

科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会
核融合科学技術委員会（第22回）
議事次第

1. 日時：令和2年10月30日（金）15：00～17：00

2. 開催方法：オンライン開催

3. 議題：

- （1）令和3年度核融合関係概算要求について
- （2）第25回BA運営委員会の結果について
- （3）大阪大学のレーザー核融合研究開発について
- （4）研究開発プログラム評価の新たな仕組みについて
- （5）アウトリーチ戦略、活動推進計画について

4. 配布資料：

- 資料1 令和3年度核融合関係概算要求の概要
- 資料2 第25回幅広いアプローチ(BA)運営委員会の結果について
- 資料3 レーザー核融合研究開発について
- 資料4 研究計画・評価分科会における研究開発計画と分野別研究戦略・計画（案）との関係
- 資料5 核融合エネルギーに関するアウトリーチヘッドクォーターの活動報告
- 参考資料 第10期核融合科学技術委員会 委員名簿

令和3年度 核融合関係概算要求の概要

文部科学省 研究開発局
研究開発戦略官（核融合・原子力国際協力担当） 岩渕秀樹

背景・課題

- 核融合エネルギーは
 - 燃料となる資源が海水中に豊富に存在し、少量の燃料から膨大なエネルギーが発生すること
 - 連鎖反応でエネルギーを発生させるものではないため、燃料の供給を止めるとすみやかに反応が停止するという固有の安全性を有すること
 - 地球温暖化の原因となる二酸化炭素を発生しないこと
- 等の特徴を有していることから、将来のエネルギー源として、その実現が期待されている。

【直近の閣議決定文書等における記載】

- 核融合エネルギーについては、トカマクのITER計画や幅広いアプローチ活動の着実な推進と並行して、我が国独自のアイデアに基づくヘリカル方式等の研究を推進し、科学的・技術的実現性の確立を目指す。 / 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(令和元年6月11日閣議決定)
 - ビッグサイエンスに関しては、核融合分野のITER計画等や宇宙・海洋分野等の大型国際共同研究プロジェクトについて、長期的視野に立ちつつ、投資に見合った研究開発成果が得られるよう、戦略的に取組を推進する。 / 「統合イノベーション戦略」(令和2年7月17日閣議決定)
- その他、エネルギー基本計画(平成30年7月)や科学技術基本計画(平成28年1月)に記載あり。また、革新的環境イノベーション戦略(令和2年1月統合イノベーション戦略推進会議決定)にも記載あり。

目的・概要

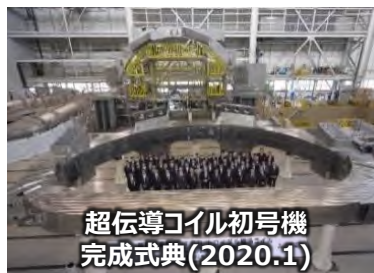
エネルギー問題と環境問題を根本的に解決するものと期待される核融合エネルギーの実現に向け、国際約束に基づき、核融合実験炉の建設・運転を行うITER計画及び原型炉に向けた先進的研究開発を国内で行う幅広いアプローチ(BA)活動等を、長期的視野に立って計画的かつ着実に実施し、科学的・技術的実現性の確立を目指す。

ITER計画

- 協定：2007年10月発効
- 参加極：日、欧、米、露、中、韓、印
- 各極の費用分担(建設期)：
欧州、日本、米国、ロシア、中国、韓国、インド
45.5% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1% 9.1%
- ※各極が分担する機器を調達・製造して持ち寄り、ITER機構が全体を組み立てる仕組み
- 計画： 運転開始：2025年12月
核融合運転：2035年12月
- 成果：ITERサイトの建設作業が進捗する(2020年7月時点で約70%)とともに、超大型で高性能の超伝導コイルの実機製作が進むなど、機器製作が着実に進展



実験炉ITER
(フランスに建設中)



超伝導コイル初号機
完成式典(2020.1)



中性粒子加熱試験施設
高電圧機器



ITER機構提供
ITERサイトの建設状況(2020.3)

令和3年度要求・要望額：22,711百万円(16,494百万円)

- ITER機構の活動(分担金) 4,856百万円(5,181百万円)
 - 量子科学技術研究開発機構(QST)におけるITER機器の製作や試験、人員派遣等(補助金) 17,855百万円(11,313百万円)
- ※超伝導コイルの実機製作、他の主要機器の実機製作(設計、試作、試験段階を含む)を継続

ITER(国際熱核融合実験炉)計画等の実施(2)

BA活動等

- 協定：2007年6月発効
- 実施極：日、欧
- 実施地：青森県六ヶ所村、茨城県那珂市
- 計画：フェーズⅠ：2020年3月まで
フェーズⅡ：2020年4月～
- 実施プロジェクト
 - ①先進超伝導トカマク装置(JT-60SA)の建設と利用
 - ②国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動(IFMIF/EVEDA)
 - ③国際核融合エネルギー研究センター活動(IFERC)
- 成果：令和2年3月にJT-60SAの組立が完了するなど、主だった研究環境の整備が進展。令和2年4月からBAフェーズⅡとしてITER計画を補完・支援する研究成果を創出する段階に移行。



JT-60SA



組立が完了したJT-60SA



核融合中性子源用原型加速器(LIPAc)



スパコン「六ちゃん-II」

令和3年度要求・要望額：5,865百万円(4,854百万円)

▶QSTにおけるITER計画の補完・支援及び核融合原型炉に必要な技術基盤の確立に向けた先進的研究開発等（補助金）

- | | |
|-----------------------------|--------------------|
| ①先進超伝導トカマク装置(JT-60SA)の運転と整備 | 2,743百万円（1,779百万円） |
| ②原型加速器の連続運転に向けた整備等 | 622百万円（622百万円） |
| ③原型炉設計活動や計算機シミュレーション活動等 | 2,499百万円（2,452百万円） |

事業概要

核融合エネルギーは 将来の核融合炉の早期実現のため、定常運転が原理的に可能なヘリカル型装置で高温プラズマを実現することにより、超高性能プラズマの定常運転の実証をする。これとともに、学術的に未解明な現象の探求とその体系化を図る。

そのために、プラズマを長時間保持できる大型ヘリカル装置（LHD）で重水素を使用した高温プラズマを実現させ、定常運転の実証による研究の推進を行う。

基礎データ

- 建設：LHD 約507億円（1990～1997年度、8年計画）
- 実験：1998年度から本格実験を開始
- 共同利用研究者数：639人（うち外国人97人(15か国)）※2019年度実績

実施体制

- 事業実施主体：自然科学研究機構核融合科学研究所
- 連携研究機関：筑波大学プラズマ研究センター、京都大学エネルギー理工学研究所等 国立大学等66機関、公立・私立大学54機関、外国機関56機関等(合計243機関)

主な成果

- 2008年度：核融合炉に必要なプラズマ密度の条件を10倍以上上回る 1,200兆個/cm³を達成 **【プラズマ密度の世界最高値(現在まで)】**
- 2013年度：2,300万度のプラズマの48分間連続保持に成功 **【プラズマ保持の世界最高値(現在まで)】**
- 2014年度：イオン温度7,000万度、電子温度8,800万度を同時達成
- 2016年度：重水素実験開始
- 2017年度：イオン温度1億2,000万度、電子温度4,200万度を同時達成、同位体効果を確認
- 2018年度：イオン温度1億2,000万度と電子温度6,400万度を同時達成
- 2019年度：電子温度1億5,000万度とイオン温度8,000万度を同時達成

研究計画

<2020年度>

- 将来の核融合炉心プラズマに最低限必要なイオン温度と電子温度がともに1億2,000万度を超える高温プラズマの実現を目指して、イオン温度1億2,000万度、電子温度1億度の同時達成を実現する。
- 核融合炉心プラズマの状態をより正確に予測するために、メカニズムが未解明の「同位体効果」(※)を明らかにするための研究を進める。

※ 軽水素よりも重水素のプラズマの性能が良くなる現象

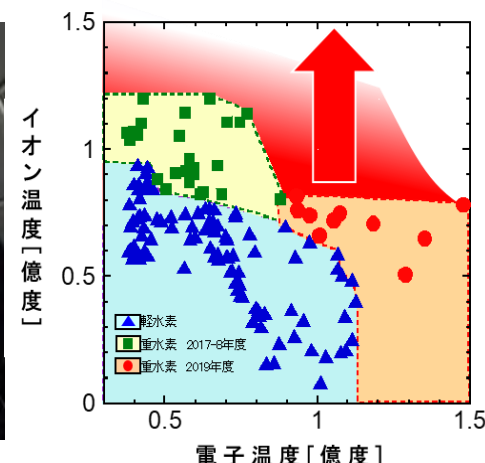
- 国際共同研究により導入した高性能レーザーを最大限に活用して計測を強化し、プラズマ中の揺らぎがプラズマ性能に及ぼす影響を明らかにする。

<2021年度以降>

- 加熱の増強・最適化を進め、核融合燃焼プラズマに必要なイオン温度と電子温度がともに1億2,000万度を超える超高性能プラズマの実現を目指して、プラズマの高温化を進める。
- プラズマ中の揺らぎ（揺動）の計測装置の整備を進め、プラズマ中の小さな渦（乱流）が関与する同位体効果などの核融合炉の早期実現に必要な現象の解明をする。



大型ヘリカル装置 (LHD)



LHDにおけるイオン温度と電子温度の変遷

第25回幅広いアプローチ(BA)運営委員会の結果について

岩渕 秀樹

文部科学省研究開発戦略官（核融合・原子力国際協力担当）

第25回BA運営委員会の概要



文部科学省

日程： 令和2年7月6日（月）

※新型コロナウイルスの感染拡大防止の観点から、初めてテレビ会議により開催。

出席者：

（日本）千原 由幸 文部科学省大臣官房審議官（研究開発局担当） ほか
（欧州）マッシモ・ガリバ 欧州委員会エネルギー総局副総局長代行 ほか

主な議題：

（1） 3事業の進捗状況の報告

- ①国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動（IFMIF/EVEDA）事業
- ②国際核融合エネルギー研究センター（IFERC）事業
- ③サテライト・トカマク計画（STP）事業

（2） ITER計画とBA活動の連携について

（3） その他（ホストサポート状況の紹介、次回運営委員会の開催時期・場所等）

第25回BA運営委員会の結果概要



文部科学省

BA運営委員会（審議官級）では、IFMIF/EVEDA、IFERC、サテライト・トカマク計画の3事業について、事業の進展を確認するとともに、今後の事業計画等について議論。

①国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動（IFMIF/EVEDA）事業

- 日本と欧州の多くの研究者の協力の下、昨年7月に世界最高強度の重陽子ビーム加速に成功。
- BAフェーズⅡでは、核融合中性子源開発のための設計活動の検討を行う。

②国際核融合エネルギー研究センター（IFERC）事業

- 原型炉R&D活動、計算機シミュレーションセンター活動、ITER遠隔実験センターは計画通りに進捗し、BAフェーズⅠの目標を達成。
- 計算機シミュレーションセンター活動では、日本と欧州のスーパーコンピュータを共有した日欧共同シミュレーションプロジェクトが開始。
- 欧州核融合実験装置JETで用いられた炉壁の評価を行い、ITERの運転シナリオを検討する上で重要な三重水素の蓄積に関するデータを世界で初めて取得。

③サテライト・トカマク計画（STP）事業

- 本年3月末にJT-60SAの組立が完了。本年内の初プラズマに向けて、各機器の健全性の確認を進める。

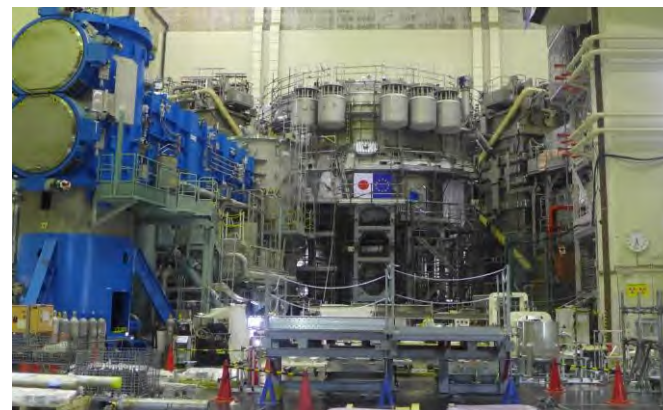
◆ 新型コロナウイルスによる今後の事業への影響は引き続き評価していくこととし、次回12月の運営委員会において評価結果を議論する予定。

④ITERとBAの協力の取組について

- 第24回BA運営委員会で報告された、ITER 機構とBA両実施機関（QST、F4E）間の協力取決めの署名式実施について報告。
- BA活動の核融合エネルギー実現に向けた重要性について確認。

⑤その他

- 六ヶ所サイトにおける欧州研究者、技術者及びその家族への高い水準の生活支援及び教育支援に対する青森県及び六ヶ所村による多大な努力に感謝の意を表明。
- 次回第26回BA運営委員会は、2020年12月2,3日に独・カールスルーエにて開催予定。



組立が完了したJT-60SA

BA活動においては、ITER計画を補完・支援するとともに、原型炉に必要な技術基盤を確立するための先進的研究開発を実施しており、高性能加速器の据付・調整やサテライト・トカマク（JT-60SA）の組立が完了するなど、主だった研究環境の整備が進む。

先進超伝導トカマク装置JT-60SAの建設と利用（茨城）

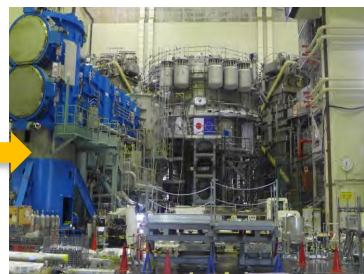
- ◆ ITERに次ぐ規模の超伝導トカマク装置JT-60SAにおいて、主要機器の据付を高精度で完了し、その実績をもってITERの組立期間の短縮に貢献する等、ITERを支援するという目的を着実に達成。
- ◆ JT-60SAは令和2年3月末に組立を完了し、令和2年内の初プラズマに向けコミッショニングを実施。



JT-60SA



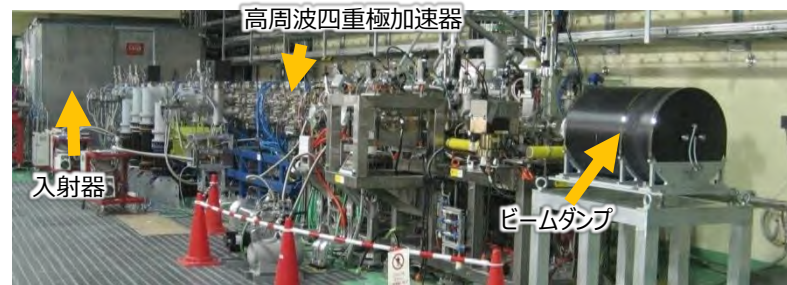
TFコイルの組立中



組み立てが完了したJT-60SA

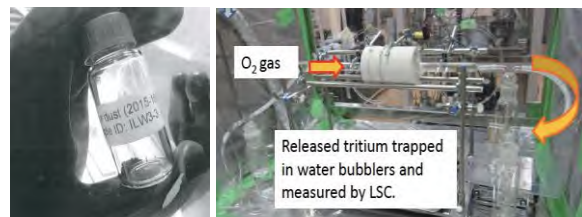
核融合中性子源用原型加速器の建設と実証（青森）

- ◆ 原型炉を目指した材料開発のための高性能加速器の据付・調整が大きく進展。
- ◆ 令和元年7月、8系統高周波源を用いた高周波四重極加速器による世界最高強度の重陽子ビーム加速試験に成功。
- ◆ RFQを用いた5MeV・長パルスビーム試運転に向け調整中。



国際核融合エネルギー研究センター事業等（青森）

- ◆ 原型炉に必要なとなる重要機器の設計活動、研究開発が進展。



大型トカマク装置JET(英国)のタイルとダストの分析を継続し、ITERの運転シナリオを検討に貢献する三重水素の蓄積に関するデータを世界で初めて取得。

ITER・BAの協力の取組

- ◆ 令和元年11月のITER理事会において、ITER機構と日欧の実施機関（QST,F4E）の間で協力取決めに署名。
- ◆ 日欧は①ITER用の解析ソフトを利用できるほか、②ITER機構との人的交流が活発になり、より有利な立場でITER計画に参画できることが期待。



レーザー核融合研究開発について

- ◆ レーザー核融合概要
- ◆ レーザー核融合研究開発の経緯
- ◆ レーザー核融合高速点火研究（FIREX計画）の進捗
 - ・ 高速点火方式に適した爆縮
 - ・ 効率的な爆縮プラズマ加熱
- ◆ これからのレーザー核融合研究
- ◆ 参考資料

大阪大学レーザー科学研究所
兒玉 了祐

災害に強いスマート社会に適したレーザー核融合発電炉目指した研究開発は 極限量子の開拓として多くのイノベーションと学術を生み出す

高エネルギー密度科学

核融合商業炉

新たな量子材料の
創生

実証炉実現

真空の謎解明

超小型インフラ
検査装置普及

点火燃焼
実証

第3の量子物質状態実現

レーザー加速器実現
スーパー
ダイヤモンド

発電実証

極限量子の開拓

分散型スマート社会実現に適した、比較的小規模な発電炉を実現

- 繰り返し運転（電力量可変）
- 出力：数10～100万キロワット中型

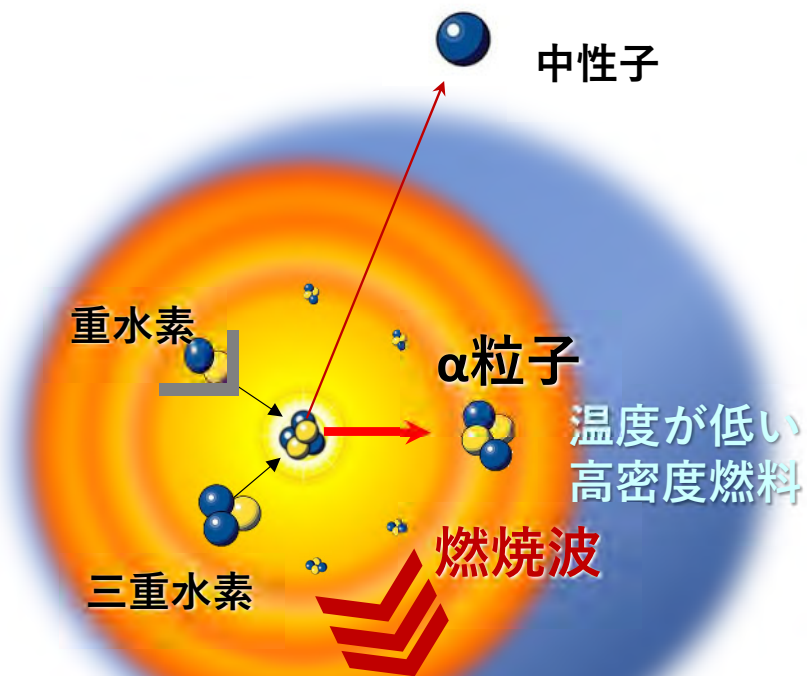


短い送電網と分散型発電炉で災害に強いスマート社会

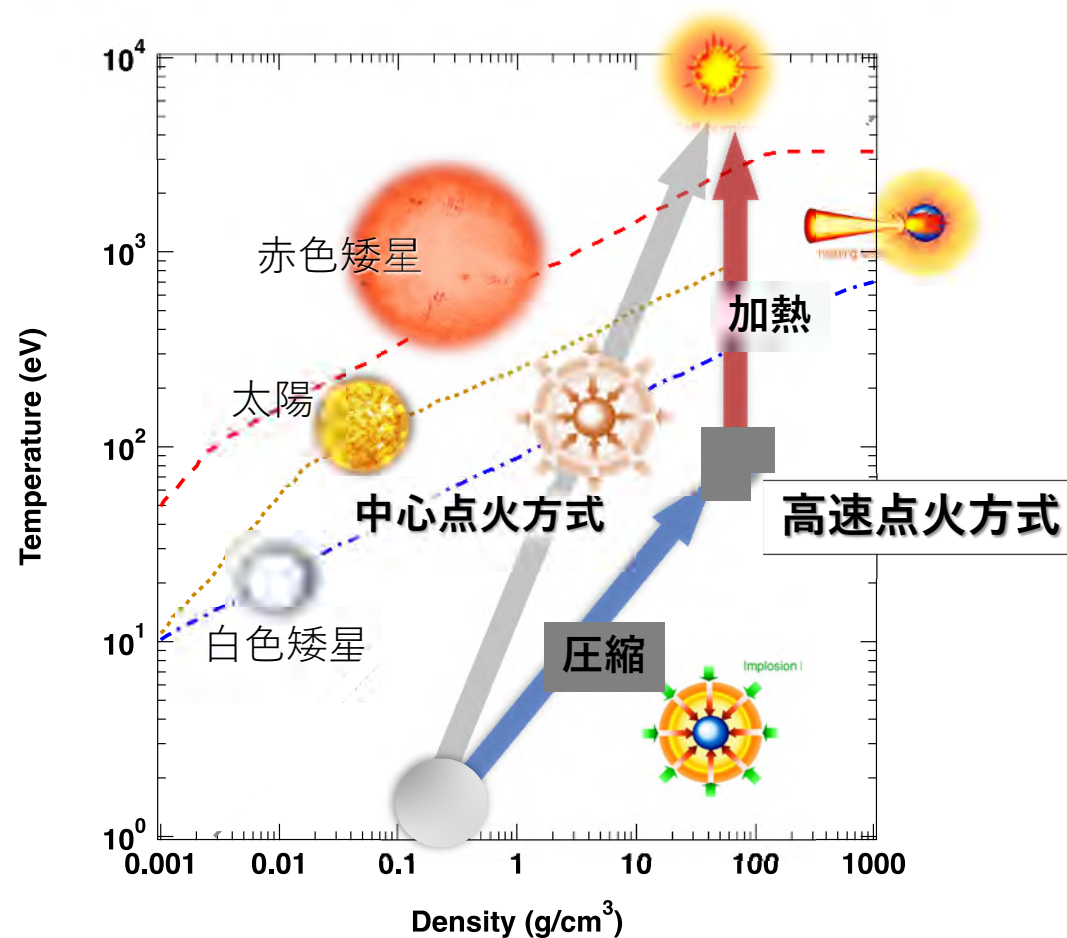
レーザー核融合燃焼と実現へ向けた方法

α粒子が燃料ないで止まり燃焼波が形成され、燃料全体が自然に燃える。

レーザー核融合が目指すプラズマの状態と実現するための方式



核融合を起こす温度：5000万度～1億度
 燃焼のための密度xサイズ：1000倍の個体密度
 $\rho R = 0.3\text{g} - 0.5\text{g}/\text{cm}^2$



レーザー核融合炉心プラズマ研究の概要

✓ レーザー核融合に必要な温度・密度は、大阪大学で別々に達成

1986 核融合点火に必要な超高温達成 (1億度)
(e.g. C. Yamanaka et al., Nature 1986)

1991 核融合点火に必要な超高密度達成 (固体密度の600-1000倍)
(e.g. H. Azechi et al., Laser Particle Beams 1991)



2001 高速点火方式の原理実証
(e.g. R. Kodama et al., Nature 2001)

2020 加熱物理の解明と中心点火方式の>10倍の効率を実証
(e.g. K. Matsuo, et al., Phys. Rev. Lett. 2020)



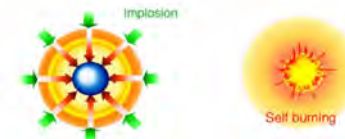
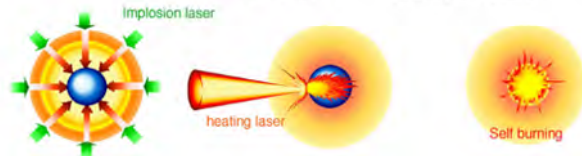
高速点火方式:
燃料圧縮と加熱を個別に最適化

中心点火方式:
燃料圧縮・加熱は同じレーザー

新たな参入(2020)
1000億円の新規プロジェクト

- 大阪大学レーザー研(日)
- 浜ホト/光産業創成大(日)
- 中国科学アカデミー(中)
- ベンチャー企業(独)

- LLNL(米)
- LLEロチェスター(米)
- LMJ(仏)
- 中国物理工学アカデミー(中)



高速点火方式により、従来の中心点火方式の 1/10以下のエネルギーで同等の核融合積を実現

競争力ある独自のターゲットデザイン



コーンによる効率的な加熱 **中実球による安定な爆縮**
 R. Kodama et al., Nature (2001)
 S. Sakata et al., Nature Commun. (2018)
 K. Matsuo et al., Phys. Rev. Lett (2020)

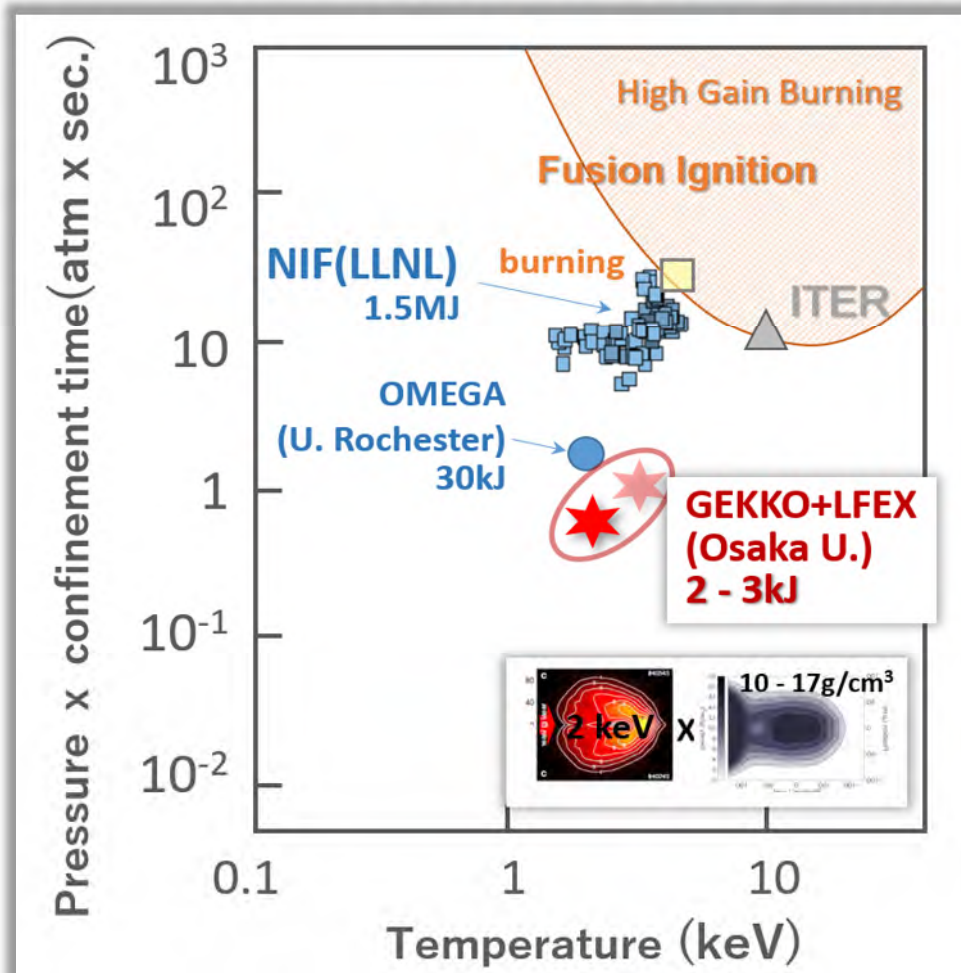
S. Fujioka et al, Phys. Rev. E, (2015)
 H. Sawada et al., APL (2016)

ユニークなレーザー施設



Multi-kJ/ns laser **GEKKO-XII** kJ/short pulse laser **LFEX**

● 詳細な物理過程の解明と効率的な加熱の実証



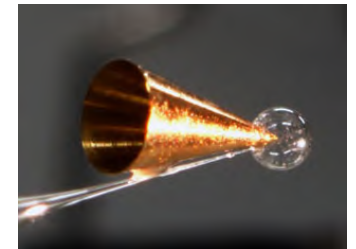
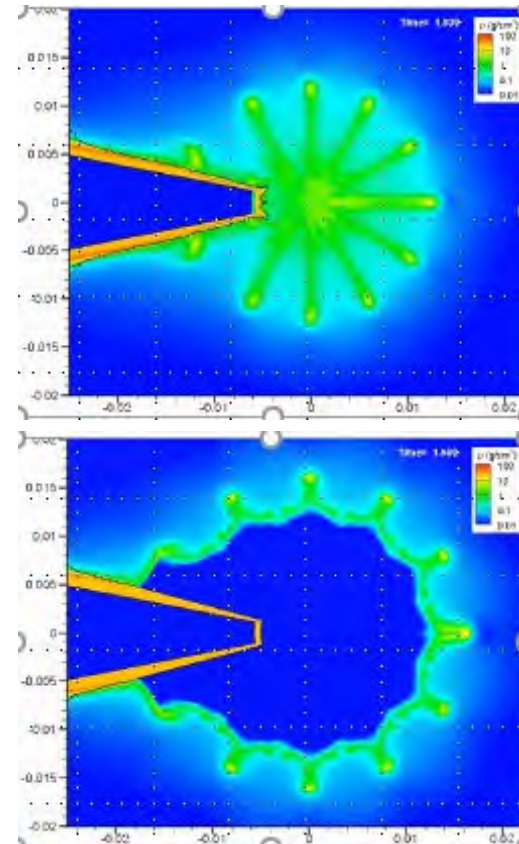
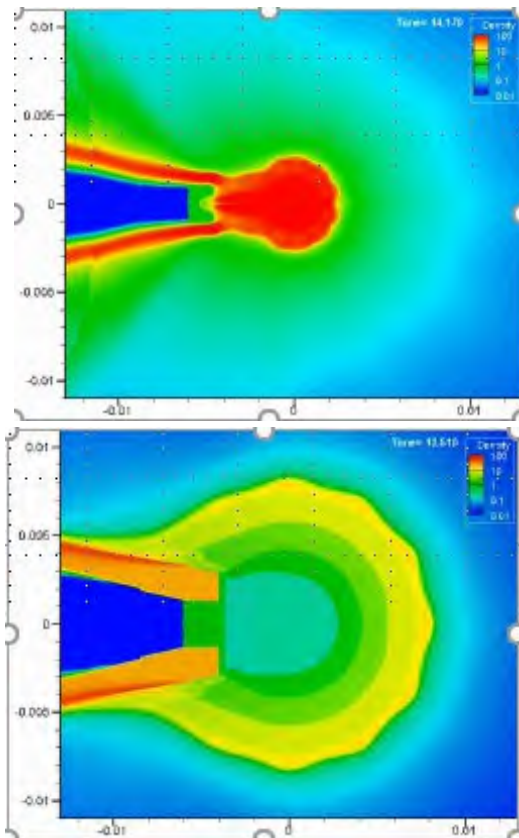
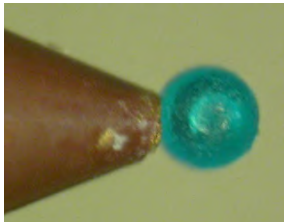
K Matsuo, et al., Phys. Rev. Lett. 124, (2020) 035001

高速点火方式だからできる安定な爆縮新手法発見！

- 従来手法では、非常識な中実球爆縮 -



- 流体的安定な燃料爆縮（レーザー核融合の難問から解放）
- ビームバランス（タイミング）に対しても鈍感で安定した爆縮が期待できる
- 効率的な拡散加熱ができるターゲットデザイン
- 比較的容易な燃料球製作

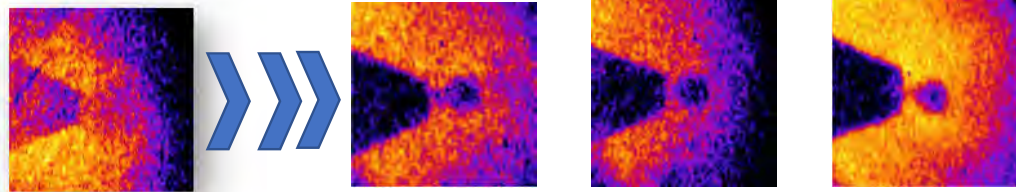
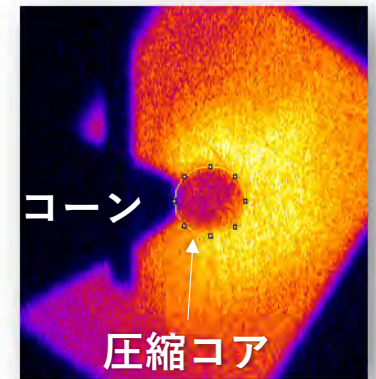
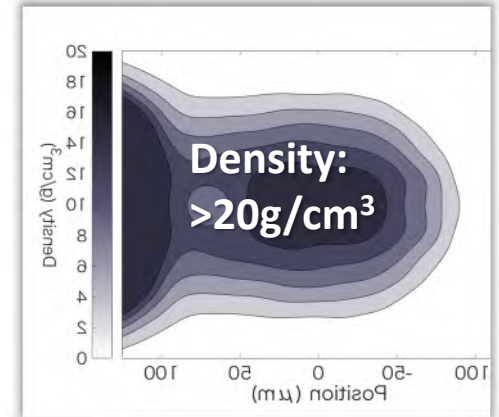
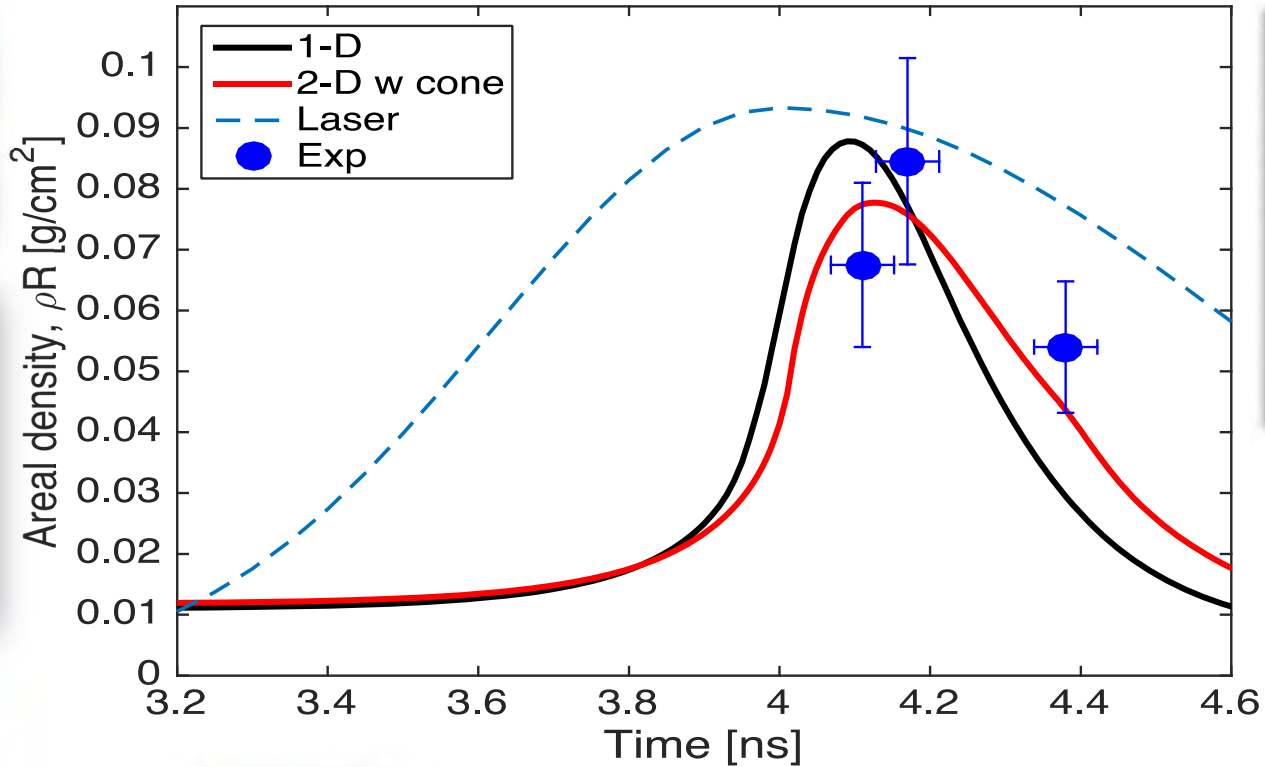
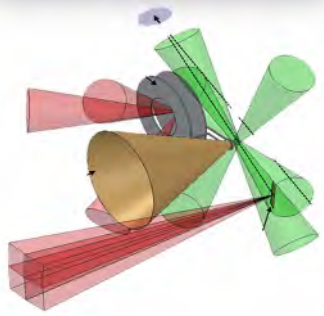
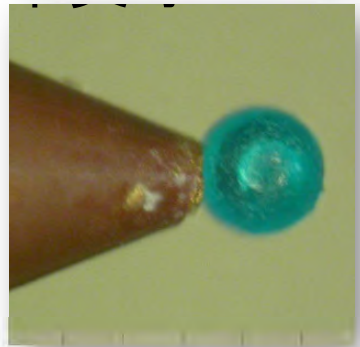


2020年特許申請

中実球
(新型)

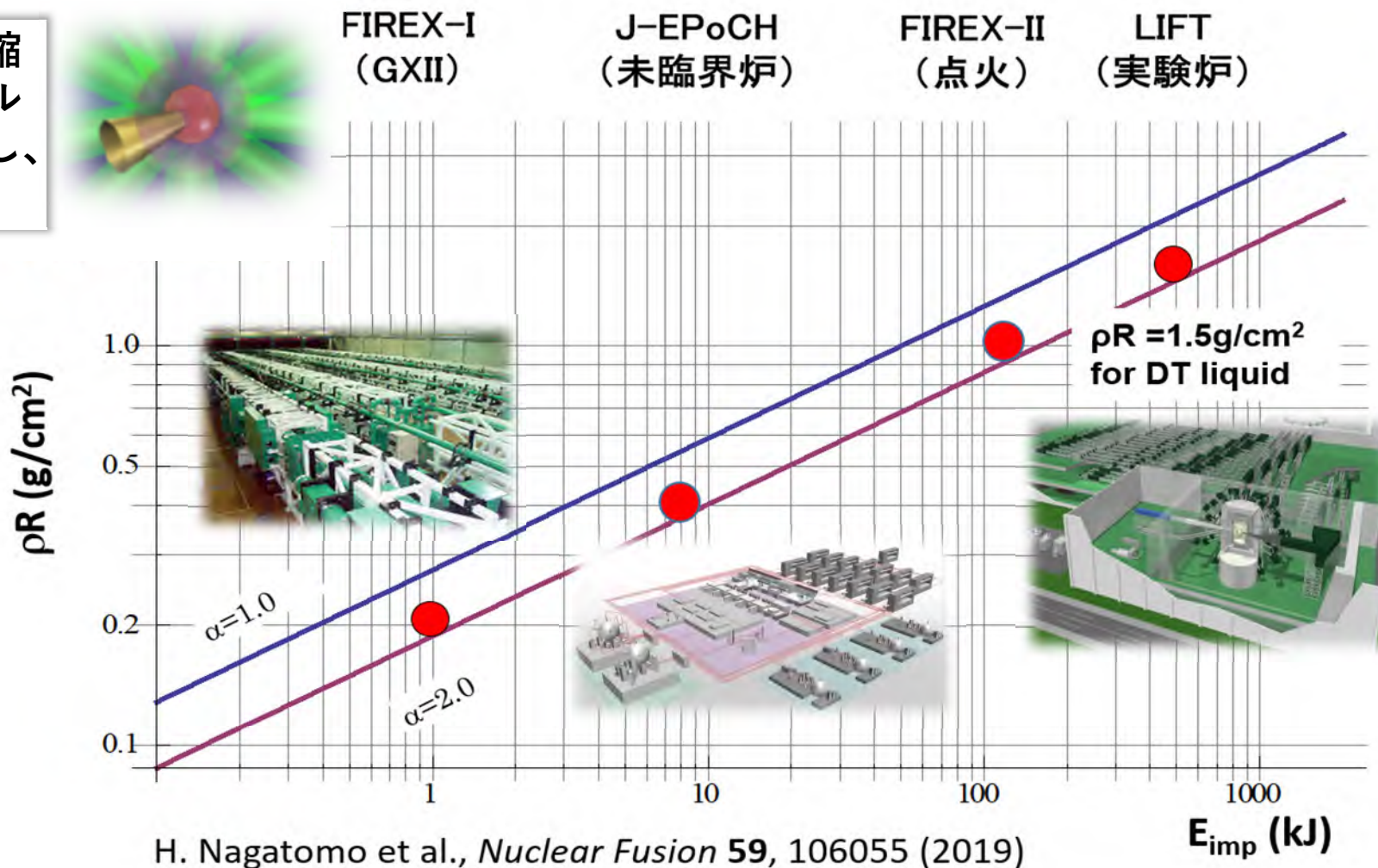
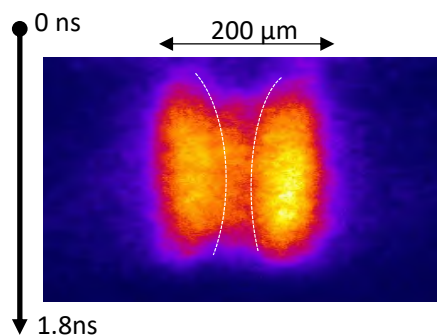
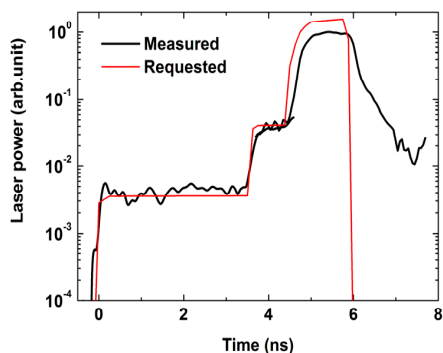
中空シェル
(従来型)

高速点火方式だからできる中実球による安定な爆縮実験に成功



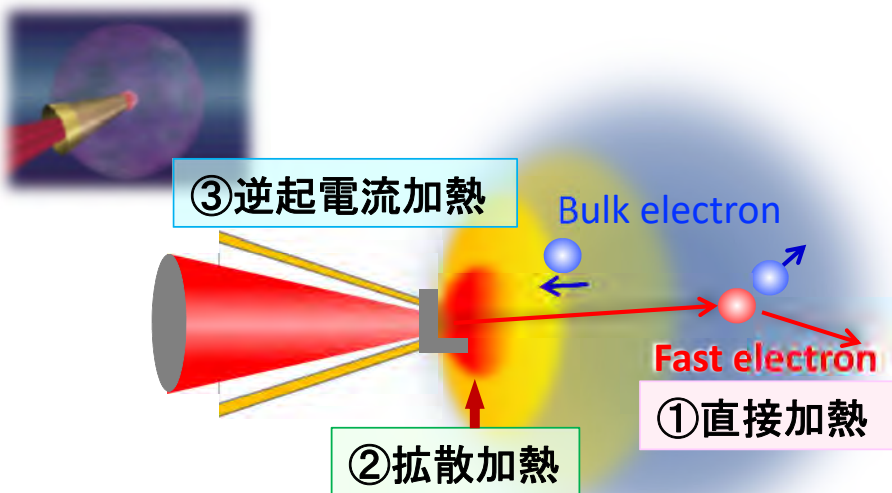
新手法で実験炉に必要な爆縮を予測 (2次元シミュレーション)

点火に必要な高密度圧縮を実現するレーザーパルス波形成型技術も確立し、爆縮実験にも成功



H. Nagatomo et al., *Nuclear Fusion* 59, 106055 (2019)

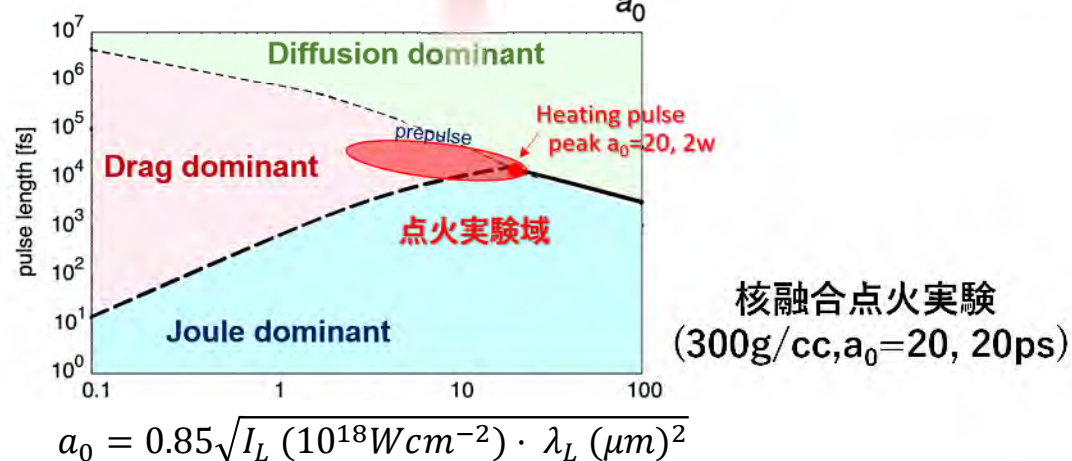
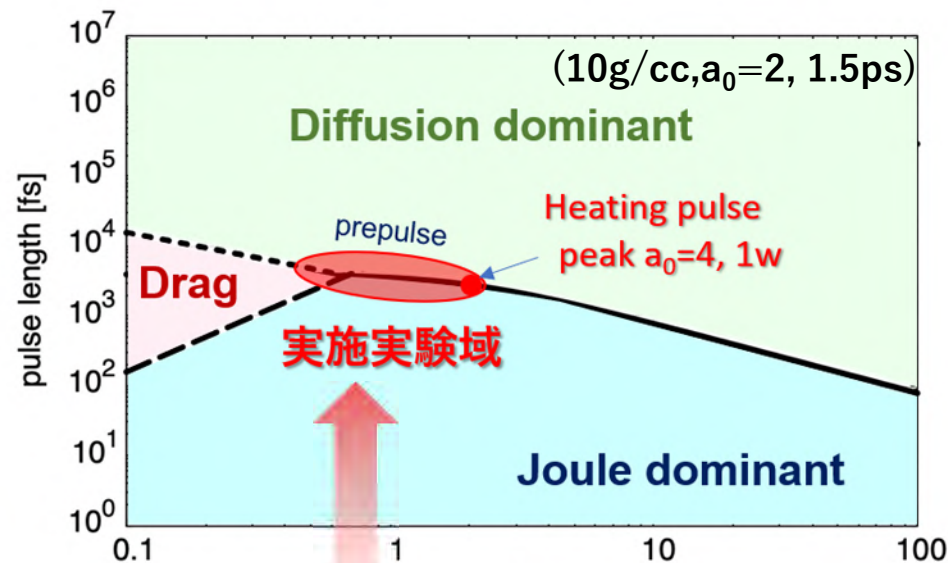
高速点火方式における加熱物理：点火条件を見据えた加熱実験



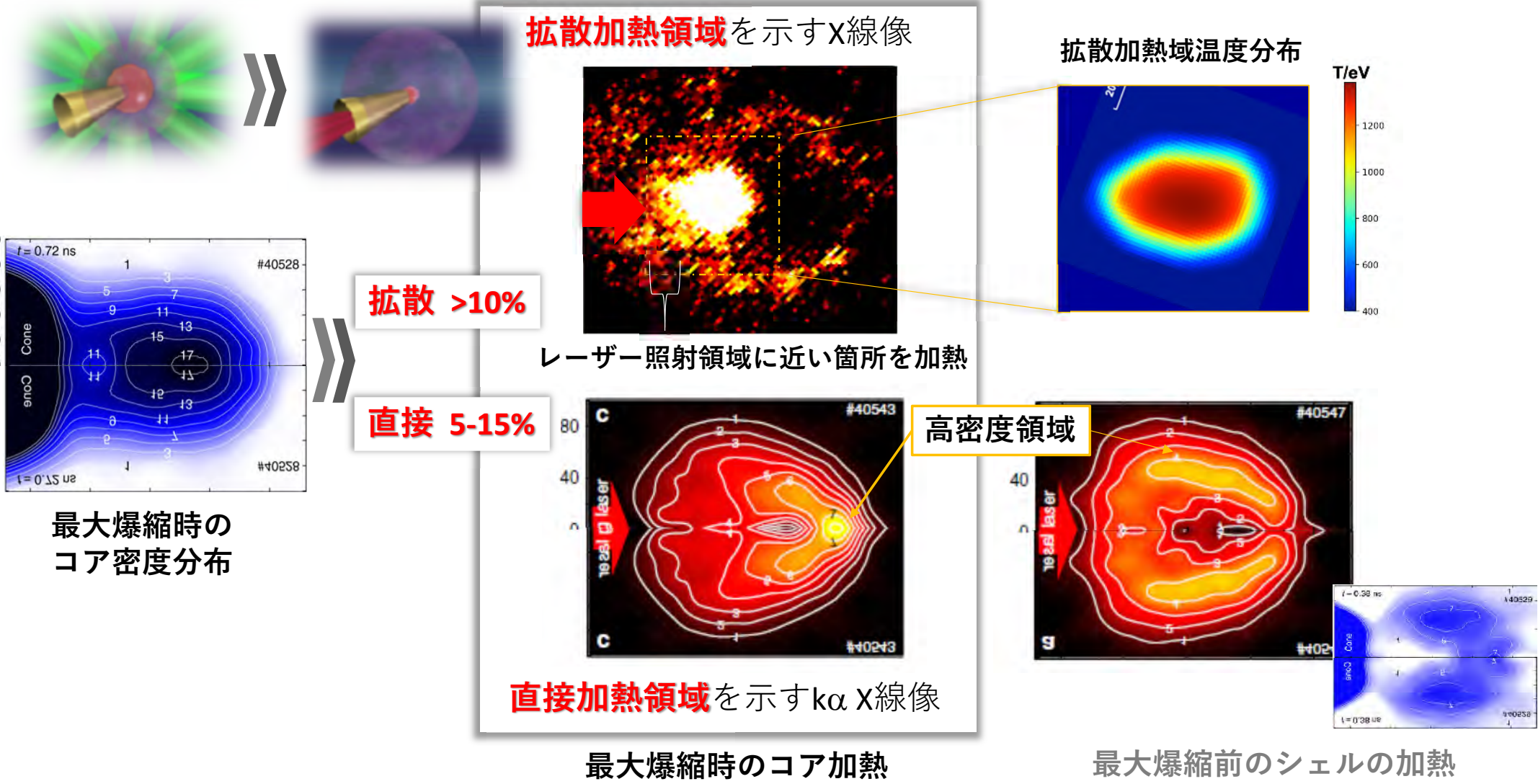
$$\frac{3}{2}n_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{3}{2} \frac{n_h T_h}{\tau_e(T_h)} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) + \frac{j_h^2}{\sigma(T_e)}$$

- ① 燃料の高密度化で結合効率の増加 $\propto \frac{\gamma n_c \rho}{T_h^{3/2}}$
- ② 加熱時間の増加で結合効率の増加
- ③ 燃料加熱には不十分な飛程

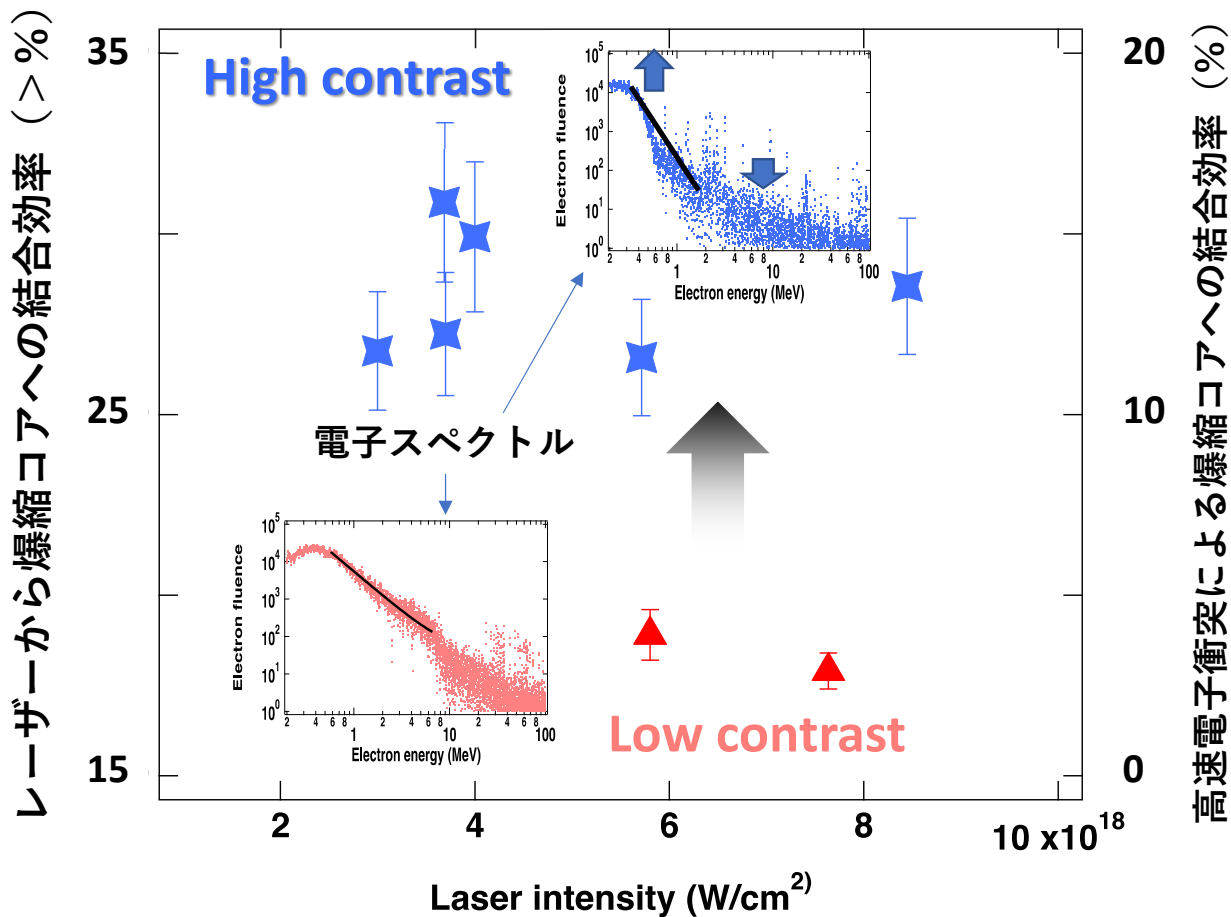
支配的な加熱機構マッピング (FIREX加熱実験)



直接加熱は高密度領域に、 拡散加熱はレーザー照射面に近い箇所を効率的に加熱



直接加熱の効率を上げるには、コア密度を上げるとともに、コア面密度に最適な温度（スペクトル）の高速電子を生成する必要がある



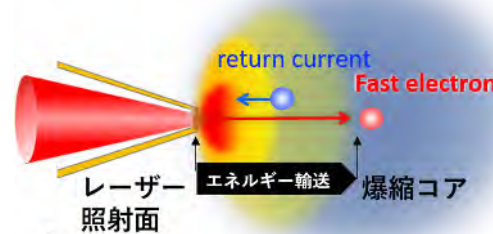
- ✓ 高コントラストレーザーパルス技術の確立
- ✓ 短波長パルス化技術の確立

衝突加熱の特性を考慮し、より温度の低い高速電子を生成することで、より高い結合効率を実証

拡散加熱の割合 (10g/cc, 1.5ps)

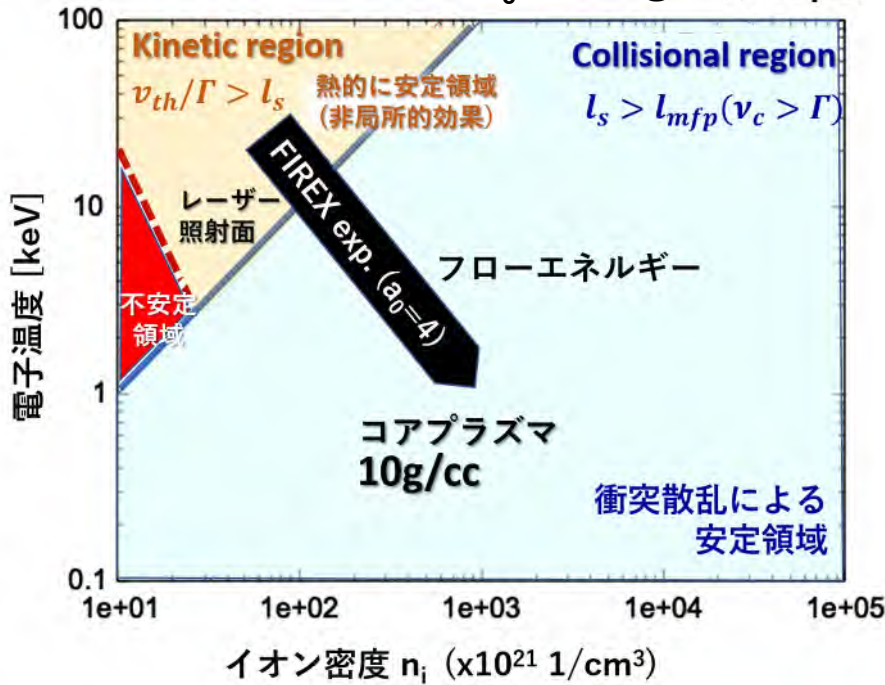
実験：>10%
シミュレーション：~15%

現在の爆縮コア加熱実験と同様に将来の点火実験でも、 電子エネルギーは安定にコアに輸送される領域となる。

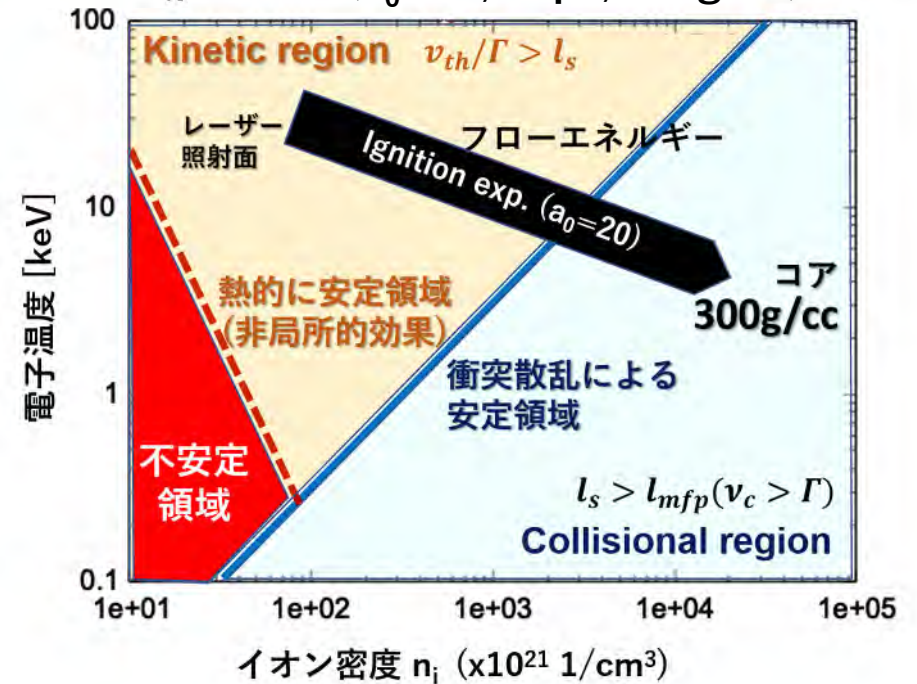


Γ : ビーム不安定性の成長率 [1/s]
 l_s ; プラズマの表皮長 [m]
 l_{mfp} : 平均自由行程 [m]
 v_{th} ; 熱速度 [m/s]

現在のコア加熱実験 ($a_0=4$, 10g/cc, 1.5ps)

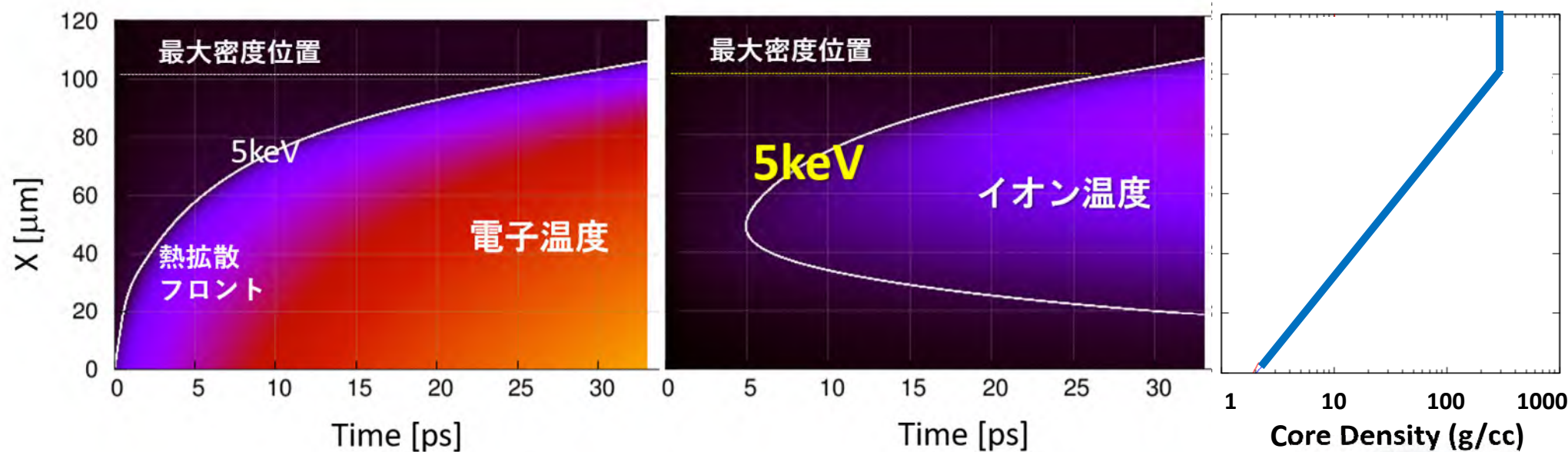


点火実験 ($a_0=20$, 20ps, 300g/cc)



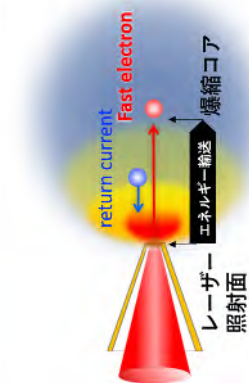
注釈：電流中性化を仮定しリターン電流のフローエネルギーを温度と評価

2 ω (200kJ)の加熱レーザーにより 300g/ccのコアを20ps程度加熱することで、点火イオン温度5keV以上を予測



下記 加熱式を数値的に解いて300g/ccでの加熱を評価
(イオン加熱・輻射ロスを考慮)

$$\frac{3}{2} n_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{3}{2} \frac{n_h T_h}{\tau_e(T_h)} + \frac{j_h^2}{\sigma(T_e)} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial x} \right)$$



レーザー核融合高速点火に関する総括

■ 核融合パフォーマンス

- ・ 従来方式である中心点火方式の**10倍の効率**で核融合積を実証

■ 高密度縮

- ・ 高速点火方式に適した**安定な核融合燃料爆縮法**：中実球爆縮法を考案し、2Dシミュレーションで再現できる爆縮性能を実証
- ・ **流体不安定性がほとんどなく**レーザー不均一照射（タイミングずれ）の影響が少ない
e.g. 50psのビーム間タイミングの影響は、爆縮密度を10%下げる程度
- ・ 中実球で点火に必要な高密度爆縮を実現するためのレーザーパルス波形成型**技術を確立**し、爆縮実験を実証
- ・ 実験との一致を見た**2D爆縮シミュレーション**で核融合点火燃焼、**実験炉に必要な密度を実現**

■ 爆縮プラズマ加熱

- ・ 核融合点火条件での加熱物理機構を考慮した条件下での**効率的な加熱に成功**
i.e. 爆縮コアプラズマへの結合効率：～30%
- ・ レーザー生成高エネルギー電子による高密度プラズマ**加熱の物理機構を解明**
i.e. 核融合点火に必要な主加熱機構は直接衝突加熱と拡散加熱
- ・ 効率的な加熱を実現するための**技術**（レーザー短波長化、パルスペデスタル抑制）を**確立**した。
- ・ **安定なエネルギー輸送が可能な条件**下で、核融合点火に必要なイオン温度を実現できる条件を明らかにした。

■ その他

- ・ 高速電子加熱法以外に、イオン加熱、衝撃波加熱、インパクト加熱、プラズマフォイスラー波加熱など多様な手法の研究も実施している。
- ・ レーザー駆動超高磁場は、加熱初期の電子ガイドなどで有効であるが、将来の点火燃焼に必要な加熱時間では、自己生成磁場がより効果的であることがシミュレーションで明らかになってきた。

レーザー核融合研究のマイルストーンとステップ



◆ わが国が導いたマイルストーン

- ✓ レーザー核融合に必要な温度・密度は、別々に達成
- ✓ 高速点火方式の有効性を実証

1986	核融合点火に必要な超高温達成（1億度） (e.g. C. Yamanaka et al., Nature 1986)
1991	核融合点火に必要な超高密度達成（固体密度の600-1000倍） (e.g. H. Azechi et al., Laser Particle Beams 1991)
2001	高速点火方式の原理実証 (e.g. R. Kodama et al., Nature 2001)
2016	高速点火方式だからできる安定な爆縮新手法発見 (e.g. S. Fujioka et al, Phys. Rev. E, (2015), H. Sawada et al., Appl. Phys. Lett. 2016)
2020	加熱物理の解明と中心点火方式の>10倍の効率を実証 (e.g. K Matsuo, et al., Phys. Rev. Lett. 2020)

次の20年は？

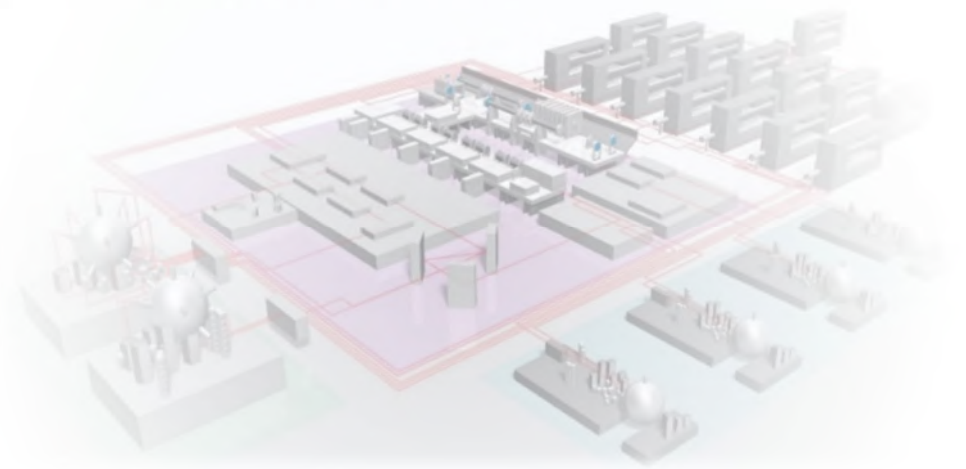
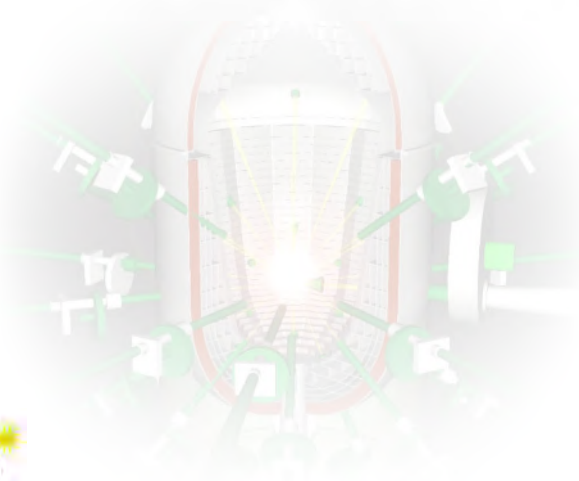
① 点火燃焼の物理（核融合点火数値実験）

② レーザー核融合定常運転実証（発電実証）

これからのレーザー核融合研究

① 点火燃焼の物理（核融合点火数値実験）

② レーザー核融合定常運転実証（発電実証）



レーザー核融合における核融合燃焼物理の課題

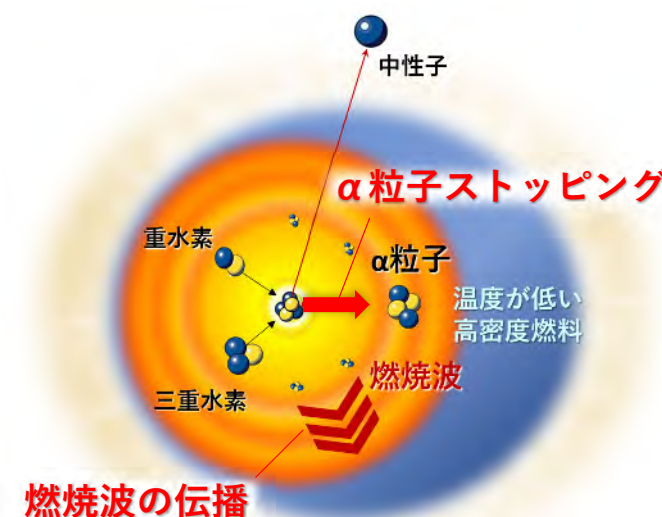
■ 高密度のプラズマ中で α 粒子のストップング

- 燃焼物理の要である高密度プラズマ中の α 粒子ストップングは十分に理解されていない。
- 最近の実験結果では、高密度プラズマ中では、従来モデルに比べて20%程度止まりやすくなったことを示している。
- これまでに比べて、レーザー核融合点火燃焼のしきい値を下げる可能性がある。

[1] C. K. Li and R. D. Petrasso, PRL 70, 3059 (1993), PRL 70, 3059(E) (1993); 114, 199901(E) (2015)

[2] L. S. Brown, D. L. Preston, and R. L. Singleton, Jr, Phys. Rep. 410,237 (2005)

[3] J. A. Frenje et al., PRL 122. 015002 (2019)



■ 燃焼波伝播の安定性

- レーザー核融合の燃焼波の伝播は、爆轟波(デトネーション)的なものとなる。
- 核融合燃焼波は完全なデトネーション波にはならず、高々30%程度の燃焼率と予想されている。
- 燃焼波面の擾乱は、熱的平滑化効果[4]が働き、擾乱面を平滑化されると予測されている。

[4] Takabe, H., Ishii, T., Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993) 5675.

実験的検証の必要性

高密度燃焼プラズマ実験が、世界で唯一可能な米国NIF施設の実験への参加が不可欠
我が国の世界最速（ピコ秒の時間分解）の中性子計測器[5]による短時間の核融合燃焼診断が最も有効

[5] Y. Arikawa et al. Rev. Sci. Inst. 91, 063304 (2020)

日米科学技術協力による核融合燃焼物理へのアプローチ

日米科学技術協定
DOE and MEXT (2019.1.23)

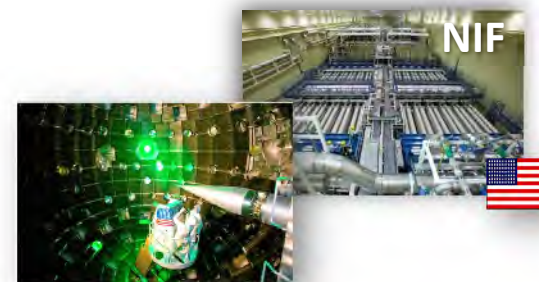
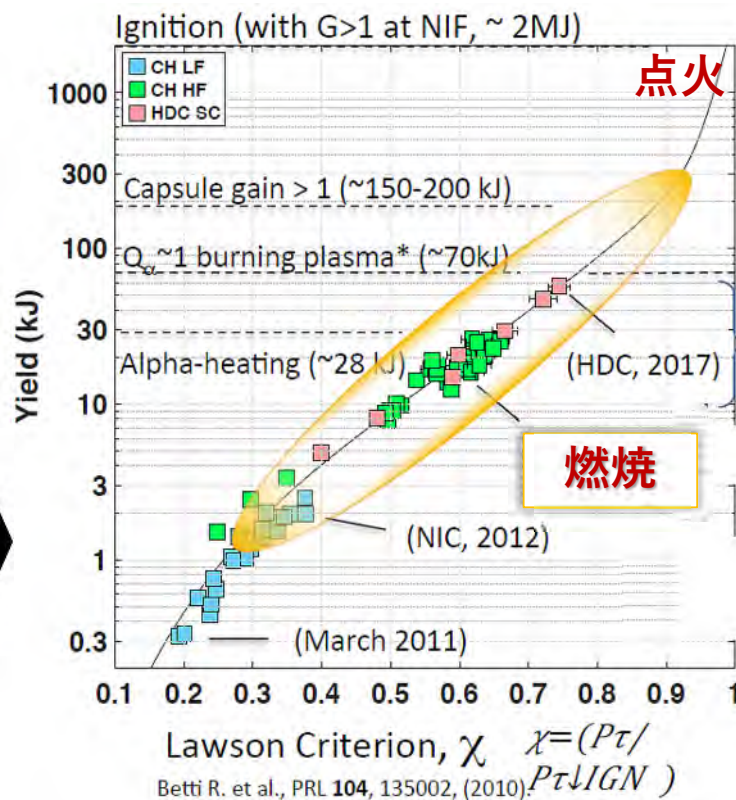


MW-MJ 連携構想の合意

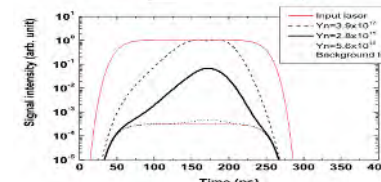
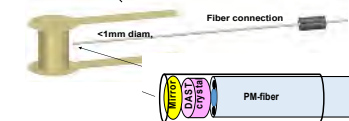


2020.1.6@LLNL

左から NIF施設長、ILE国際連携室長、千徳教授、LLNL副所長、ILE所長、LLNL所長、他



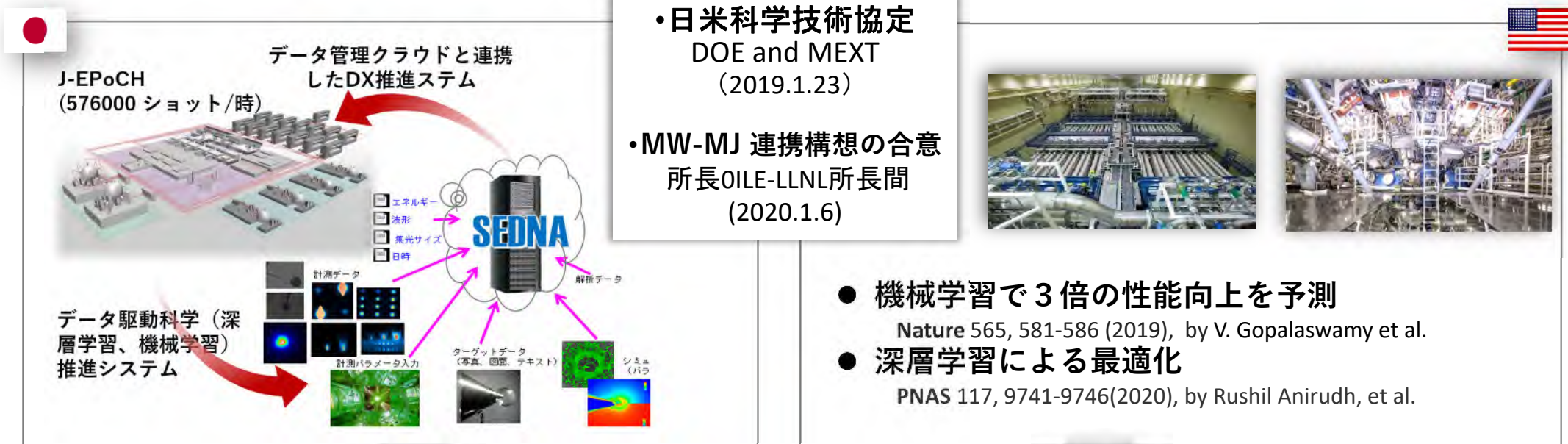
我が国の技術（超高速時間分解中性子計測機）を活用した燃焼物理実験



Rev. Sci. Inst. 91, 063304 (2020)
Y. Arikawa et al.

日米連携で核融合燃焼実験のデータベース

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

FIREX-NEO
FIREX Numerical Experiment Optimization

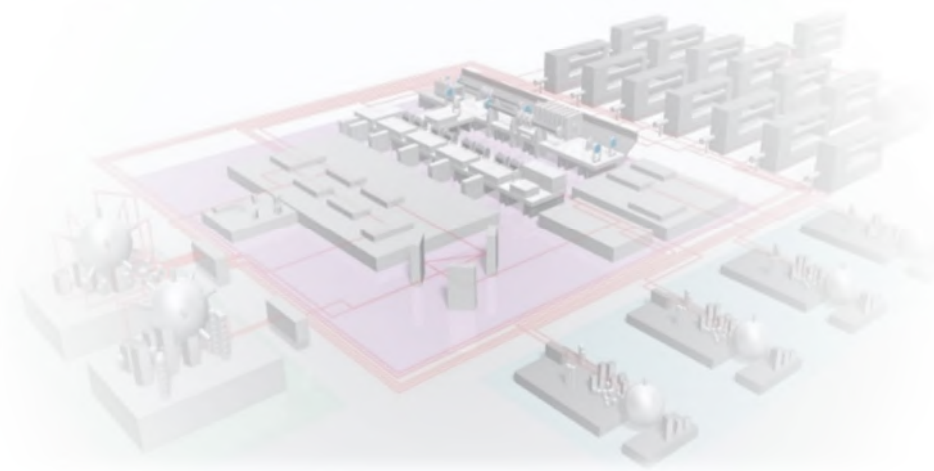
数値実験による核融合点火を実現

FIREX Numerical Experiment Optimization

これからのレーザー核融合研究

① 点火燃焼の物理（核融合点火数値実験）

② **レーザー核融合定常運転実証（発電実証）**



新たな技術を取り入れた我が国の独自戦略

■ レーザー核融合炉心プラズマ研究で、マイルストーンを築いてきた我が国の実績

- 1985-1986: 核融合点火に必要な超高温(1億度)達成
- 1989-1990: 核融合燃焼に必要な超高密度達成(固体密度の600-1000倍)
- 2000-2001: 高速点火方式の原理実証
- 2018-2020: 従来方式(米国)の>10倍の効率を実証

米国、仏国、中国などでも数100-1000億円以上を超える予算を投入し、超大型レーザー施設を建設

■ 繰り返しパワーレーザーに関する技術の急激な進展

日本の強みを集約



大量(30万個)の日本の半導体レーザーの利用



日本のレーザーセラミック利用

新しい技術でゲームチェンジ

高速火方式



J-EPoCH
多目的高繰り返し
大型パワーレーザー

「レーザー核融合発電炉実現を目指した研究開発とコ・クリエーション*」

定常運転により炉工学と炉心プラズマ研究の両輪を世界に先駆けて推進

50年前の技術の延長(シングルショット、炉心プラズマのみ)

中心点火方式



SG-II-U

2020.1、中国では高速点火を目指した1000億円の新たなプロジェクトがスタート



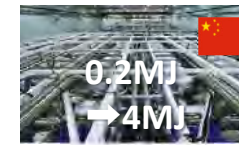
2.2MJ
NIF



1.3MJ
LMJ



30kJ
OMEGA



0.2MJ
→4MJ
SG-III



フラッシュランプ



ガラスレーザー

点火燃焼実証をして、その後に炉工学の定常運転の実証

*新たな価値創造の源である高エネルギー密度科学や社会問題解決に役立つパワーレーザー科学

日本の技術で世界一の繰り返し大型パワーレーザー施設を実現し、 極限量子を開拓するとともに世界一の頭脳循環システムを構築

未知未踏の
極限量子の開拓

100兆気圧 (温度無)

真空の量子

1000億気圧 (>5千万度)

量子のエネルギー

1億気圧 (<1万度)

第3の量子物質

world's highest
Averaged Power

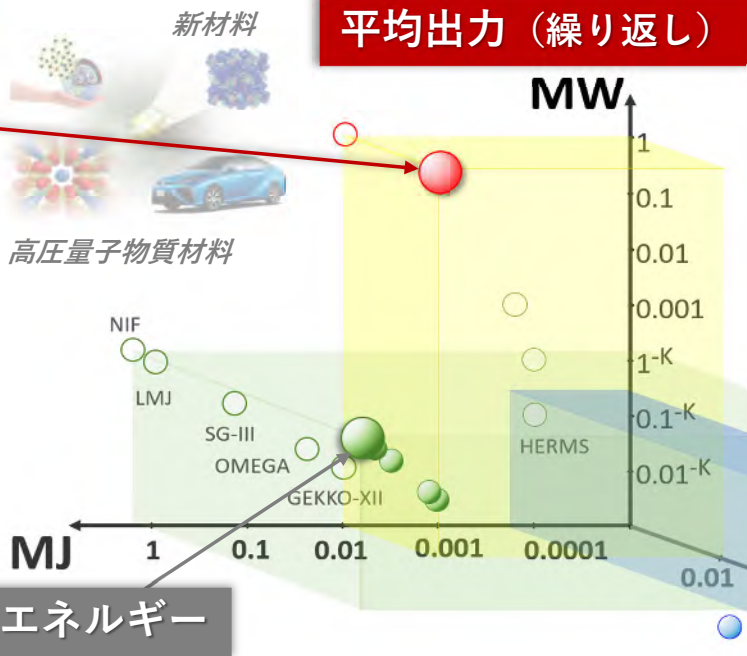
J-EPoCH

宇宙デブリ 巨大惑星コア

核融合ロケット

核融合エネルギー

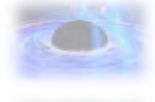
world's highest
Energy



恒星プラズマ

超新星爆発

時空の歪み



太陽フレア

宇宙ジェット

元素合成

J-EPoCH

平均出力世界一

ピーク強度世界一

Power Laser Triangle

日米政府間協定
大学間協定
連携オフィス

部局間協定
恒久連携オフィス

NIF

エネルギー世界一

eli

世界一の頭脳循環システム

world's highest
Peak Power

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/m² sec

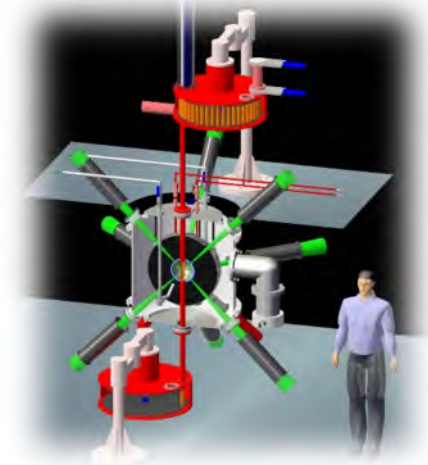
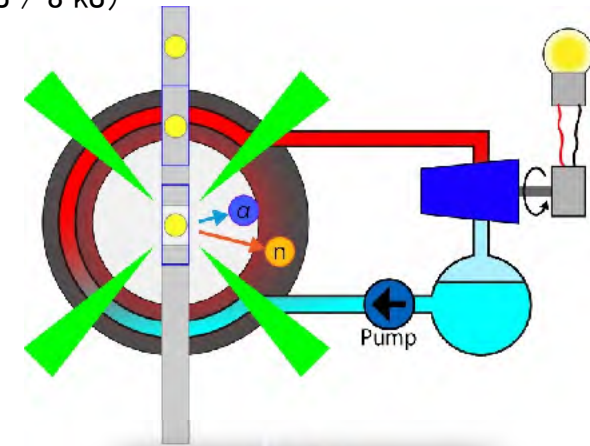
トリチウム増殖: 核融合燃料増殖技術

- 発生トリチウム数: 3.8×10^{13} 個/100 shots
- 発生放射能: 6.8×10^4 Bq
 - TBR: 6.8×10^{-6} ($3.8 \times 10^{11} / 5.6 \times 10^{16}$ [/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系統を再現できる
- 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



レーザー核融合推進のための2つの委員会からの支援

■ オールジャパンによるレーザー核融合戦略会議（中長期）

IFEフォーラム（レーザー核融合技術振興会支援）に、コミュニティ委員会としてレーザー核融合炉を目指し中長期的視点に立った検討を行う委員会

- レーザー核融合発電炉を見越し次世代研究者を中心としたオールジャパン体制
- 委員：32名（13機関）+オブザーバー（7名：2機関）：IFEフォーラム支援
- 7つのワーキンググループ（炉物理・工学、レーザー、ペレット、炉心プラズマ、TRL評価、アウトリーチ、リソース）による検討



■ FIREX国際アドバイザーボード（短中期：炉心プラズマ）

国際的・俯瞰的な見地からFIREXの進め方、結果、方向性に関して評価・アドバイスをいただく委員会（レーザー科学研究所長諮問会議）

座長： ルーマニア欧州超高強度レーザー研究所・所長

幹事： 光産業創生大学院大学・准教授

米国ロチェスター大学レーザーエネルギー所・教授

電気通信大学・教授

自然科学研究機構核融合科学研究所・教授

量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所・上席研究員

まとめ

■ レーザー核融合高速点火実現へ向けたこれまでの成果まとめ

- 高速点火方式により、従来方式である中心点火方式の**10倍の効率**を実証
- 高速点火方式に適した**流体不安定性がほとんどない安定な核融合燃料爆縮法**：中実球爆縮法を考案し、爆縮実験を行うとともに点火燃焼に必要な技術を確認し、2D爆縮シミュレーションで核融合点火燃焼、実験炉に必要な密度を実現
- 核融合点火条件での加熱物理を理解し**効率的な加熱に成功**（爆縮コアエネルギー/レーザー～30%）するとともに、効率的な加熱を実現するための**技術**（レーザー短波長化、パルスペDESTAL抑制）を**確立**した。
- **安定なエネルギー輸送が可能な条件**下で、核融合点火に必要なイオン温度を実現できる条件を明らかにした。

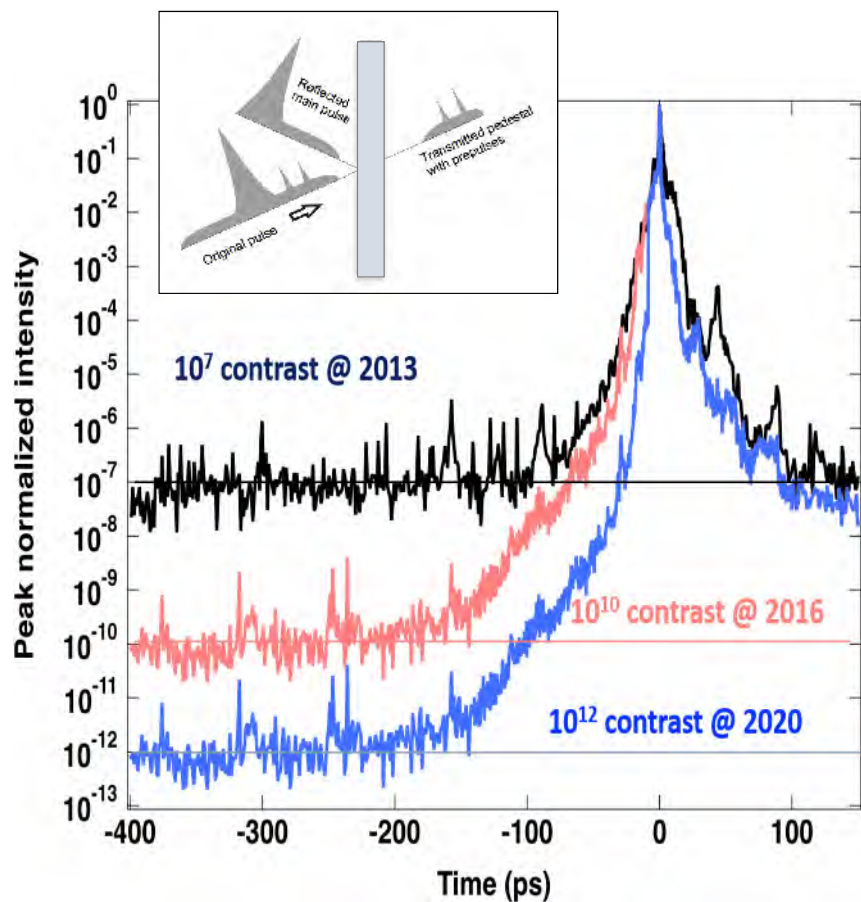
■ これからのレーザー核融合研究開発に関する計画

- レーザー核融合**燃焼物理の解明**を目的とした**国際連携**が開始された。
- 日本の技術を集約した**国際競争力ある高繰り返し大型レーザー装置の提案**とそれによる**核融合点火数値実験**や**レーザー核融合未臨界発電炉**ならびに**核融合炉工学への貢献**を示した。

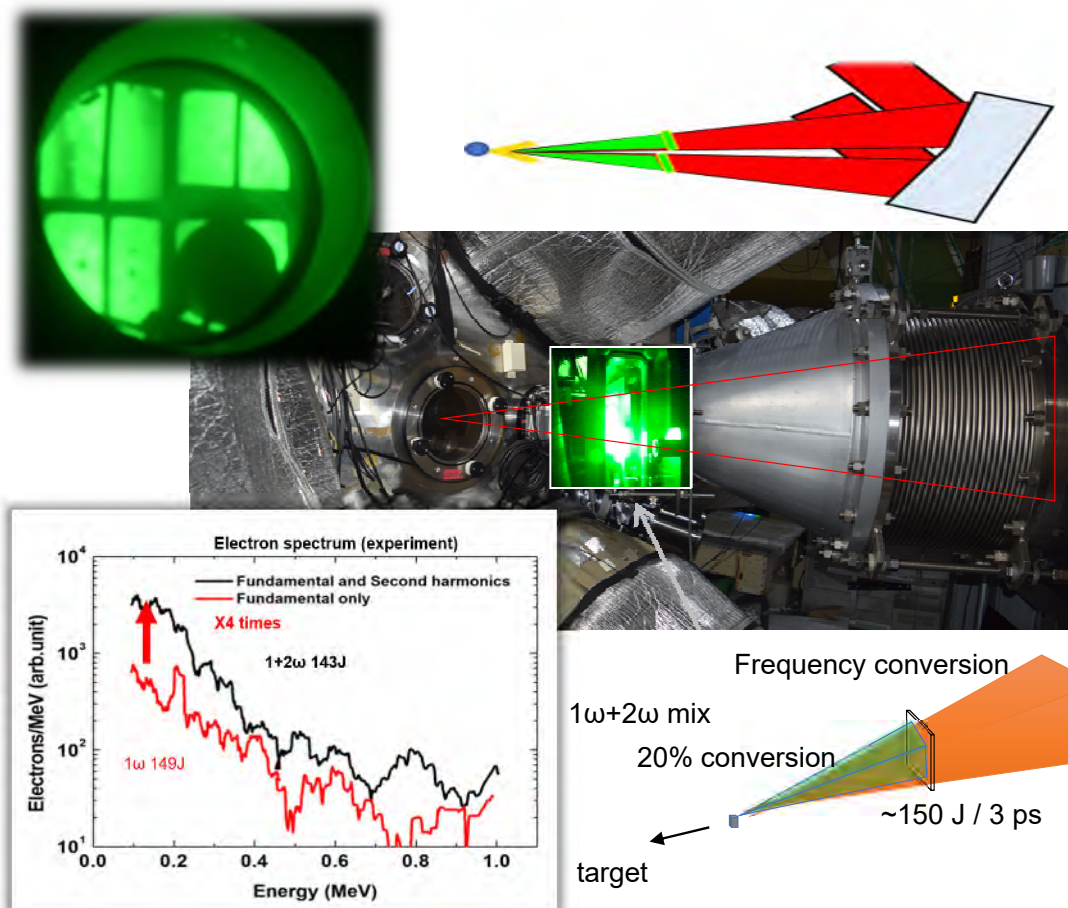
參考資料

効率的な加熱を実現するためのレーザー関連技術の確立

レーザーのパルスコントラストを大幅改善できるプラズマミラー技術の確立

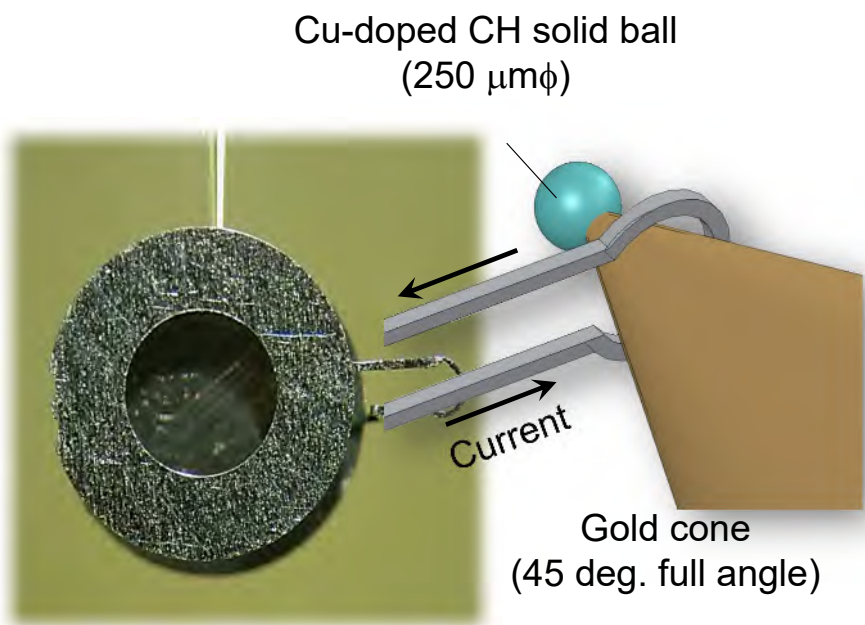


高速点火加熱に適したMeV以下の高速電子を効率的に生成するための超高強度レーザー波長変換技術の確立

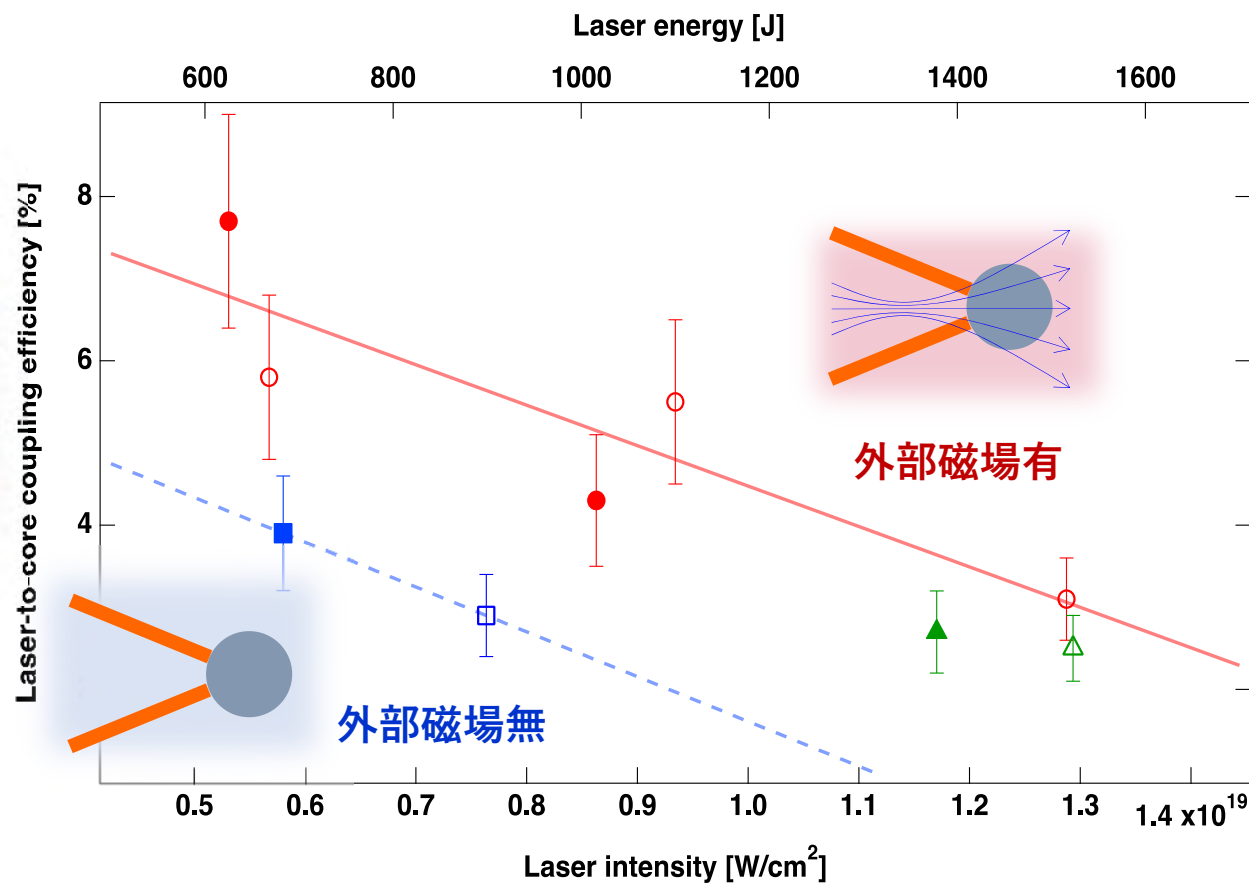


【参考2】 加熱初期（ $\sim ps$ ）に重要なレーザー駆動超高磁場による高速電子ガイドにより、高速電子衝突加熱の効率を上げることに成功

高速電子衝突によるコアへの結合（拡散加熱は含まれない）

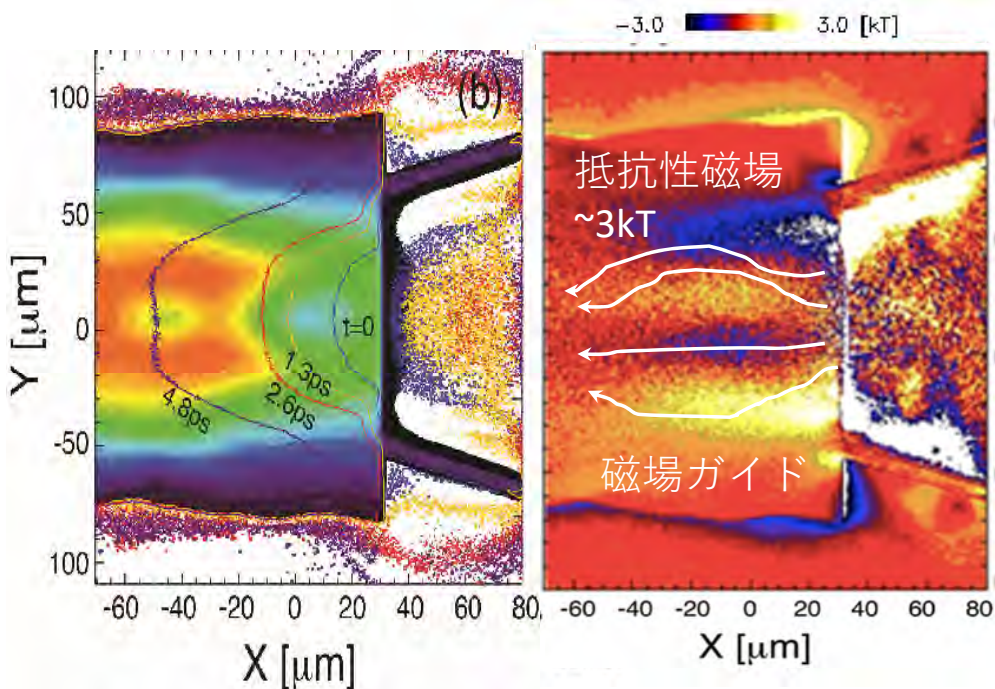


Capacitor-coil for REB manipulation
S. Fujioka+, Sci. Rep. 2013.



【参考3】 高温プラズマ領域では、ビーム不安定性による磁場は成長せず、周辺に成長する抵抗性磁場が高速電子をガイドし高密度領域へのエネルギーを輸送

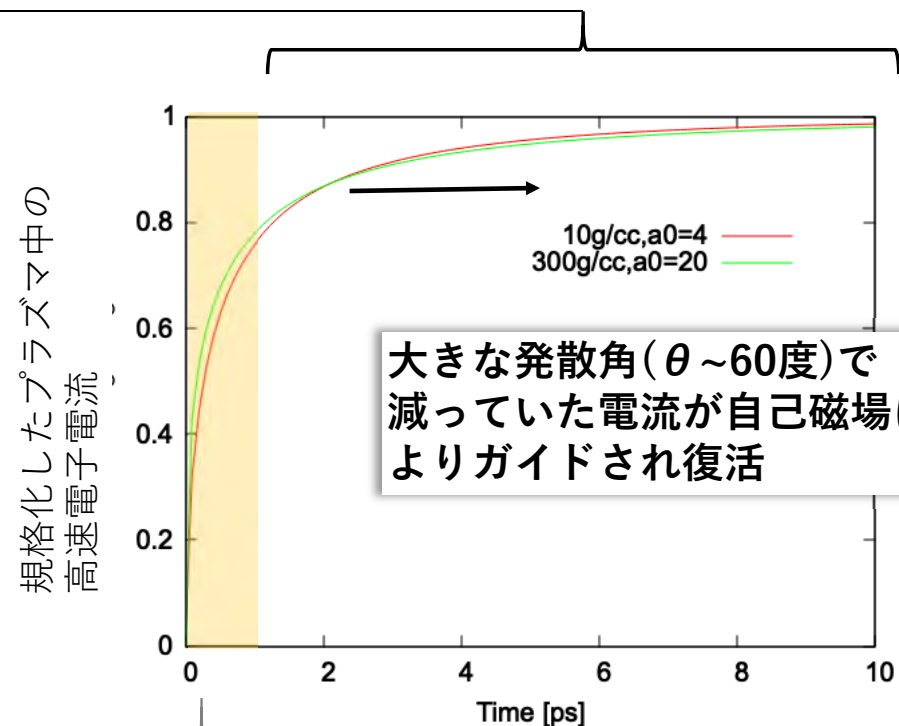
抵抗性磁場と電子ガイド



抵抗性磁場のスケーリング

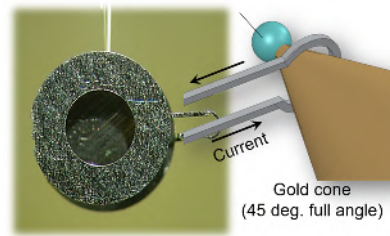
$$B_{R \max}(t)[MG] \simeq 0.11 \frac{\bar{n}_i^{0.6} L^{0.4}}{r_0[\mu m] \gamma^{0.2}} \bar{t}^{0.4} Z_f \cos\langle\theta\rangle,$$

P. Leblanc and Y. Sentoku, PRE 89, 023109 (2014)



規格化したプラズマ中の高速電子電流

大きな発散角($\theta \sim 60$ 度)で減っていた電流が自己磁場によりガイドされ復活



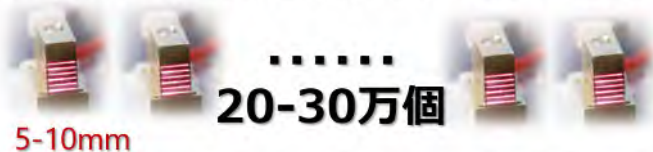
加熱初期 (~ps) に重要なレーザー駆動超高磁場

世界初の多機能大型繰り返しメガワットレーザーシステムで パワーレーザー競争のゲームチェンジ！

1時間に1ショットから1秒間に100ショットの技術革新が生み出す世界一のレーザー施設

- 未知未踏の極限量子を開拓できる世界一の繰り返し大型レーザー
- ビッグサイエンスから“ダイバーシテイサイエンス”へのパラダイムシフト
- ポストコロナに適した、世界初の分散型大型スマートレーザー施設

大量の小さな大出力光源 (LD : 10MW)



日本の半導体レーザー企業へ還元

100Hz/160beams

J-EPOCH

Japan Establishment for a Power-laser Community Harvest

50-100m

未知未踏の 極限量子の開拓

100兆気圧 (温度無)

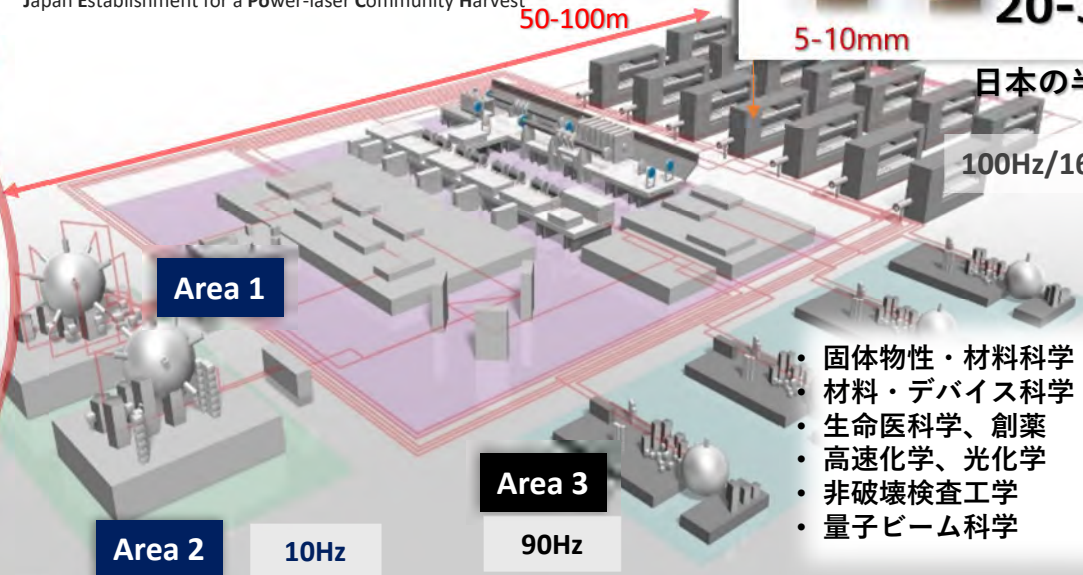
真空の量子

1000億気圧 (>5千万度)

量子のエネルギー

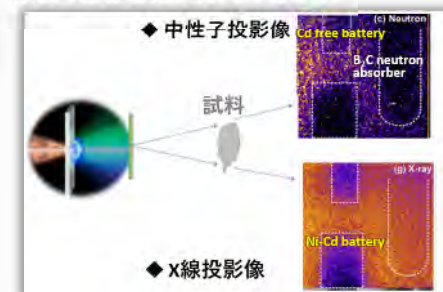
1億気圧 (<1万度)

第3の量子物質



- 固体物性・材料科学
- 材料・デバイス科学
- 生命医科学、創薬
- 高速化学、光化学
- 非破壊検査工学
- 量子ビーム科学

新たな放射光システム



学術フロンティアを切り拓く
ビッグサイエンスエリア

パワーレーザーとレーザーによる高輝度テラヘルツ・X線・中性子
ビームを利用できる多目的エリア(スモールサイエンス)

世界一の繰り返し大型レーザーで、 未知未踏の極限量子の世界を切り拓く！

● 見えない“真空の量子”を探る

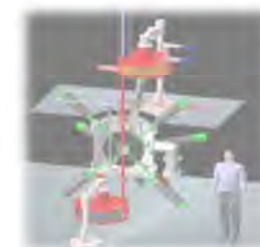
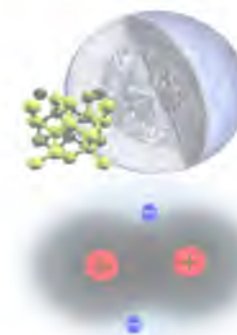
- ・時空への挑戦：プラズマと超高強度レーザーで、“時空の歪み”を探查
- ・電場の物理限界への挑戦：プラズマと超高強度レーザーで“真空の量子”を探る

● “第3の量子物質”を生み出す

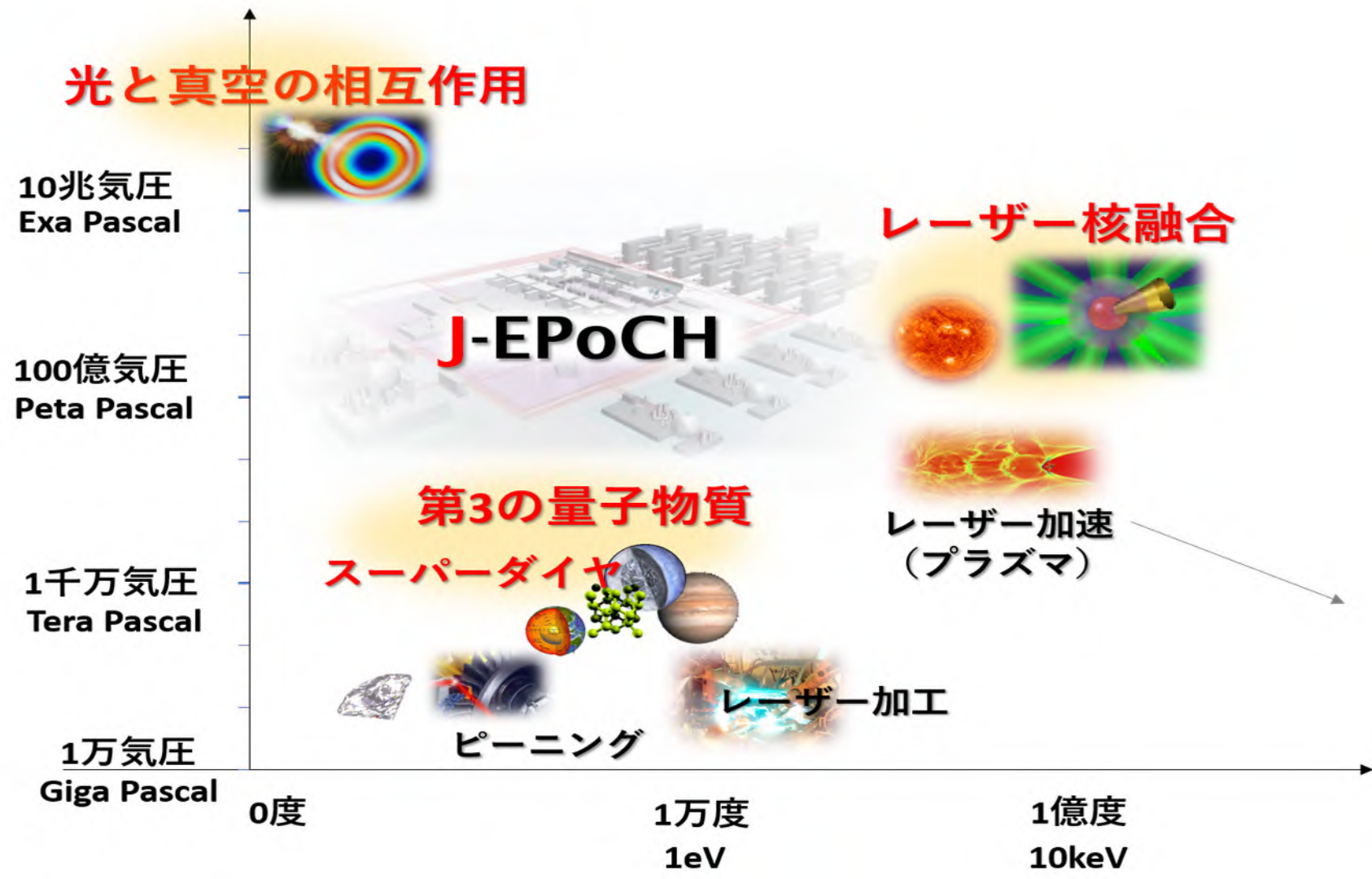
- ・スーパーダイヤモンドを創る：高出力レーザーで、1000万気圧のスーパーアースコアや“超高圧新材料”を生み出す
- ・高圧量子新物質創生：1億気圧で、極低温、極小に次ぐ、全く新しい“第3の量子物質状態”を創生

● “量子のエネルギー”を解き放つ

- ・人類初の未臨界核融合発電炉の実現：繰り返し高出力レーザーで、定常な核融合反応と発電の実証とレーザー核融合炉工学の創始
- ・国際連携で核融合点火数値実験：日(J-EPoCH)/米(NIF)連携で、核融合燃焼物理を理解し、数値実験点火を目指す



極限的に高い圧力の極限量子の世界（高エネルギー密度状態）



極小の世界、極低温の世界に次ぐ第3の量子状態

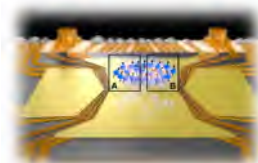
極小の世界：

ファイマン、久保良悟（1960年前後）によるナノの世界
 江崎玲於奈による超格子の提案（1969年）
 谷口紀男による「ナノテクノロジー」提唱（1974）
 日(2001)米(2000)で「ナノテクノロジー」を重点分野とする。



極低温の世界：

超電導の発見（1911年；ノーベル賞1913年・1972年）
 超流動の発見（1938年；ノーベル賞1962年）
 BEC*の予言（1925年）と実現（1995年；ノーベル賞2001年）
 量子戦略（2020年）、超高精度GPSを目指したアトムチップ



*BEC:ボーズアインシュタイン凝縮

➡ 超高压の世界（未踏：極限量子固体）：

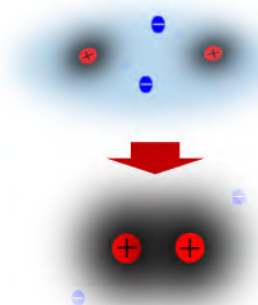
パワーレーザーで、固体を**1億気圧の高密度**に圧縮し、原子間隔が物質特有の波長より短く、非常に縮退した**新たな量子状態（第3の量子状態）**を実現する。

炭素が金属なったりアルミニウムが透明になるなど、これまでの常識を覆すような新しい高機能単純構造物質や複雑構造物質さらに新しい絶縁体 - 金属転移物質を創生する。

2109年米国政府は、本テーマでロチェスター大学レーザーエネルギー学研究所*に4億円/3年を支援

*ロチェスター大学レーザーエネルギー学研究所は、2018年ノーベル物理学賞となった技術の生まれた研究所である

電子軌道が重なる



原子同士が重なる

これまでの取り組みと今後の課題

創生期 (2015-2016)	2015.12.24	パワーレーザーコミュニティ会議(延べ1000名規模のメーリングリスト) で、高エネルギー密度科学新展開の重要性を議論するとともに体制の検討を開始 推進体制キックオフ(阪大-QST協定)
	2016.11.24	
過渡期 (2017-2018)	2017-2018	レーザー学会技術専門員会でのJ-EPoCH概念設計 物理系のコミュニティの意見を取り入れた装置仕様 概念設計最終案合意 IFEフォーラムにレーザー核融合戦略会議設置(ロードマップ検討)
	2018.11.28	
	2018.11.27	
発展期 (2019-2020)	2019.1.23	日米政府間科学技術協定、9番目の新たな枠組み「パワーレーザーによる高エネルギー密度科学」 パワーレーザーフォーラム(2018.11.1)に次期大型レーザー建設委員会設置し、装置基本設計開始 (産業界の支援)
	2019.1.28	
	2019.3.31	学術会議マスタープラン2020提案
	2019-2020	レーザー学会に新たな技術専門員会設置し、基本設計ならびに 分野拡大(産業界の支援)
	2019.5.22	日本学術会議に総合工学委員会エネルギーと科学技術に関する分科会 ハイパワーレーザーによる高エネルギー密度科学 小委員会を設置
	2019.9	学術会議ヒアリング
2020.3.31	文部科学省ロードマップ 提案	
成熟期 (2020-)	2020.6.16	日本学術会議提言「パワーレーザー技術と高エネルギー密度科学の量子的飛躍と産業創成」 IFEフォーラム・有識者会議専門員会 IFEフォーラム有識者会議提言第2弾へ向けた取り組み開始 IFEフォーラム・レーザー核融合戦略会議報告書(ロードマップ策定)
	2020.8.6	
	2020.9.30	



様々な
ステークホルダー



今後の課題： 他分野・産業界からの支持と国民の理解

研究計画・評価分科会における 研究開発計画と分野別研究戦略・計画（案）との関係

【現在】 【令和3年度以降】

	研究開発計画	分野別研究戦略・計画(案)
位置づけ	第5期科学技術基本計画の第2章「未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組」及び第3章「経済・社会的課題への対応」に関する研究開発課題に対応するための計画。今後10年間を見通し、概ね5年程度が計画対象期間。	総政特最終取りまとめ第8章「研究開発の総合的な推進」に符合するものとする内容とする予定(今後、次期科学技術・イノベーション基本計画の策定を見据え再検討の予定)。
主な内容	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 各分野の範囲・粒度については、<u>文部科学省の政策評価体系(施策目標)と章立て(中目標)を出来るだけ一致させている。</u> ✓ 記載内容は、概ね、中目標毎に、① 重点的に実施すべき研究開発の取組と、② 留意すべき推進方策(人材、オープンサイエンス、オープンイノベーション、知財戦略等、社会との関係深化、研究基盤、区内外の研究ネットワーク強化、分野融合の推進など)を記載。 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 各分野の範囲・粒度については、<u>これまでの経緯や効果的なフォローアップや評価が可能となることを考慮して、各分野別委員会において個別に設定してはどうか。</u> ✓ 記載内容は、各分野における研究開発推進の必要性、重点的・戦略的に取り組むべき研究開発領域やそれに基づく計画、② 各分野に共通する横断的な留意事項、を記載してはどうか。<u>(総政特最終取りまとめや次期科学技術・イノベーション基本計画の内容も踏まえ、文科省全体の分野の捉え方や分野間の平仄や整合性を図るかについては、今後要検討。)</u>
分野別委員会と分科会	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 分科会において、<u>研究開発計画として束ねている。</u> ✓ 分野別委員会においては、計画策定には関与するものの、<u>計画策定後の活用や見直しについての議論は、まちまち。(使用されていないケースが多く、やや形骸化が懸念。)</u> ✓ 研究開発プログラムは、これまで作成されておらず。<u>(「研究開発プログラム」とは、「大目標達成のために必要な中目標」の単位で研究開発課題等の全体を束ねたものとされている。)</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 分科会において、<u>束ねる必要はないのではないか。</u> ✓ <u>各分野委員会や政府全体において別途検討やとりまとめがなされている戦略あるいは計画を出来るだけ引用し、分野を俯瞰する戦略・計画として最低限のポイントを記載した文書を分野別委員会でまとめるべきではないか。</u> ✓ あわせて、分野別プログラム(案)の検討・作成作業を進めてはどうか。

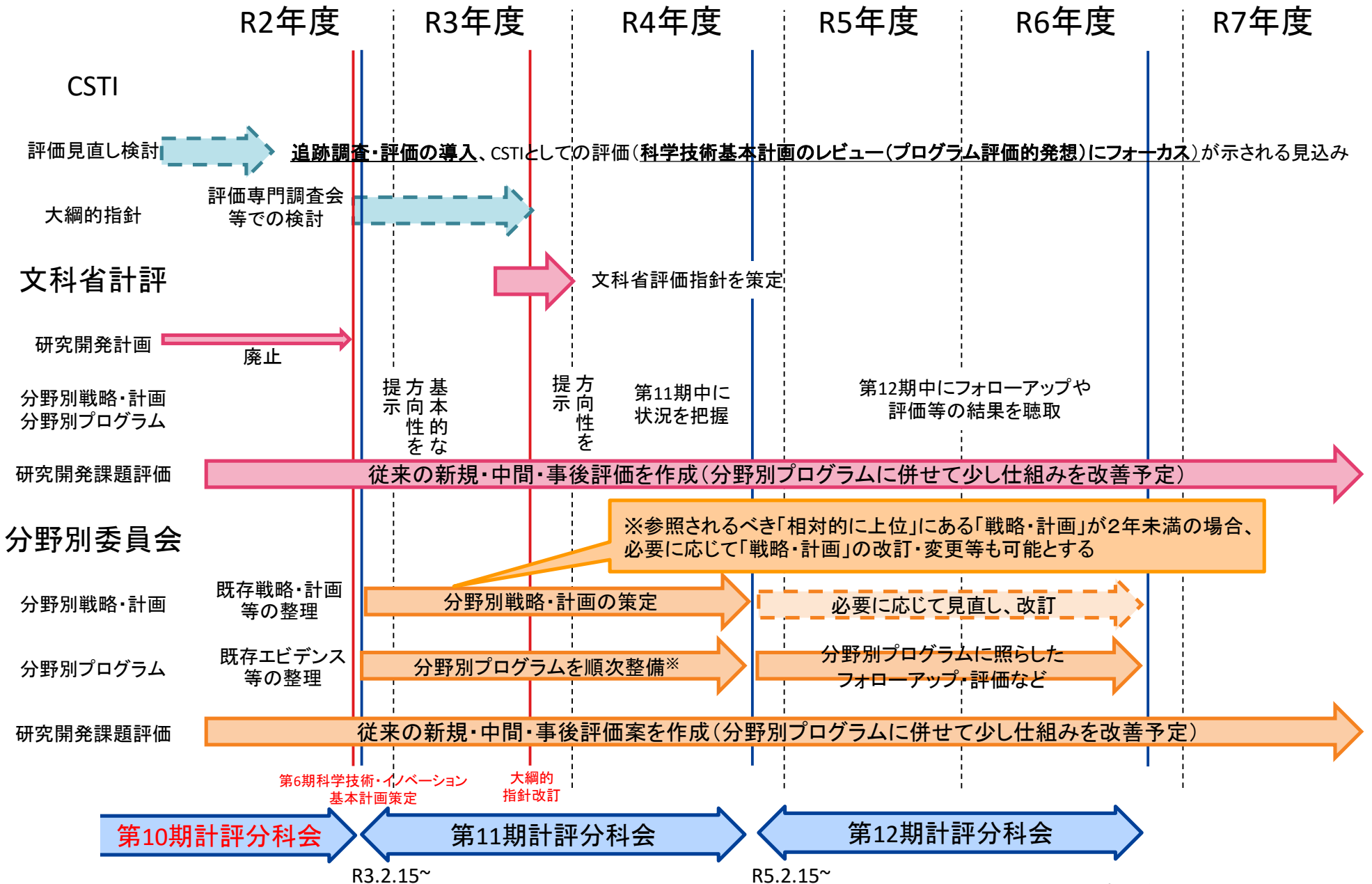
研究開発課題と研究開発プログラム等の関係（案）

【現在】

【令和3年度以降】

研究開発課題		
内容	研究開発計画に基づいて設定された課題であり、概ね各種事業単位に設定されている。	基本的にこれまでと同じ。
運用状況	総額10億円以上の研究開発課題 新規、中間、事後評価を実施(実施期間に応じて) <u>評価の視点は、実施の適否、質向上や運用改善など(evaluation, ratingの視点)を重視。</u>	基本的にはこれまでと同じ。 <u>ただし、分野別プログラムにより得られる知見など組織学習の結果を適宜活用。</u>
関係法令等	政策評価法等(10億円以上の費用を要することが見込まれるものについては事前評価を実施することが必要となっている) その他、大綱的指針、文部科学省政策評価基本計画、文部科学省研究開発評価指針 など	基本的にこれまでと同じ。
研究開発プログラム		分野別プログラム(案)
内容	研究開発課題を束ねたものであり、現行研究開発計画の中目標単位が目安。	<u>分野全体を客観的かつエビデンスに基づいて俯瞰・把握できるものとして、まさに文部科学省におけるEBPMの推進の基盤であると位置づけてはどうか。</u>
運用状況	<u>これまで実施されておらず。</u> (平成30年度より試行的に実施。)	まずは、客観的・俯瞰的なエビデンスの蓄積を図るとともに、適切なタイミングにてフォローアップや評価を実施してはどうか。 <u>評価の視点は、気づきや改善点を得るための組織学習など(assessmentの視点)を重視してはどうか。</u>
関係法令等	平成24年度の大綱的指針において導入すべき、さらに平成28年度の大綱的指針において導入加速と定着を図るべきとの考え方が示されている。 平成28年度研究計画・評価分科会策定の研究開発計画においても、追跡調査・追跡評価と併せて実施するとされている。	基本的にこれまでと同じ。

新たな仕組みに向けた今後の予定・見込み (イメージ: 検討資料)



※ SciREX共進化実現プログラムにおける取組を含む

アウトリーチ戦略、活動推進計画について

核融合エネルギーに関する アウトリーチヘッドクォーターの活動報告

第22回核融合科学技術委員会
令和2年10月30日

核融合エネルギーに関するアウトリーチヘッドクォーター(HQ)

第1回中間チェックアンドレビュー(～2020年頃)に向けたHQの取組み

原型炉開発に向けたアクションプラン(AP、平成29年12月18日、核融合科学技術委員会)の「12.社会連携」では、第1回中間チェックアンドレビュー(～2020年頃)までにアウトリーチ活動ヘッドクォーター(HQ)による活動として、右図が示されており、これらの活動の総括として、APに示す期限(2019年度末まで)より早い平成31年2月にHQを立ち上げ、以降に示す目的、活動方針に沿って活動してきた。

【HQ目的】

大学及び研究機関が従来より個別に実施しているアウトリーチ活動を集約させ、一体となって、戦略的なアウトリーチ活動を実施すること。

【HQ実施体制】

文部科学省、量子科学技術研究開発機構、核融合科学研究所、大学等の関係者からなる。

【APに対する到達度】

APに示される

- 核融合アウトリーチ活動HQの在り方の検討(19)
- 核融合アウトリーチ活動HQの設置(20)
- 核融合アウトリーチ活動推進計画の立案(20)

については、現時点で達成できており、さらに現在の懸案であるコロナ禍における核融合アウトリーチ活動を模索すべく、「核融合アウトリーチ活動推進計画」への追加項目の議論を行っているところ。

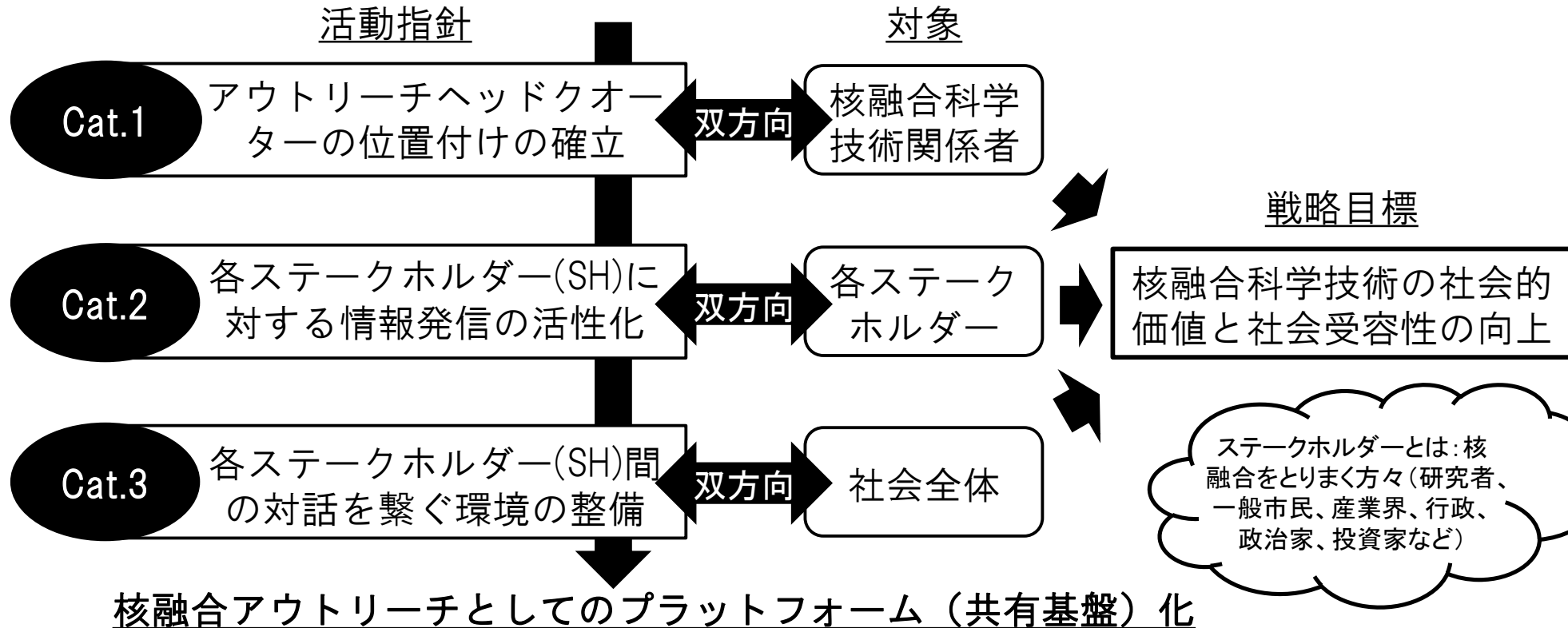
合同特別チームの活動フェーズ	概念設計の基本設計		概念設計	工学設計
	2015	2020頃	2025頃	2035頃
12.社会連携	核融合アウトリーチ活動HQの在り方検討、設置準備、計画立案 アウトリーチ教育体制及びプログラムの検討 核融合エネルギー開発ロードマップ/原型炉設計活動に関する社会連携活動の実施	核融合アウトリーチ活動HQの設置 核融合アウトリーチ活動の推進 アウトリーチ教育の実施	原型炉建設サイト選定に関する社会連携活動の実施	原型炉建設・運転に関する社会連携活動の実施
アウトリーチ活動ヘッドクォーター(HQ)設置による活動の推進	(16)TF/特/Q/N/F/学:核融合OR活動HQの在り方の検討 →(19) (20)TF/特/Q/N/F/学:核融合アウトリーチ活動HQの設置 →(20) (20)TF/特/J/N/F/学:核融合アウトリーチ活動推進計画の立案 →(20)	(20)HQ/TF/特/Q/N/F/学:核融合アウトリーチ活動の推進(35)	→(20)HQ/TF/特/Q/N/F/学:核融合アウトリーチ活動の推進(35)	

APの「12.社会連携」より

HQ活動の活動戦略

戦略目標:「核融合科学技術を取り巻く幅広い層に存在するステークホルダー(SH)間の対話を可能とする環境を整備し、核融合科学技術の社会的価値と社会受容性を高めること」

アウトリーチHQの戦略目標を達成するための対象別活動指針



- それぞれの組織や個人で展開している活動の情報交換、今後立ち上げるべき企画の提案などを中心に、戦略的なアウトリーチ活動の推進方策を議論。
- それぞれの企画が、どのステークホルダー/ターゲット層(小中高生、大学生、一般など)を対象としているのか、アウトプット・アウトカムとして何が期待できるのか、などについて整理しながら、対象とするターゲット層に突き刺さる“とがった”企画を目指す。
- さらにアウトプットとして、核融合アウトリーチとしてのプラットフォーム(共有基盤)化を目指す。

アウトリーチ活動推進計画（R2年度）

ターゲット層	活動(カッコ内は行動主体)	進捗状況(2020年9月現在)
小～中学生	核融合の本、「核融合エネルギーのきほん」の出版(QST・NIFS・大学)	本文初稿はすべて入稿済。初校9月中予定。2021年1月8日出版予定。
	FUSIONフェスタin東京(NIFS)	NIFS:2020年度中止
	出前授業(NIFS)	NIFS:12月に岡崎市内の中学校で実施予定
	科学雑誌の特集ページの企画(QST・NIFS)	QST:子供の科学12月号(11月10日出版)及び子供の科学Webサイト NIFS:子供の科学3,4,5,6月号(広告記事)、9,10月号(ビーカーくんが行く)
高校生	科学実験、工作教室(NIFS)	NIFS:8月から、新型コロナウイルスの状況を見て、随時実施
	こども霞が関見学デーへの出展(QST・NIFS)	2020年度はイベント中止
	ITER見学ツアーの企画(MEXT・QST・大学)	2022年1月に延期
	高校生向けシンポジウム(プラ核学会)	プラ核学会:2021年1月23日にオンライン開催予定
高校～大学生	スーパーサイエンスハイスクール事業、その他高校との連携協力(NIFS・ITER)	NIFS:7月から今年度末までに、9校で実施予定 ITER:アウトリーチを今後検討
	青少年のための科学の祭典(QST)	QST:8月(八戸):新型コロナの影響のため開催されず、12月(日立):予定
	出前授業(NIFS・大学)	NIFS:9,10月にリモート講義を実施予定 大学:10月に核融合に関する模擬講義を都立高校で実施予定
	インターンシップ(NIFS)	NIFS:新型コロナウィルスの影響のため実施されず 大学生を対象に、5月、6月、9月と合計5回のリモートセミナーを実施。延べ400名程度が参加。
大学生	核融合若手インフォーマルミーティング	
	ITERインターンシップの周知(MEXT・QST)	MEXT:HPで周知 QST: https://www.fusion.qst.go.jp/ITER/staff/internship_program.html にて周知
	体験入学(QST・NIFS)	QST:今年度サマースクールは新型コロナの影響のため実施されず NIFS:2020年8月24～28日に実施
産業界	産業界と若者の意見交換会(フォーラム)	フォーラム:2020年12月22日に、リモートで実施予定。
	講演会(MEXT)	MEXT:9月30日、新むつ小川原株式会社主催、日本経済団体連合会共催による「エネルギーに関する第3回講演会」にて岩淵戦略官が講演予定
全般	核融合に関するポータルサイトの更新(MEXT)	MEXT:ニュース&トピックスを追加
	ITER/BA成果報告会(フォーラム)	フォーラム:2020年12月22日開催予定(イイノホール及びオンライン)
	市民講演会(NIFS)	NIFS:2020年12月19日開催予定
	「一家に1枚」ポスターの企画(QST・NIFS・大学)	2021年度申請に向けて、今後検討。
	JT-60SA完成に伴うテレビ番組(NHKサイエンスゼロ)、日本科学未来館とのコラボレーション企画提案、つくばエキスポセンターでのイベント(QST)	QST:JT60-SA初プラズマ関連イベント(2020年12月頃～2021年4月頃)として検討中。
	ITER組立・据付開始式典(文科省・ITER・QST)	2020年7月28日にITER機構本部にてITERの組立・据付開始式典が開催され、参加7極から挨拶(日本は、萩生田大臣が祝辞を述べ、安倍総理のメッセージを代読)。その模様が全世界にライブ配信された。
	サイエンスカフェ(QST・NIFS)	QST:日立シビックセンター(2020年11月頃) NIFS:2019年まで、オープンキャンパス内でサイエンスカフェを実施していたが、2020年はオンライン企画として実施済み。
	施設見学(QST・NIFS)	QST:那珂研・六ヶ所研(10月25日) NIFS:火曜日～金曜日(祝日を除く)ホームページより受付
	オープンキャンパス(QST・NIFS)	QST:施設見学に含まれる NIFS:2020年9月5日にオンラインで実施
	オンラインセミナー(QST・ITER):バーチャルツアー等	QST・ITER:2020年9月4日にオンラインセミナー「ITERバーチャルツアー・1万キロかなたの声」を開催
未来のエネルギー装置デザインコンテスト(QST)	QST:新型コロナの影響のため、千葉県立産業科学館でのイベントは実施せず。	
プラ核学会誌への投稿(HQ)	HQ:アウトリーチHQに関するサロン記事(2020年5月掲載) 大学生を対象に開催したインフォーマルミーティングに関するサロン記事(2020年9月掲載)	
リスクコミュニケーションに関するマニュアルの作成(QST)	QST:未着手(年度内に着手する方向で検討中)	

Cat.1 「HQ位置付けの確立」に関する活動

- 核融合コミュニティにHQの設置と活動内容を紹介すべく、プラズマ・核融合学会誌にサロン記事を掲載。



サロン

アウトリーチヘッドクォーターの設置にあたって

On Establishment of an Outreach Headquarter

小川 雄一, 笠田 竜太¹⁾, 吉澤 榮穂美²⁾, 東島 智³⁾, 矢治 健太郎⁴⁾
OGAWA Yuichi, KASADA Ryuta¹⁾, YOSHIKAWA Naomi²⁾, HIGASHIJIMA Satoru³⁾ and YAJI Kentaro⁴⁾

¹⁾東北大学金属材料研究所, ²⁾文部科学省研究開発局, ³⁾原子核科学技術研究所, ⁴⁾核融合科学研究所
(原稿受付: 2023年3月5日)

現代の科学技術は社会との共創により推進されると言っても過言ではなく、社会への継続的な情報発信や不
断の双方向的な交流が必要不可欠です。核融合分野でも研究機関や大学を中心として様々なアウトリーチ活動が
展開されてきていますが、それぞれ独立に推進されてきました。そこで、これらを横断的に俯瞰・戦略的・効果
的に活動を展開するための司令塔（ヘッドクォーター）が必要であると、2017(平成29)年12月18日に文部科学省
の核融合科学技術委員会が策定された「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」に謳われています。これを受け、
文部科学省・研究費団・大学が中心となり、アウトリーチヘッドクォーターを設置しましたので、その意義及び
活動について紹介します。

Keywords:

outreach activities, headquarter, social relations, co-creation, MEXT homepage

- 2019年11月のプラズマ・核融合学会年会の核融合若手インフォーマル会合「核融合をしらしめる。」で情報交換する場を設けて意見聴取。

プラズマ・核融合学会誌のサロン記事の一部

- HQの活動内容を共有する場として、NIFS共同研究として実施している「核融合エネルギーの社会的受容性向上のためのアウトリーチ活動の進め方」を活用。

- アウトリーチ活動を進める当たり、リスクコミュニケーションについても研究者コミュニティが共通認識(安全性、コスト、将来性など)を持つことが大事であると考えており、そのガイドブックを作成すべく議論。



座長 伊藤野 健造 (阪大)



講演者 後藤 拓也 (核融合研)



講演者 門田 健一郎 (京大)



講演者 伊藤 寛史 (核融合研)



講演者 新井 知彦 (文科省)



講演者 東島 智 (東研)

若手インフォーマルミーティング
「核融合をしらしめる。」

野村忠宏さんは五輪柔道で三連覇を達成し、現役選手として活躍しながら医学博士号も獲得した強者です。しかし、新聞一面が金メダルより欲しかったものの、新聞一面が田村(谷)亮子さんと同日、五輪の三連覇でもついに一面は飾れなかったようです。今年の科学関係のニュースで一面を飾ったようでは、どなたかあるでしょうか。調べてみると、リチウム電池のノーベル賞、温暖化関係、ブラックホール撮影などが並んでいました。さて、その核融合が一面を飾る日は来るでしょうか。その時の見出しには「なんな文が並ぶでしようか。その時の見出しには「地上の太陽」ではなく、プラズマエネルギーもあるかもしれません。色々と妄想してしまいます。何よりも、良いニュースで、一面を飾れるな

れは始まりませぬ。では如何にして当たり前の話ですが、一面には多くの人が興味を持っていること、もしくは興味を持つべきことが掲載されます。このことは核融合分野の進展に興味を持っていてる人々や、新聞記者の進んで「興味を持つべきトピックである」と認識してもらったことが必要となります。なかなか大変そうなお話です。ただ、アウトリーチへの意欲を核融合に関心する人々が少しずつも持っている。アウトリーチを進めていけば、いつか両方のアプローチを同時に進めていけば、いつか両方とも進んでいくと思います。

新聞一面を獲得目指して、核融合をしらしめる方法を、異なる立場の人々と、懇話会議論すること、が今回のインフォーマルの趣旨です。少し珍しい形をとりませんが、「若手」の枠で、われわれ自身も参加していただきます。自由かつ活発な議論をしたいと思います。日時:令和元年十一月十九日(土) 18時30分 場所:中部大学春日井キャンパス 七号館二階ファカルティルーム

プラズマ・核融合学会年会の核融合若手インフォーマル会合「核融合をしらしめる。」

Cat.2 「各SHに対する情報発信の活性化」に関するHQの活動

- 各研究機関やステークホルダーを繋ぐための活動や各研究機関・研究者が外部に向けて実施する情報発信への支援として文部科学省の果たす役割は大変重要。

→文部科学省:最初の取組みとして、核融合研究全体を紹介する核融合HP「Fusion Energy ～核融合エネルギーの実現に向けて～」を開設。

(https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/fusion/)



文部科学省の核融合HPのトップページ

- 目的:本HPはコミュニティのポータルサイトとして機能すること。
- 対象:核融合を知らない層～研究者に至る広い層に向け、各ターゲット層に有効なコンテンツや必要な情報を掲載。
- HP構成上の注意点:各メニューのターゲットの明確化、研究の中心となる研究所や大学にとって興味関心引く入口としての機能、既存のリソースの有効活用、政府の施策や様々な情報の集約など。
- 人材育成に向けて:将来の核融合研究を担う若手人材の育成も重要であり、核融合研究を学べる大学一覧や実際に核融合に携わっている研究者や技術者のキャリアパスやメッセージも多数掲載。

→昨年11月末の開設以降、文部科学省HPのトップバナーにも掲載され、高く評価。

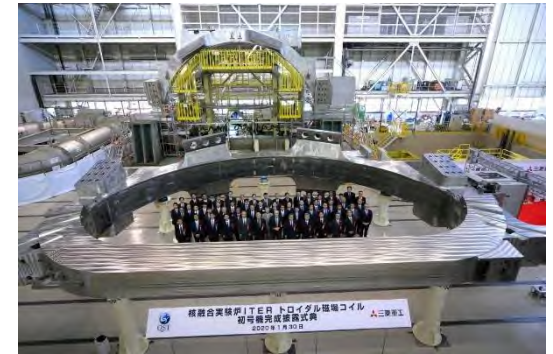
- 文部科学省:各研究機関などが行うイベントや活動の相乗効果を狙い、それらの連携促進や共同実施への助言・支援を行うとともに、コミュニティ外への周知のため、省内他施策との連携やHQで企画した活動の小中高、大学、教育委員会などへの情報提供なども実施。

Cat.2 「各SHに対する情報発信の活性化」に関する各機関の活動(2)

- 国内の研究機関や大学での活動も、ヘッドクォーターを通して核融合コミュニティ内での連携を図りつつ様々な企画を精力的に進めています。
- 量子科学技術研究開発機構核融合エネルギー部門(以下QST)の取組み:
 - ▶ 特にITERの広報に努め、本年1月30日にITER超伝導トロイダル磁場コイル初号機の完成披露式典を開催するとともに、メディア向けの説明の機会を設け、いくつかの報道機関でITERの現状が取り上げられた。
 - ▶ 新たな試みとして、ITERに関するYouTubeを使った広告動画配信を行い、約48万回の視聴があった。
 - ▶ JT-60SA完成及びファーストプラズマ生成に向け、式典の開催とともに、つくばエキスポセンターとタイアップしたイベントやTV番組に取り上げてもらうなどの企画が進行中。
 - ▶ ITERを題材にした判り易いコミックは、日本語版、英語版、フランス語版が作成され、好評を博している。

(http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/comic/page1_1.html)

- 大阪大学レーザー科学研究所の取組み:
 - ▶ 国際会議に合わせて2019年9月22日に公開イベント「核融合とレーザー」を開催。親子連れを中心に550人の入場者があり、大盛況。NIFSとQSTも協力。



報道されたITER超伝導トロイダル磁場コイル初号機の完成披露式典



ITER計画を紹介するコミック



核融合とレーザーの実験教室

Cat.2 「各SHに対する情報発信の活性化」に関する各機関の活動(3)

- 核融合科学研究所(以下、NIFS)の取組み: 講演会や科学イベントを通して、一般市民に向けて、核融合科学の理解に努めている。
 - 毎年5月の連休シーズンに日本科学未来館で「Fusionフェスタ」、9月にはオープンキャンパスのイベントを実施。
 - 科学技術館(東京都千代田区)の科学ライブショー「ユニバーズ」やサイエンスカフェなどの場を用いて、NIFSの研究者が登壇して、一般市民と相互にコミュニケーションを持つ機会も作っている。



Fusionフェスタのライブ中継



Fusionフェスタの実験教室

Cat.3 「各SH間の対話を繋ぐ環境の整備」に関する活動

- コミュニティ内外での信頼を醸成するための地道な活動が大切であると考えている。
- その一環として、NIFSなどでは、科学技術コミュニケーション人材を非核融合分野から新たに採用しており、多様なステークホルダーの間を繋ぐ要となることを期待。
- 数名の核融合研究者が北海道大学科学技術コミュニケーター養成プログラム(CoSTEP)を修了するなど、専門性とコミュニケーションスキルを併せ持つ核融合人材の育成の足掛かりとなることを期待。

これまでのHQ活動の総括として

- 文部科学省内の各部署が行った広報活動を省内投票や審査により表彰する「広報顕彰」を実施。HQの創設及びHQのアウトリーチ活動を「核融合コミュニティ One Teamによるアウトリーチ活動への挑戦」としてエントリーし、「ターゲット毎に多様な方法でアプローチをしている点や既存のリソースを活用し継続的に行う工夫がなされている点など、他施策にも参考にすべき事例が多い」として、R元年度の萩生田大臣賞を受賞。
- これは、これまでのHQの活動は一定の評価を得ていることの証左。



まとめ

- APIに示されるHQの課題は現時点で達成。
- HQが定めた活動戦略に基づき、アウトリーチ活動推進計画を立案し、三つのカテゴリー毎に活動を展開中。
- HQ活動は、R元年度の萩生田大臣賞を受賞。
- 元来想定していなかったコロナ禍における核融合アウトリーチ活動を模索中。

参考：HQ会合の開催実績

H30年度

第1回 平成31年2月26日 アウトリーチヘッドクォーターの設置、今後の活動案について

H31/R1年度

第1回 平成31年4月8日 具体的な活動の提案、活動の進捗状況報告

第2回 平成31年4月26日 具体的な活動の提案、活動の進捗状況報告

第3回 令和元年7月16日 具体的な活動の提案、活動の進捗状況報告

第4回 令和元年9月24日 具体的な活動の提案、活動の進捗状況報告、アウトリーチ活動方針の検討

第5回 令和元年11月18日 具体的な活動の提案、活動の進捗状況報告、アウトリーチ活動方針の検討

第6回 令和2年1月28日 具体的な活動の提案、活動の進捗状況報告、アウトリーチ活動方針の検討

第7回 令和2年3月30日 具体的な活動の提案、活動の進捗状況報告、アウトリーチ活動方針の検討

R2年度

第1回 平成2年5月28日 具体的な活動の提案、活動の進捗状況報告、アウトリーチ活動方針の検討

第2回 平成2年7月20日 具体的な活動の提案、活動の進捗状況報告、アウトリーチ活動方針の検討

第3回 令和2年9月25日 具体的な活動の提案、活動の進捗状況報告、アウトリーチ活動方針の検討

第 10 期核融合科学技術委員会 委員名簿
(任期：平成 31 年 4 月 26 日～令和 3 年 2 月 14 日)

主 査

小川 雄一 東京大学名誉教授

委 員

五十嵐 道子 科学ジャーナリスト
植竹 明人 一般社団法人日本原子力産業協会常務理事
上田 良夫 大阪大学大学院工学研究科教授
大野 哲靖 名古屋大学大学院工学研究科教授
岡野 邦彦 株式会社 O D A C 取締役
尾崎 弘之 神戸大学大学院科学技術イノベーション研究科教授
岸本 泰明 京都大学エネルギー理工学研究所長
栗原 研一 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー部門長
小磯 晴代 高エネルギー加速器研究機構名誉教授
兒玉 了祐 大阪大学レーザー科学研究所長
高梨 千賀子 東洋大学経営学部経営学科教授
高本 学 一般社団法人日本電機工業会専務理事
竹入 康彦 自然科学研究機構核融合科学研究所長
中熊 哲弘 電気事業連合会原子力部長
松尾 亜紀子 慶應義塾大学理工学部機械工学科教授