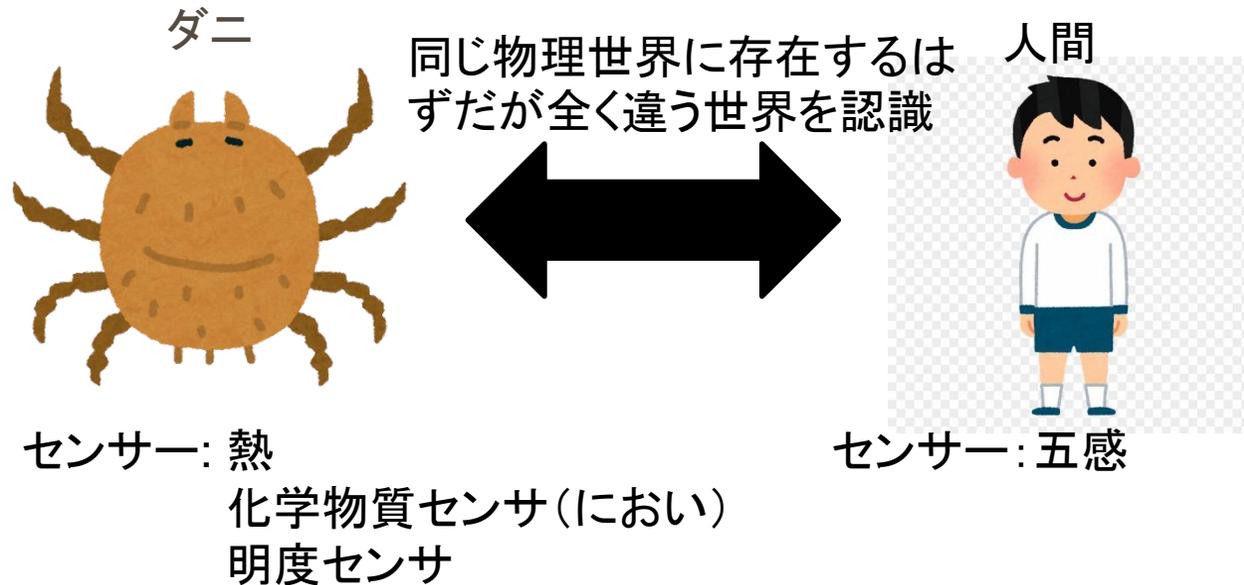
技術的飛躍



学術新分野の開拓

# ダニの環世界、人間の環世界、 高度な計測器を持つ現代の科学者の環世界

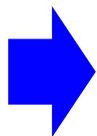
環世界理論: ユクスキュル(生物学者・哲学者)



1864-1944

- ダニと人間は異なる環世界（認識する世界）を生活している。
- この違いは、それぞれが持つ世界とのインターフェイス（計測器）に大きく依存する。
- 人間が、さらに高度な計測器を持てば、より広い環世界を認識することができるはず。それはより広く自然を理解することができるようになる。

なにか黒い煤が  
が付いている  
だけだろ。



表面にナノ構造がある。  
構造色で黒くなっている。

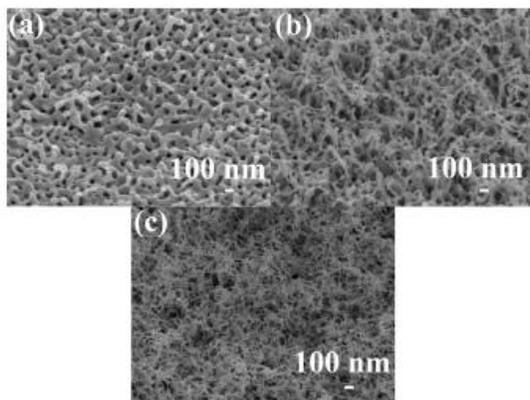
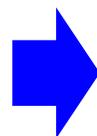
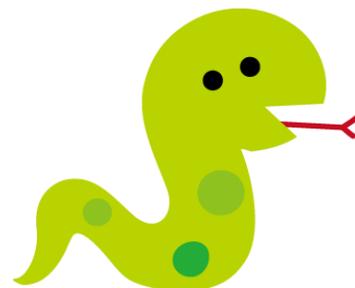
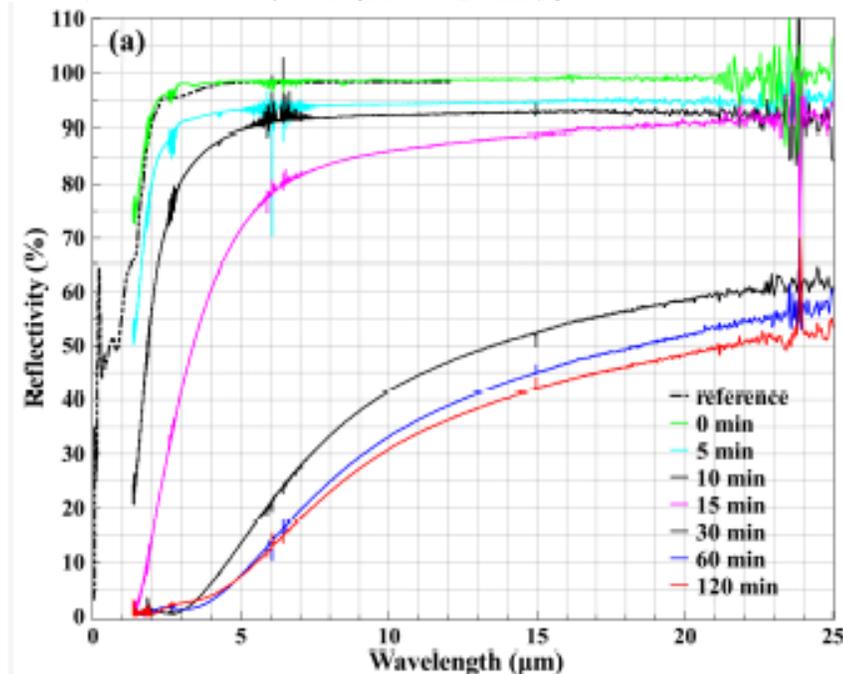


Fig. 1 FE-SEM images of FN W samples irradiated by helium plasma for (a)  $t = 5$  min, (b)  $t = 15$  min, and (c)  $t = 30$  min.



黒いのは、可視から近赤外域だけでした。

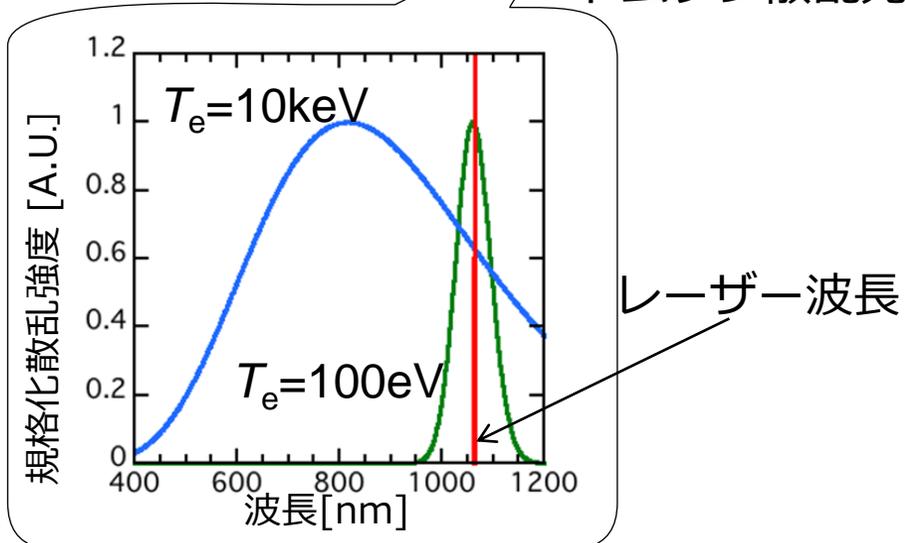
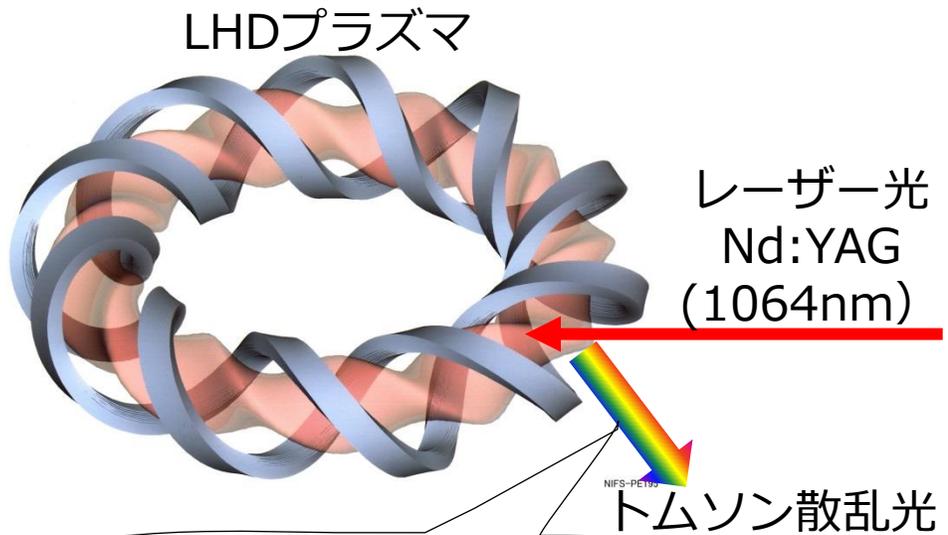


へびには、明るく見える。  
ボロメーターでも見える。

Shuangyuan FENG, ...**R. Yasuhara**, et. al., PFR(2021).

## ②レーザーの高度化による高性能化

# トムソン散乱によるプラズマの電子温度( $T_e$ )、 電子密度( $n_e$ )計測



ドップラーシフトを受けた散乱光

- プラズマ中の電子運動
  - ↓ 散乱光はドップラー効果による波長シフト
  - ↓ 分光器でスペクトル測定
  - ↓ 電子温度算出
  - ↓ 光量から電子密度算出
  
- プラズマの電子温度、電子密度を非接触で直接的に計測可能→信頼性の高い評価方法
  
- トムソン散乱によるプラズマプロファイル計測は研究の強力なツール



# プラズマ温度・密度計を高時間分解能化することによって対象となる興味深い現象

## ■ 1kHz~

- ▶ 電磁流体力学：プラズマの安定性に直結

## ■ 10kHz~

- ▶ 固体水素ペレット投入：燃料供給

## ■ 100kHz~

- ▶ 高エネルギー粒子に関わる現象

## ■ 1MHz~

- ▶ プラズマにおける乱流物理

- 高空間分解+高時間分解能、見えなかったことを見えるようにすることで広がる新たな研究



# プラズマ温度・密度計（トムソン散乱計測）の課題

- トムソン散乱計測には高繰り返し動作のジュール級のパルスレーザーが必要

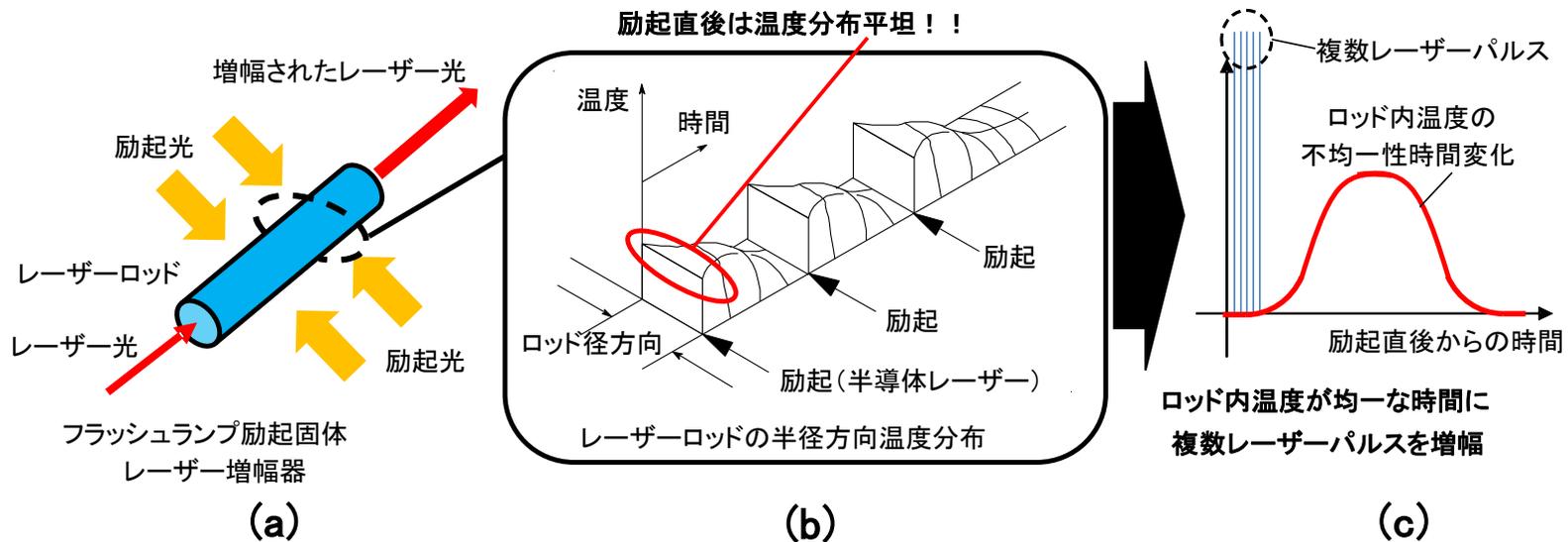
対象プラズマ電子密度： $10^{12}$ - $10^{14}\text{cm}^{-3}$   
トムソン散乱断面積： $6.65 \times 10^{-25}\text{cm}^2$

- 計測がレーザーの性能（出力や繰り返し）に制限され、50Hz程度が測定の繰り返しの限界
- レーザーを複数台使用することで、実質的な繰り返しを上げることができるが限界がある。



# どのようにレーザーを高繰り返しかするか？

## ■ バーストモードレーザー

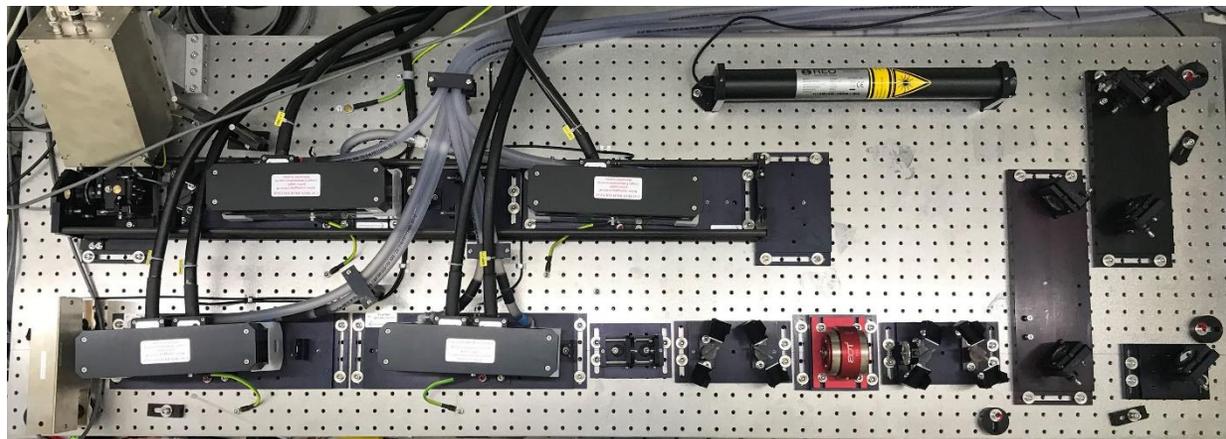


- 光励起直後に、レーザーロッドの熱拡散時間よりも短い間にレーザー増幅をする。
- 熱効果フリーで、1ms以下の複数パルスの出力が可能

■ バーストモード動作によって、熱による影響を排除して、1kHz以上のレーザー動作が可能、1kHz以上のトムソン散乱計測が可能！



# レーザーシステムとレーザー電源



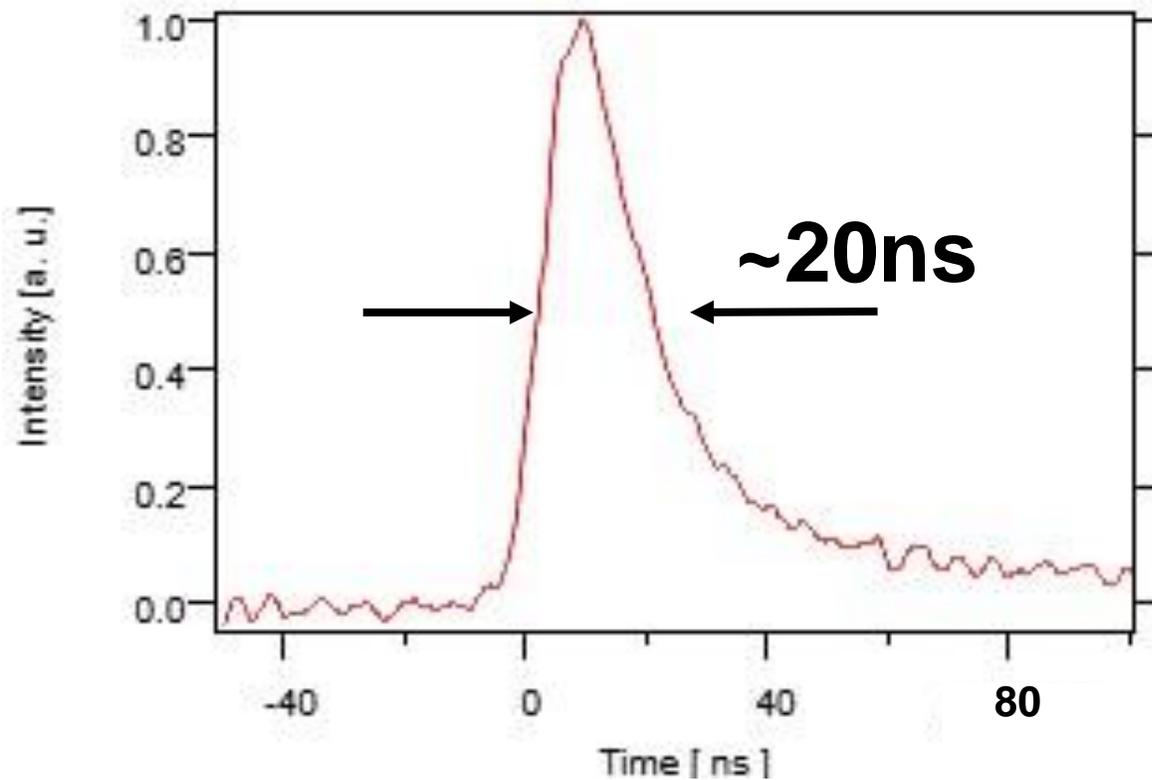
Collaboration with UW-Madison

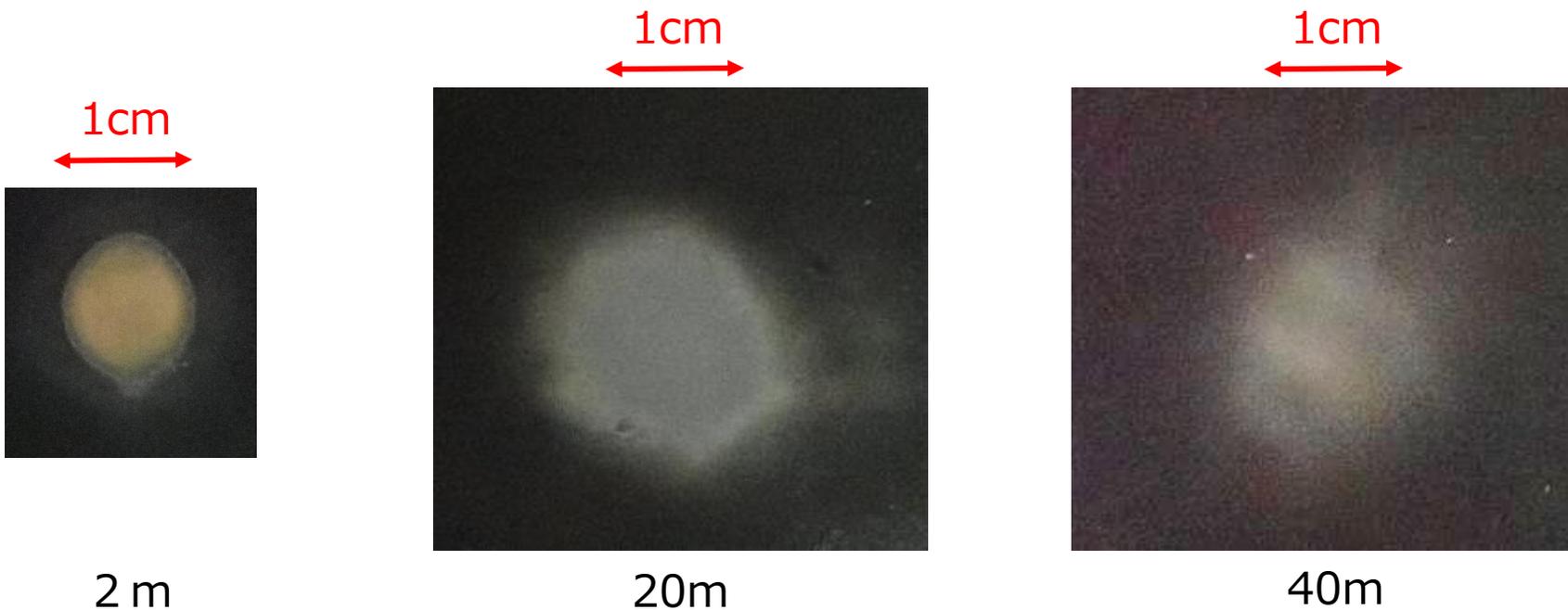


# 1 J、100 パルス、 繰り返し率20 kHz 動作を実証

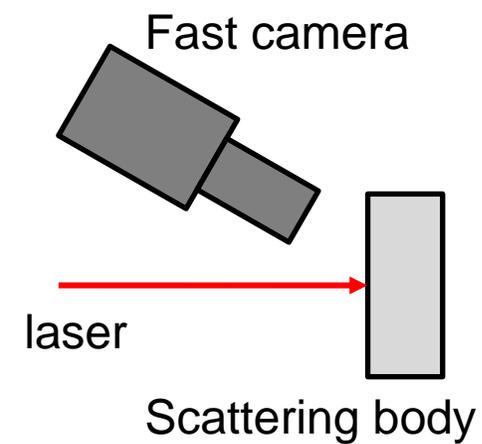
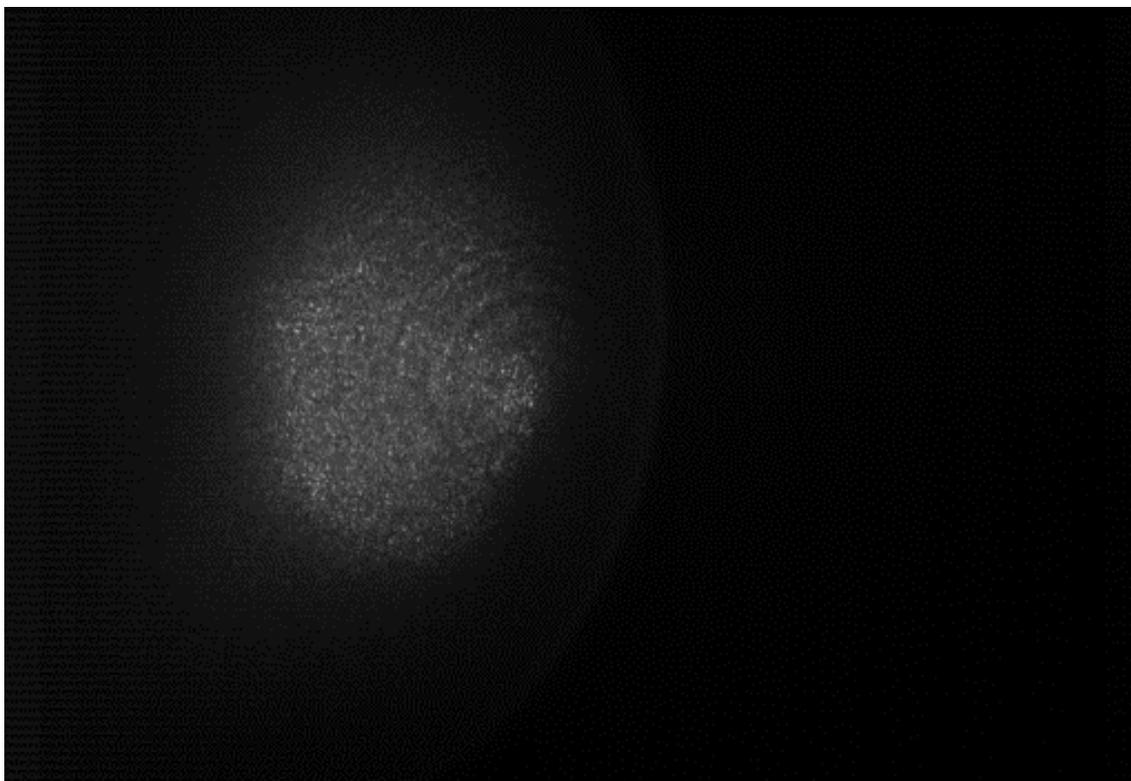


Pulse duration was 20 ns (FWHM) for each pulses.





- No peak
- Smooth distribution

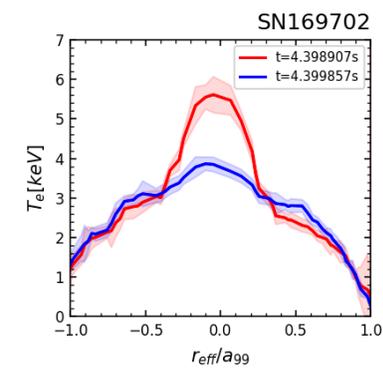
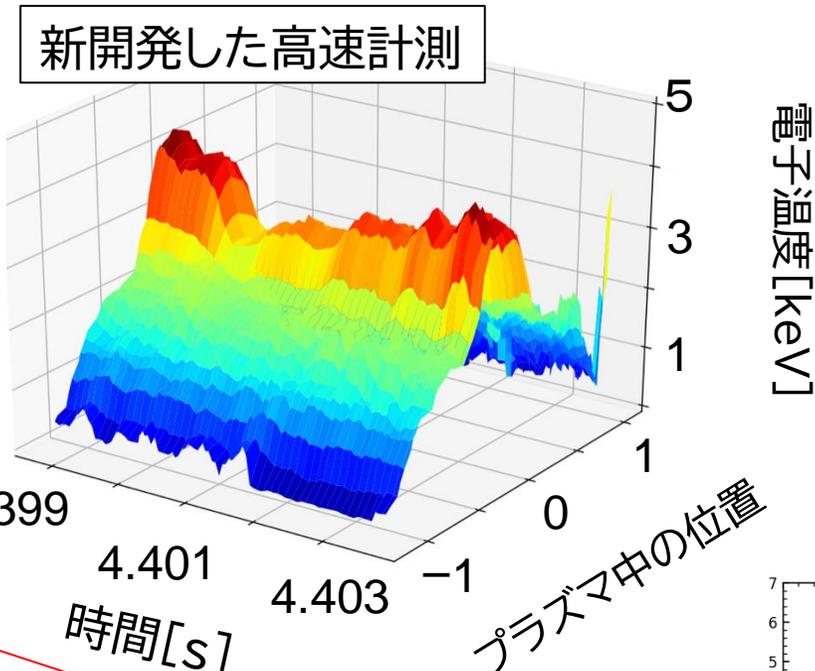
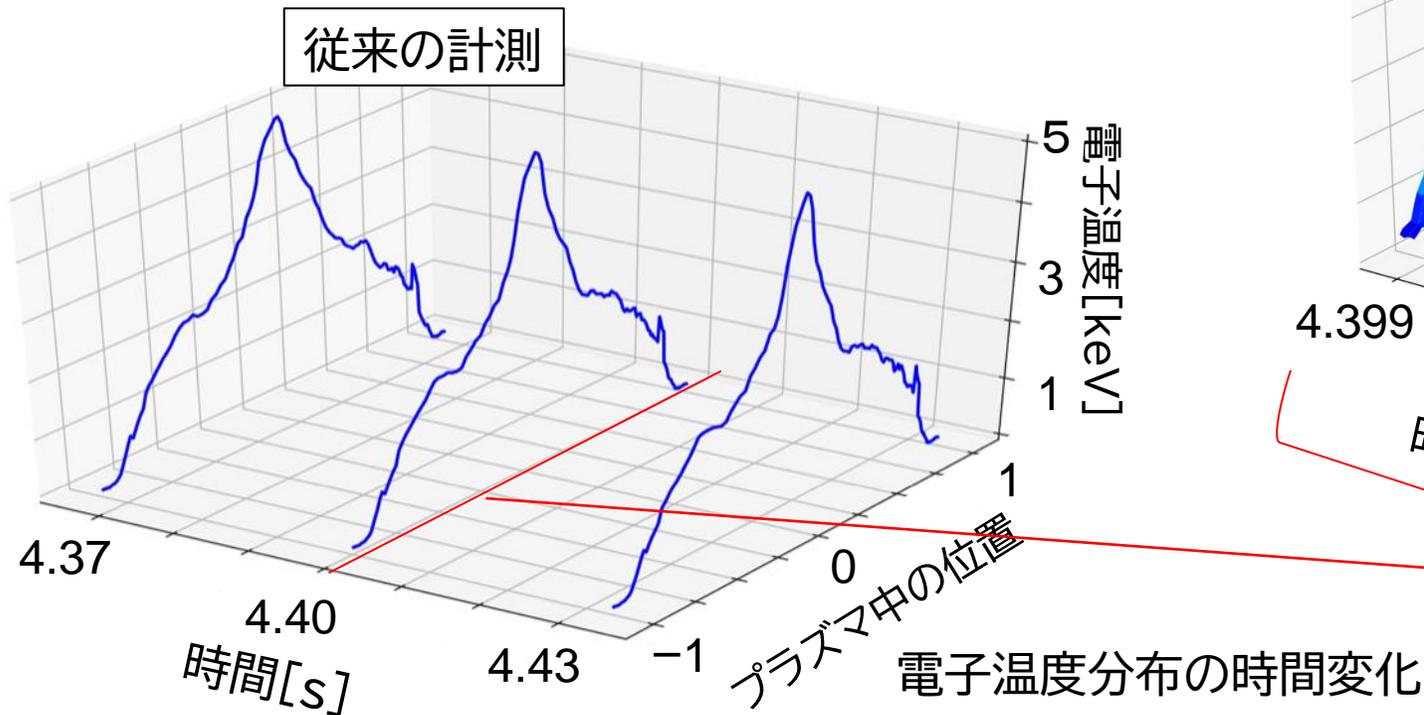


- No shrinking during 100 shot



# プラズマ温度・密度計の高時間分解能化によって、見えなかったものが見えてきた。

- 600倍以上の時間分解能で計測
- 従来では観測できなかったプラズマの変化を捉えた！！



プレスリリース：<https://www.nifs.ac.jp/news/researches/221003.html>、日刊工業新聞、Yahoo! Japan 等  
 N. Kenmochi, ,,,R. Yasuhara, et al., Scientific Reports, 12, 6979 (2022) .  
 H. Funaba, R. Yasuahra, et al., Scientific Reports, 12, 15112 (2022) .

- 核融合は、将来の有力なエネルギー源として期待されている。低炭素化やエネルギーの安定供給の観点から近年非常に研究が活発化している。
- 核融合科学研究所は、核融合に関わる全てを対象に研究を行う日本の中核的な研究機関。核融合実現に向けて、商用炉へ向けたロードマップ的な産学連携と共に周辺技術の社会利用が持続的な核融合研究開発に重要
- 核融合科学の進展に高性能なレーザーを用いた高度計測に期待