

レーザー核融合発電炉実現を目指した 開発戦略とコ・クリエーション

- レーザー核融合研究開発の現状と今後
- 核融合研究開発と様々なコ・クリエーション

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、
様々なステークホルダーとの共創により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

新たなイノベーションと学術

核融合ロケット



高圧量子物質材料

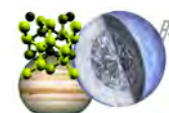


宇宙デブリ

生命医科学



非破壊検査



巨大惑星コア

時空の歪み

加速粒子制御技術

低エントロピー圧縮技術

レーザー核融合科学

核融合商業炉

実証炉

点火燃焼炉工学
点火燃焼実証

核融合炉工学
発電実証

核融合燃焼物理

加熱物理

爆縮物理

知（人材）と技術の行交い

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

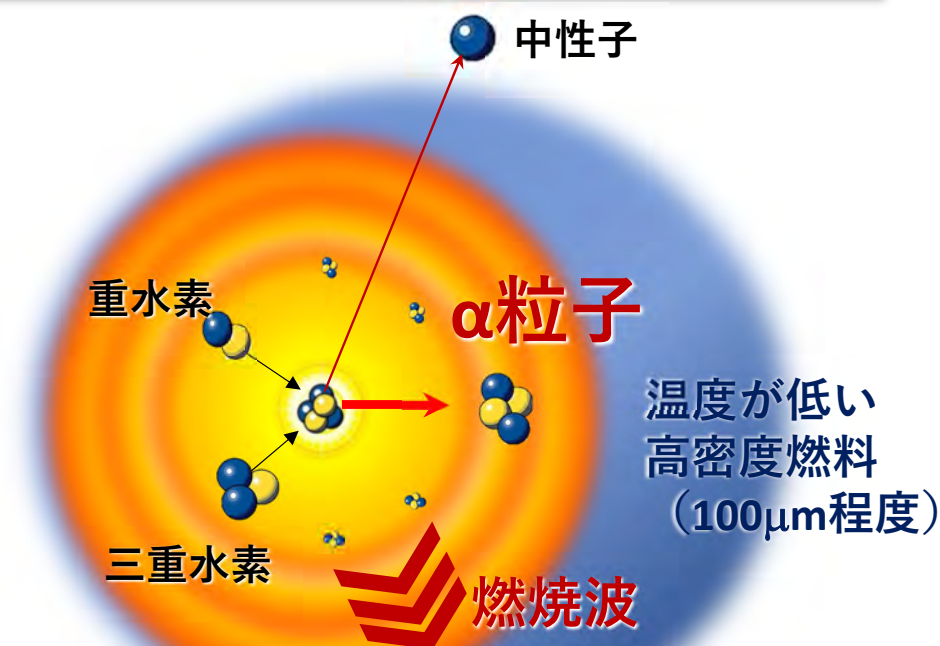
- ・ 繰り返し運転（電力量可変）
- ・ 出力：数10～100万キロワット中型



短い送電網と分散型発電炉で災害に強いスマート社会

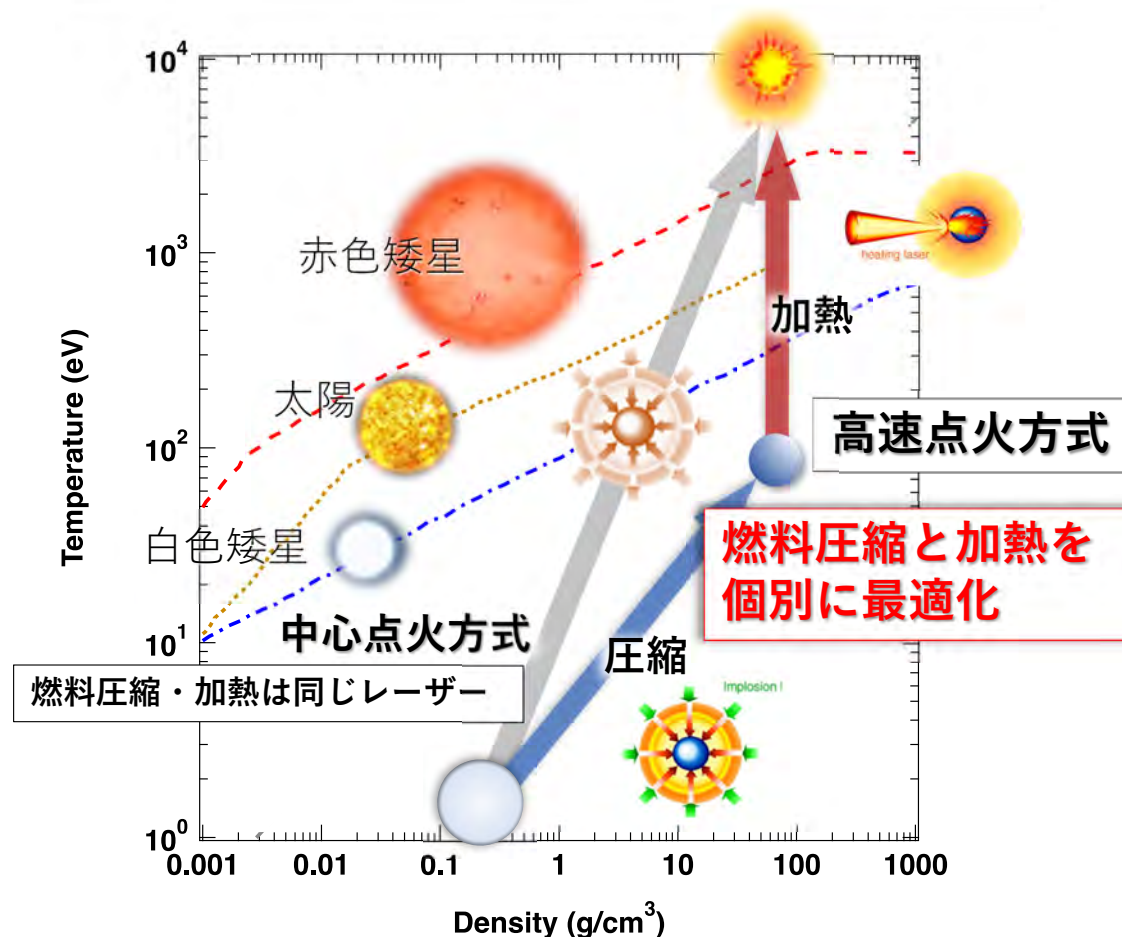
レーザー核融合燃焼と実現へ向けた方法

α 粒子が燃料内で止まり、エネルギーを燃料に付与し燃焼波が形成され、燃料全体が自然に燃える。（数十ピコ～100 ピコ秒）



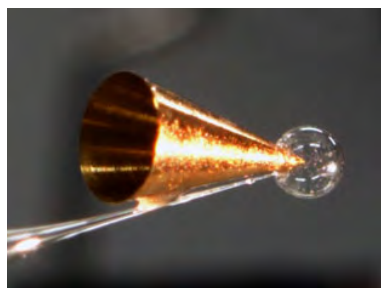
核融合を起こす温度：5000万度～1億度
 燃焼のための密度 $\times$ サイズ：1000倍の固体密度
 $\rho R = 0.3\text{g} - 0.5\text{g}/\text{cm}^2$

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2つの方式



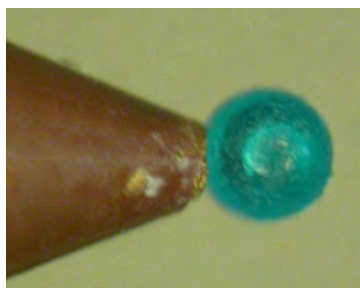
高速点火方式により、従来の中心点火方式の 1/10以下のエネルギーで同等の核融合積を実現

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

R. Kodama et al., Nature (2001)
S. Sakata et al., Nature Commun. (2018)
K. Matsuo et al., Phys. Rev. Lett (2020)



中実球による安定な爆縮

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

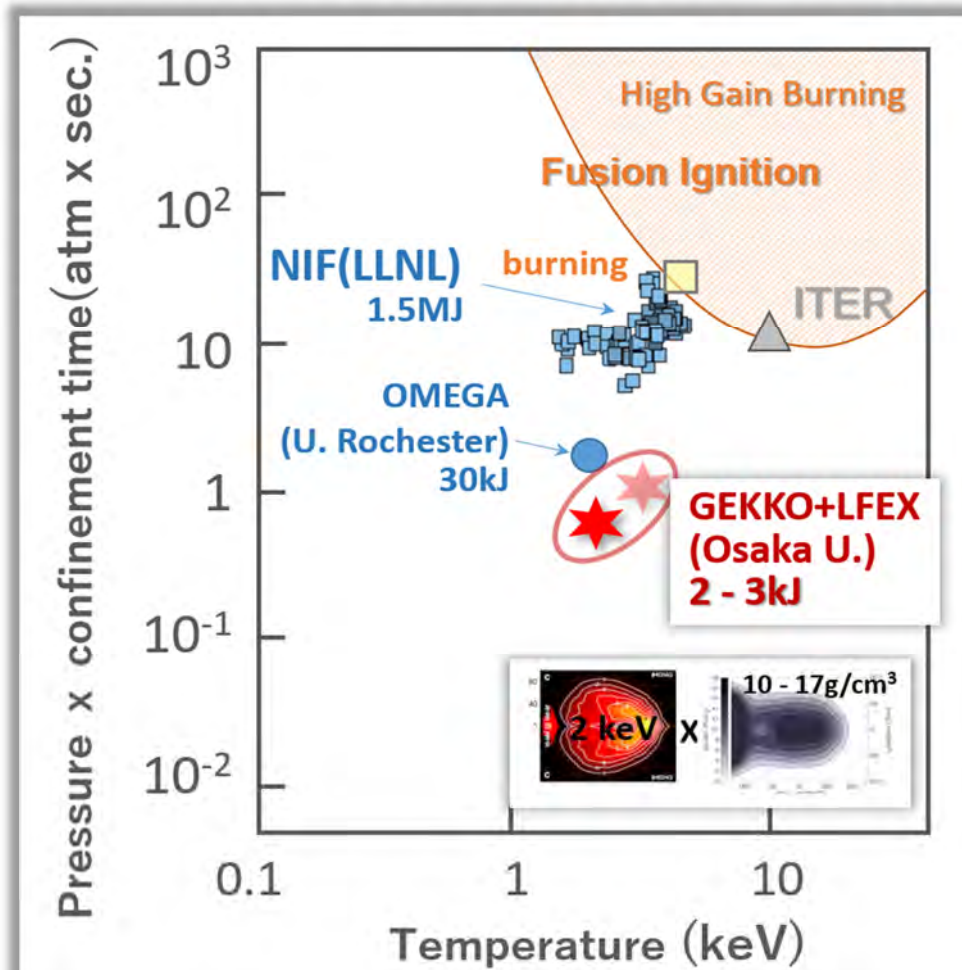


Multi-kJ/ns laser **GEKKO-XII**



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



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 -

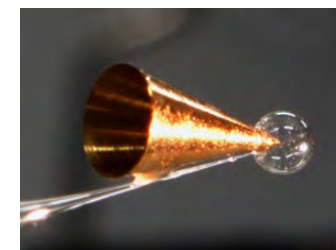
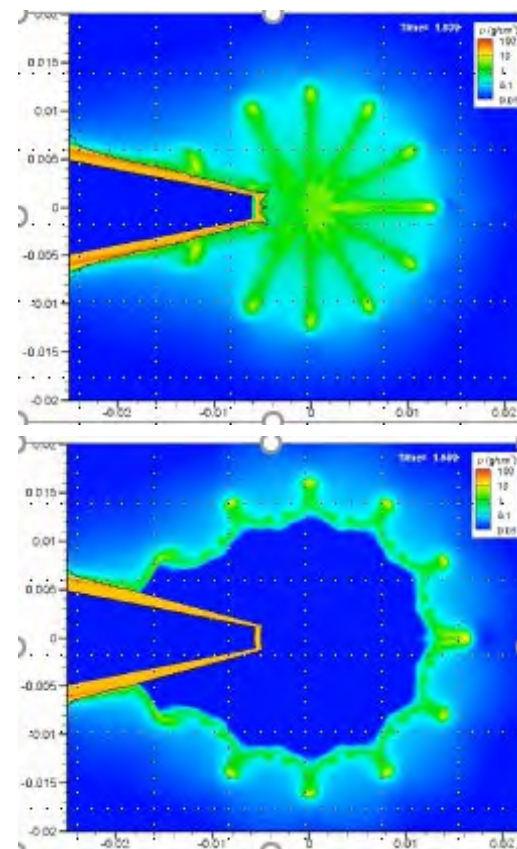
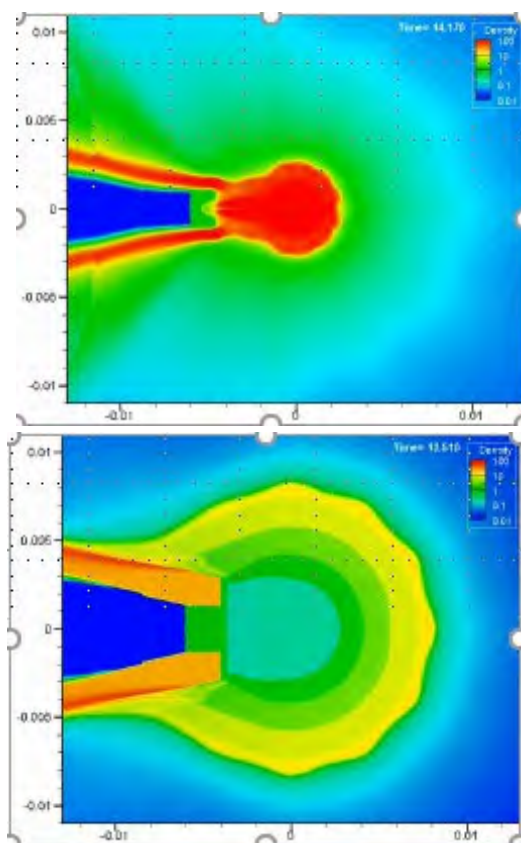


- 流体的安定な燃料爆縮（レーザー核融合の難問から解放）
- ビームバランス（タイミング）に対しても鈍感で安定した爆縮が期待できる
- 効率的な拡散加熱ができるターゲットデザイン
- 比較的容易な燃料球製作



2020年特許申請

中実球
(新型)

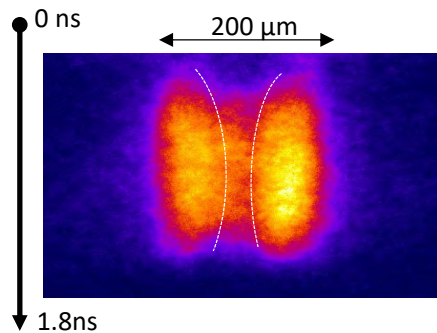
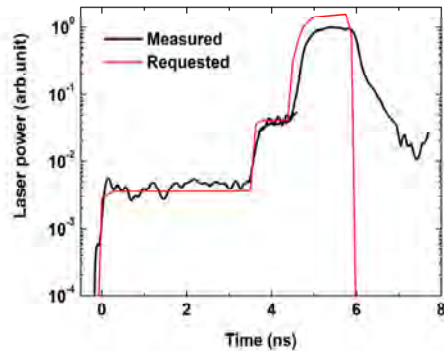


中空シェル
(従来型)

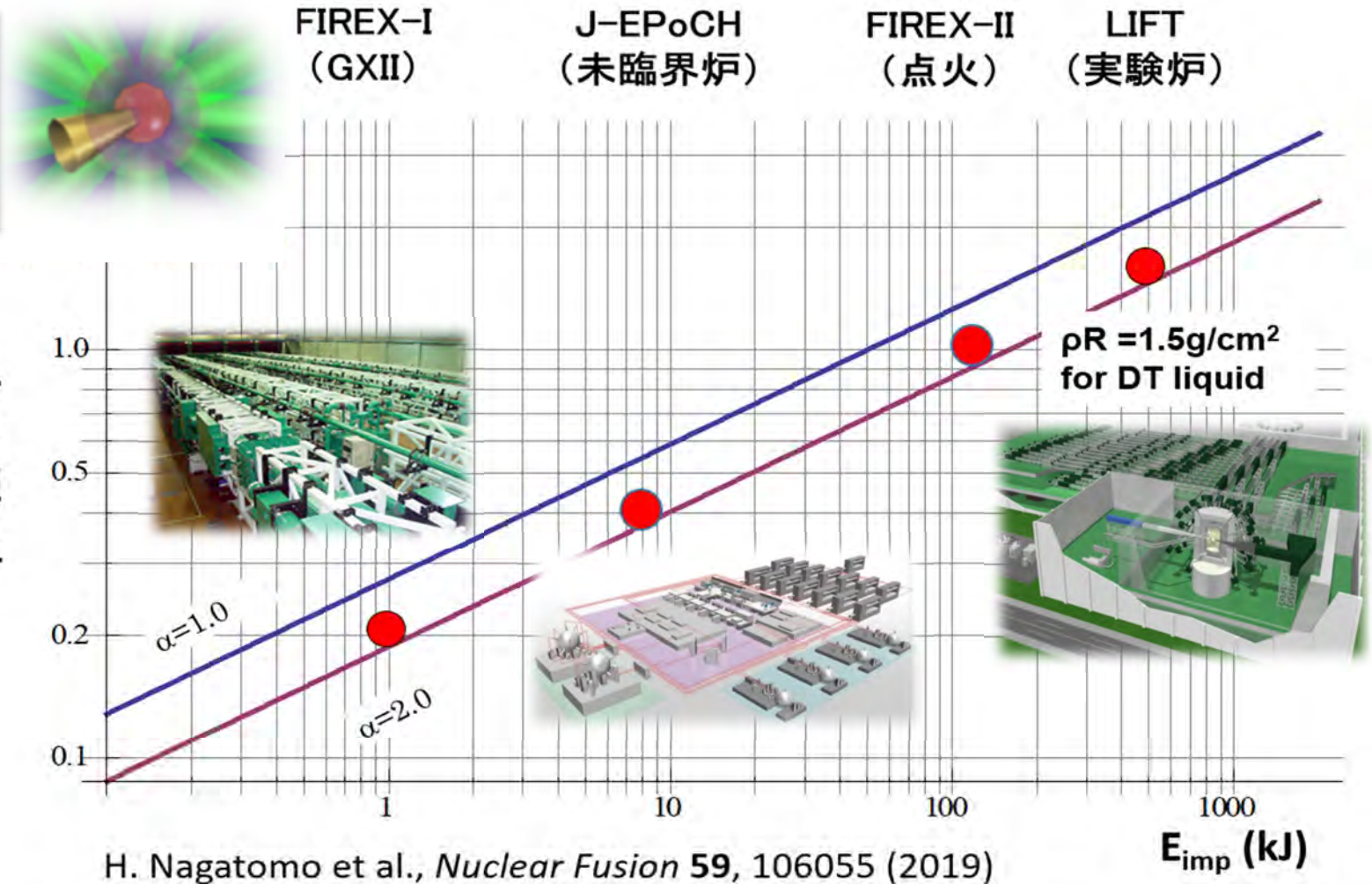
新手法で実験炉に必要な爆縮を予測（2次元シミュレーション）

高速点火高できる新たなターゲットデザインと低エントロピー圧縮技術

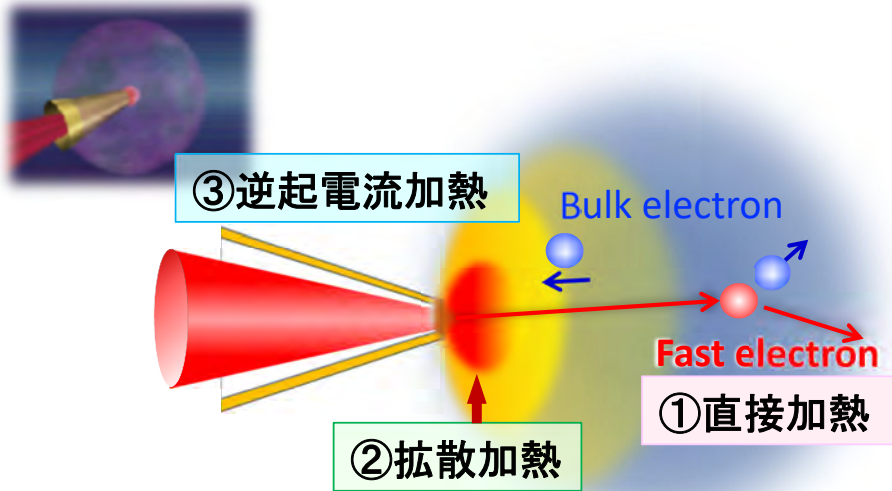
点火に必要な高密度圧縮を実現するレーザーパルス波形成型技術も確立し、爆縮実験にも成功



ρR (g/cm²)



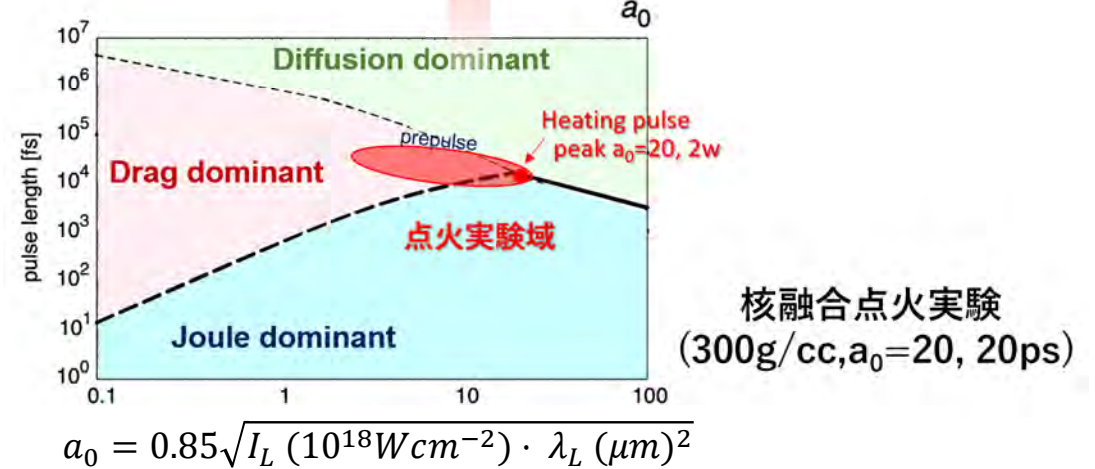
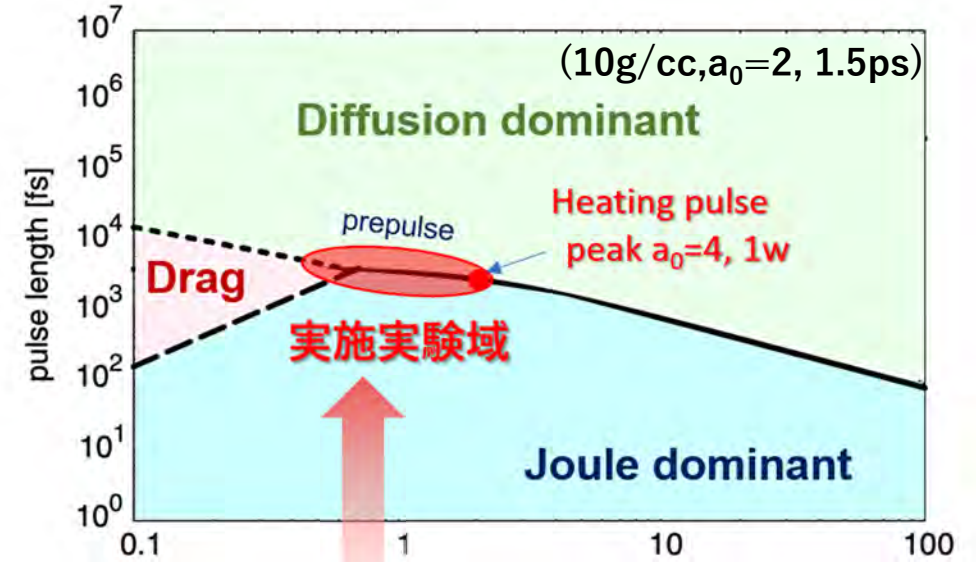
高速点火方式における加熱物理：点火条件を見据えた加熱実験



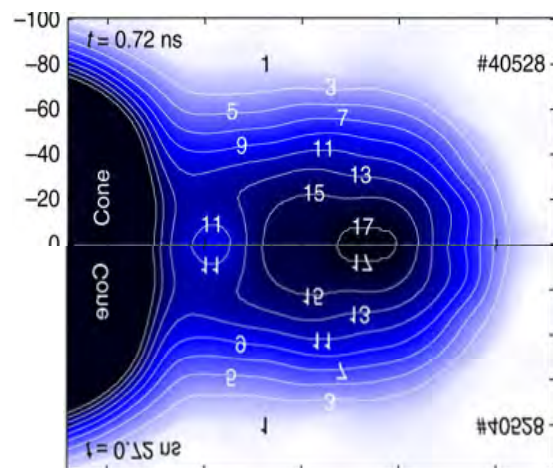
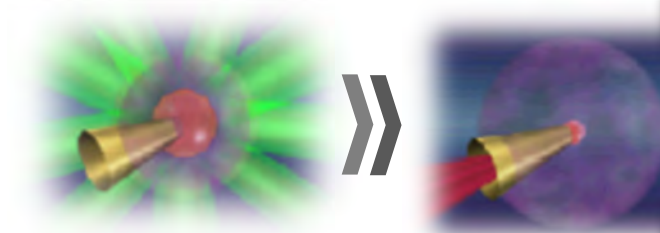
$$\frac{3}{2}n_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \underbrace{\frac{3}{2} \frac{n_h T_h}{\tau_e(T_h)}}_{\text{①}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial x} \right)}_{\text{②}} + \underbrace{\frac{j_h^2}{\sigma(T_e)}}_{\text{③}}$$

- 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）

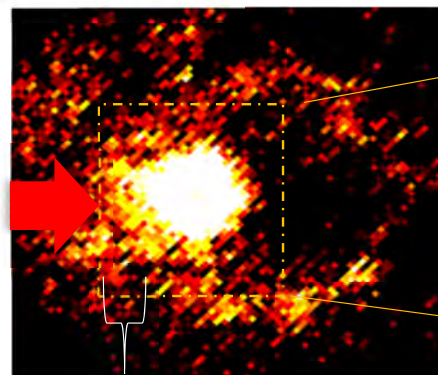


直接加熱は高密度領域に、
拡散加熱はレーザー照射面に近い箇所を効率的に加熱



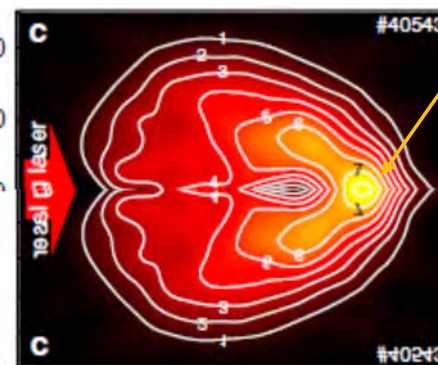
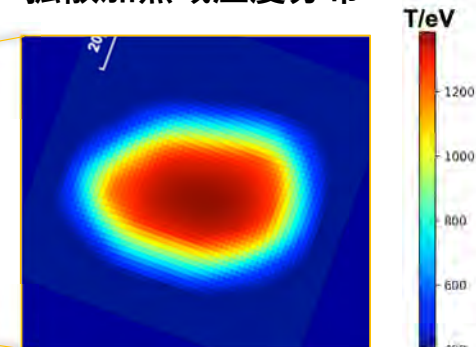
最大爆縮時の
コア密度分布

拡散加熱領域を示すX線像



レーザー照射領域に近い箇所を加熱

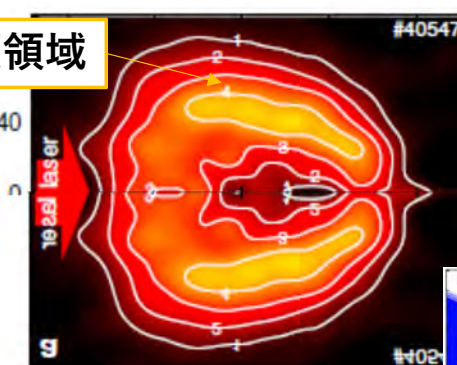
拡散加熱域温度分布



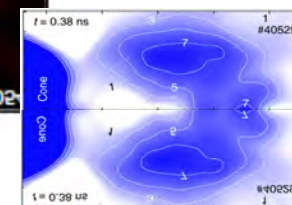
直接加熱領域を示すkα X線像

最大爆縮時のコア加熱

高密度領域



最大爆縮前のシェルの加熱



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10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）

レーザー核融合における核融合燃焼物理の課題

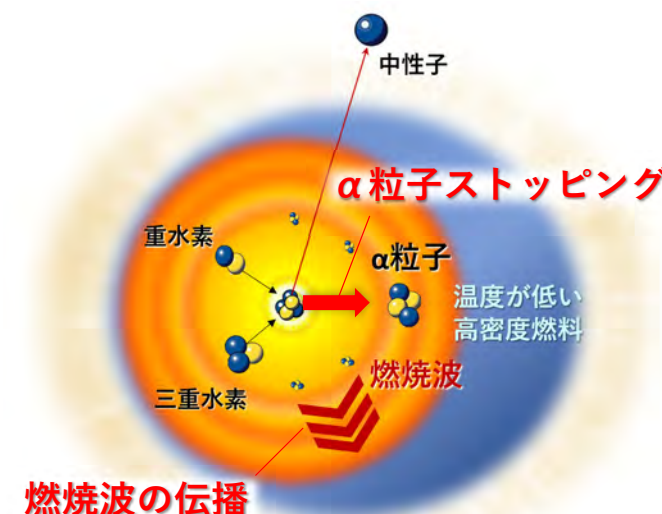
■ 高密度のプラズマ中で α 粒子のストッピング

- 燃焼物理の要である高密度プラズマ中の α 粒子ストッピ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



MW-MJ 連携構想の合意



2020.1.6@LLNL

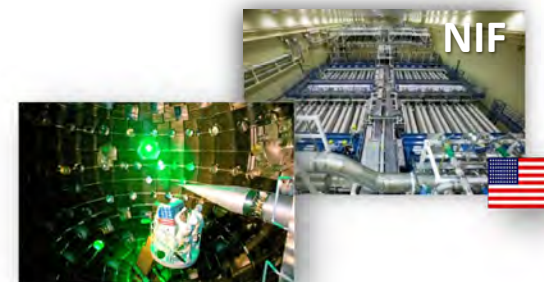
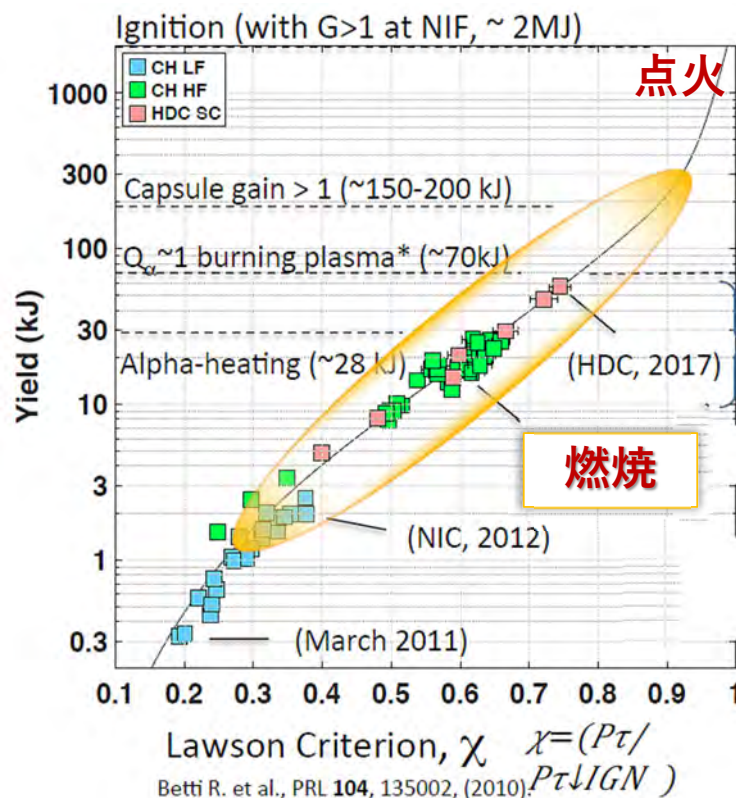
左から NIF施設長、ILE国際連携室長、千徳教授、LLNL副所長、ILE所長、LLNL所長、他

2021年2月2日

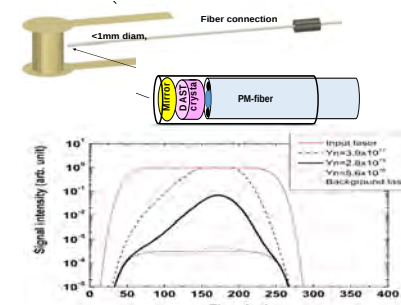
大阪大学レーザー科学研究所と米国ローレンスリバモア研究所間で、**核融合燃焼物理**に関するMOUを締結



Both, *ILE* and *LLNL*, have a keen interest in the collaboration on scientific research and experiments on the fields of HED science driven by high power lasers, e.g. the physics of laser-driven B-Fields, positron production, ion acceleration, and bright x-ray sources. Both Parties have high power laser systems for laser fusion study. One focus area that is clearly of mutual interest is burn physics.



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



日米連携で核融合燃焼実験のデータベース

新たな技術を取り入れた我が国の独自戦略 レーザー核融合定常運転実証



■ 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



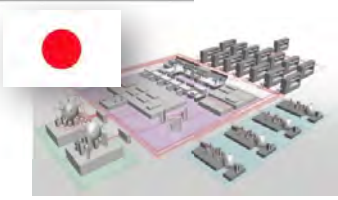
大量(30万個)の日本の半導体レーザーの利用



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



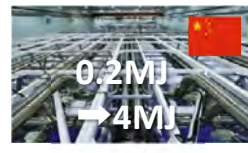
NIF



LMJ



OMEGA



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

我が国の技術を生かし、我が国の産業界を活性化に資する 世界一の高繰り返し大型レーザー（メガワット）



現在（50年前の技術）

高出力キロジュールレーザー
12Beams 12kJ/0.0001Hz



4 Beam let 8kJ/0.0001Hz

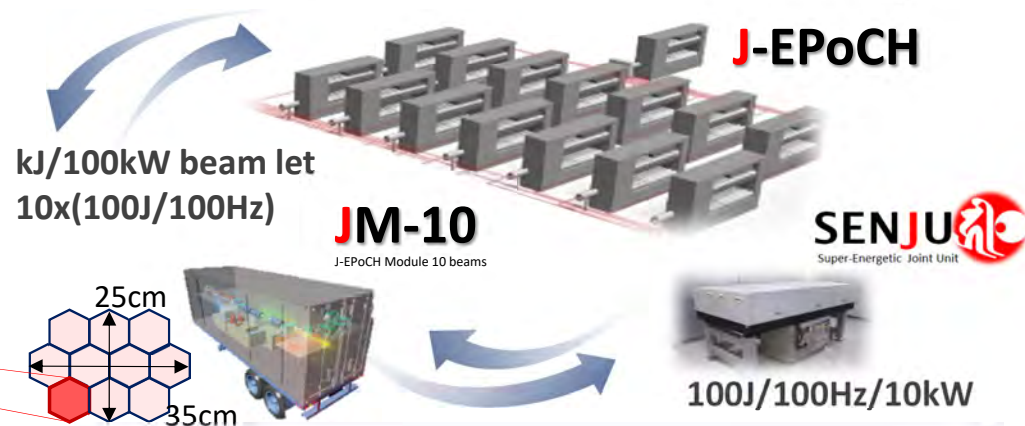


フラッシュランプ ガラスレーザー

次世代

世界一の超高平均出力メガワットレーザー

10kJ/100Hz(>100 beams/10Beam let)



我が国の産業活性化と競争力増強



大量の日本の半導体
レーザーが必要



我が国の先端光学
材料が大量に必要

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

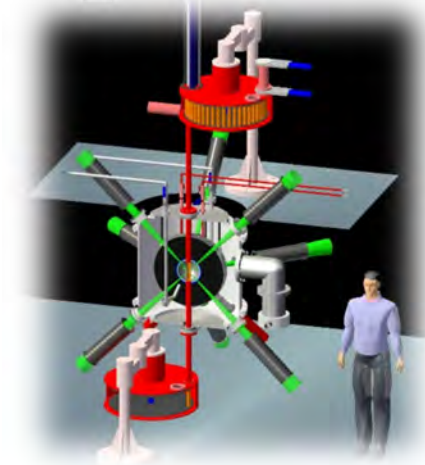
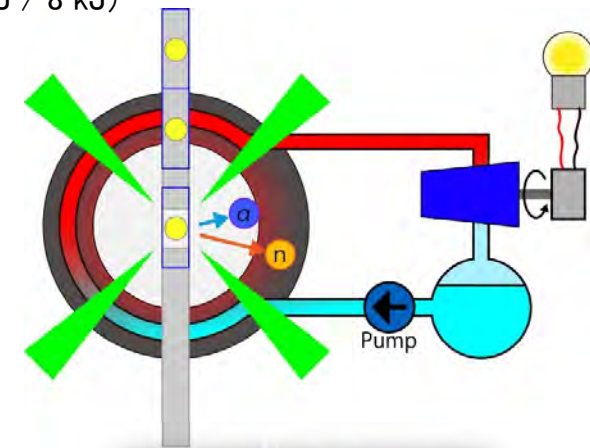
トリチウム増殖: 核融合燃料増殖技術

- 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 $64 \text{ kW/m}^2 \sim 6.4 \text{ MW/m}^2$

- 小規模な実験環境
- レーザー核融合発電炉の系統を再現できる
- 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



レーザー核融合発電炉実現を目指した 開発戦略とコ・クリエーション

- レーザー核融合研究開発の現状と今後
- **核融合研究開発と様々なコ・クリエーション**

大阪大学レーザー科学研究所
兒玉 了祐

レーザー核融合研究開発と 3 つのコ・クリエーション（共創）

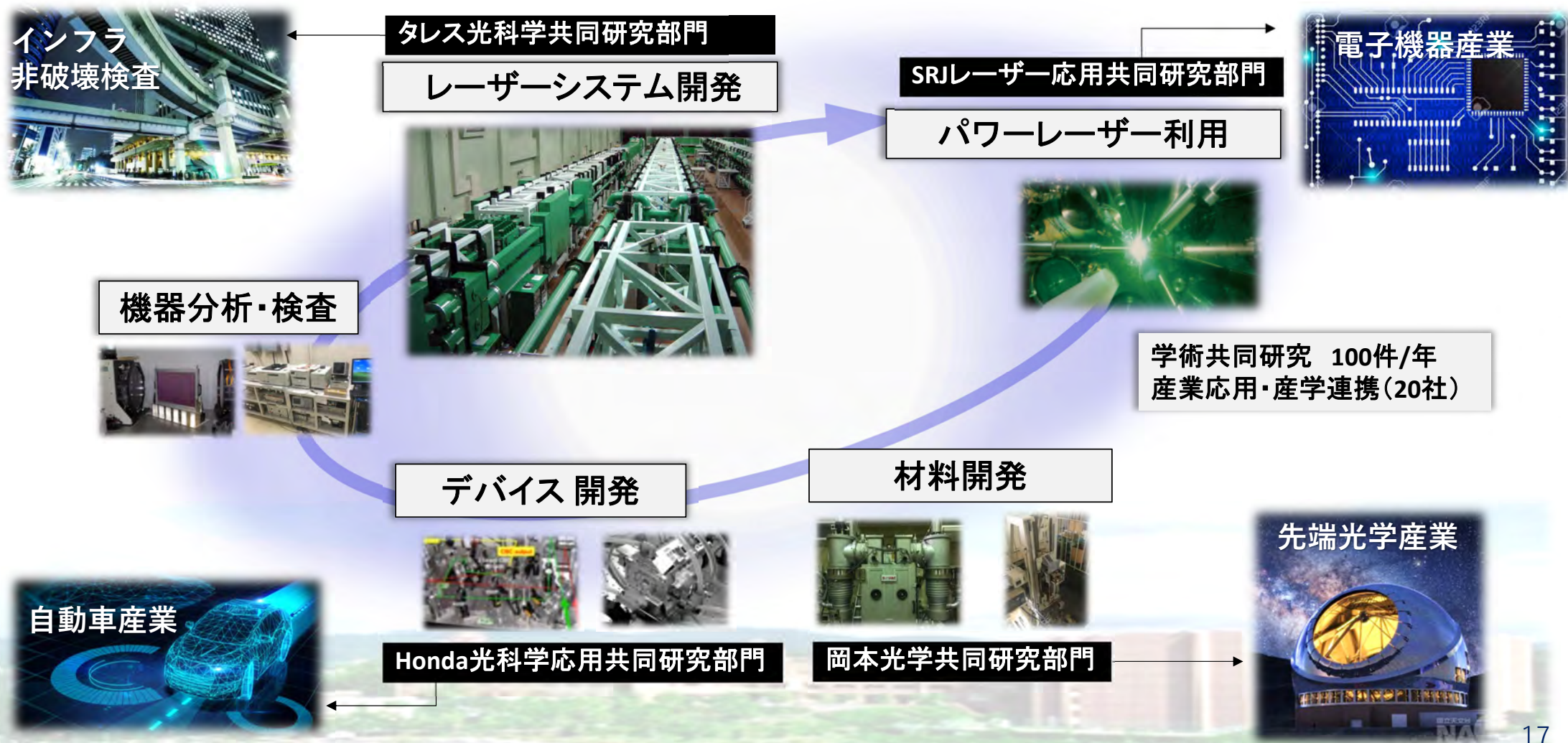
- ① 核融合研究開発自体がコ・クリエーション：
学術の統合と技術の結集
社会の要求（社会的課題）

様々な社会の情勢の変化の中での新たな可能性

- ② 産業界や他の分野との技術的共創（コ・クリエーション）：
新たなイノベーション創出

- ③ 知の共創（コ・クリエーション）：
新たな学術の創生と
持続可能な人材育成

②新たなイノベーション創出を目指した産業界との技術的共創 (コ・クリエイション)



3つの産学協奏の場:フォーラム活動

延べ174社

パワーレーザー
システムと応用

パワーレーザーフォーラム

50社

- ・ 次期大型レーザー装置建設ワーキング
- ・ 課題解決型コンソシアム

14社

IFEフォーラム

- ・ IFE有識者会議
- ・ レーザー核融合戦略会議など
- ・ 国際シンポジウム支援
- ・ 若手国際賞 (IFSA-Yamanak Awards
アジア物理学会PPD-U30)

レーザー核融合と応用

光科学フォーラムサミット
(毎年300名、100社程度が参加)

110社

光エレクトロニクス フォーラム

- ・ 半導体レーザーなどプロジェクト化
- ・ 教育プログラム

レーザー材料・デバイス開発と応用



レーザー科学研究所100

「③知の共創」のカギとなるレーザー核融合定常運転実証を実現する次世代の大型高繰り返しレーザー

◆ パワーフォトリニクス2つの革新

- 世界一の高平均出力（メガワット）大型レーザーシステムを日本の強みで実現
- 多種レーザー量子ビーム（THz、X線、中性子）を独自のプラズマデバイスで実現

大量の小さな大出力光源（LD：10MW）



100Hz/160beam/16beamlet

20PW-30fs/8kJ ns single side

10Hz

50-100m

Area 1

- 量子真空物理学
- レーザー核物理学
- 超高強度場物理学
- レーザー宇宙物理学
- 超高圧物理・化学

Area 2

- 超々高密度物理学
- レーザー宇宙物理学
- レーザー核融合炉心プラズマ物理学
- 核融合発電システム工学
- 核融合炉材料工学

10Hz

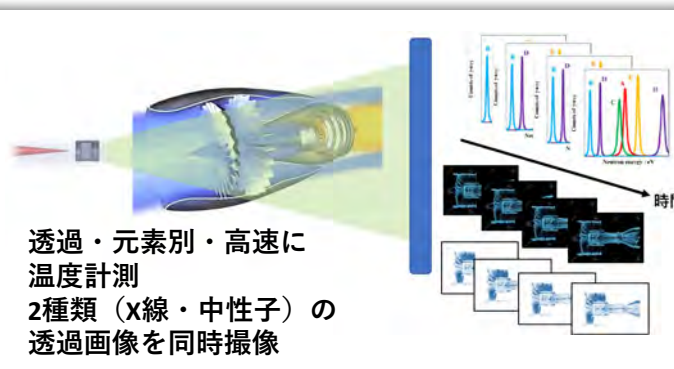
8kJ/ns 12-beam lines Symmetry + 5PW/ ps

90Hz

fs-msec/kJ/PW
THz, EUV, X-ray, g-ray sources
Electron/Ion/Neutron beams

Area 3

- 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



ポテンシャルユーザーの要求仕様調査結果を反映（レーザー学会技術専門員会：2017-2019）

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、
世界に先駆けて極限量子を開拓できるだけでなく新たな産業を創出できる

未知未踏の
学術開拓

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

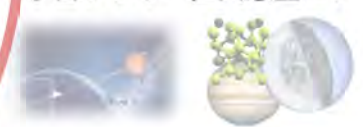
1億気圧（<1万度）

第3の量子物質

world's highest
Averaged Power



宇宙デブリ 巨大惑星コア



核融合ロケット

平均出力（繰り返し）

MW

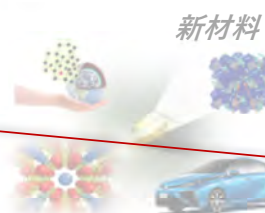
非破壊検査

加速器



生命医科学

量子真空



新材料

高圧量子物質材料

NIF

LMJ

SG-III

OMEGA

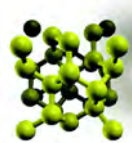
GEKKO-XII

HERMS

100kWビームレットモジュール
(世界一の高平均出力パルスレーザー)

新産業創出

- 1000万気圧の新材料生産工場
- 超小型マルチ（中性子・X線）量子ビーム検査装置



world's highest
energy

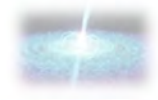
NIF



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

ピーク強度

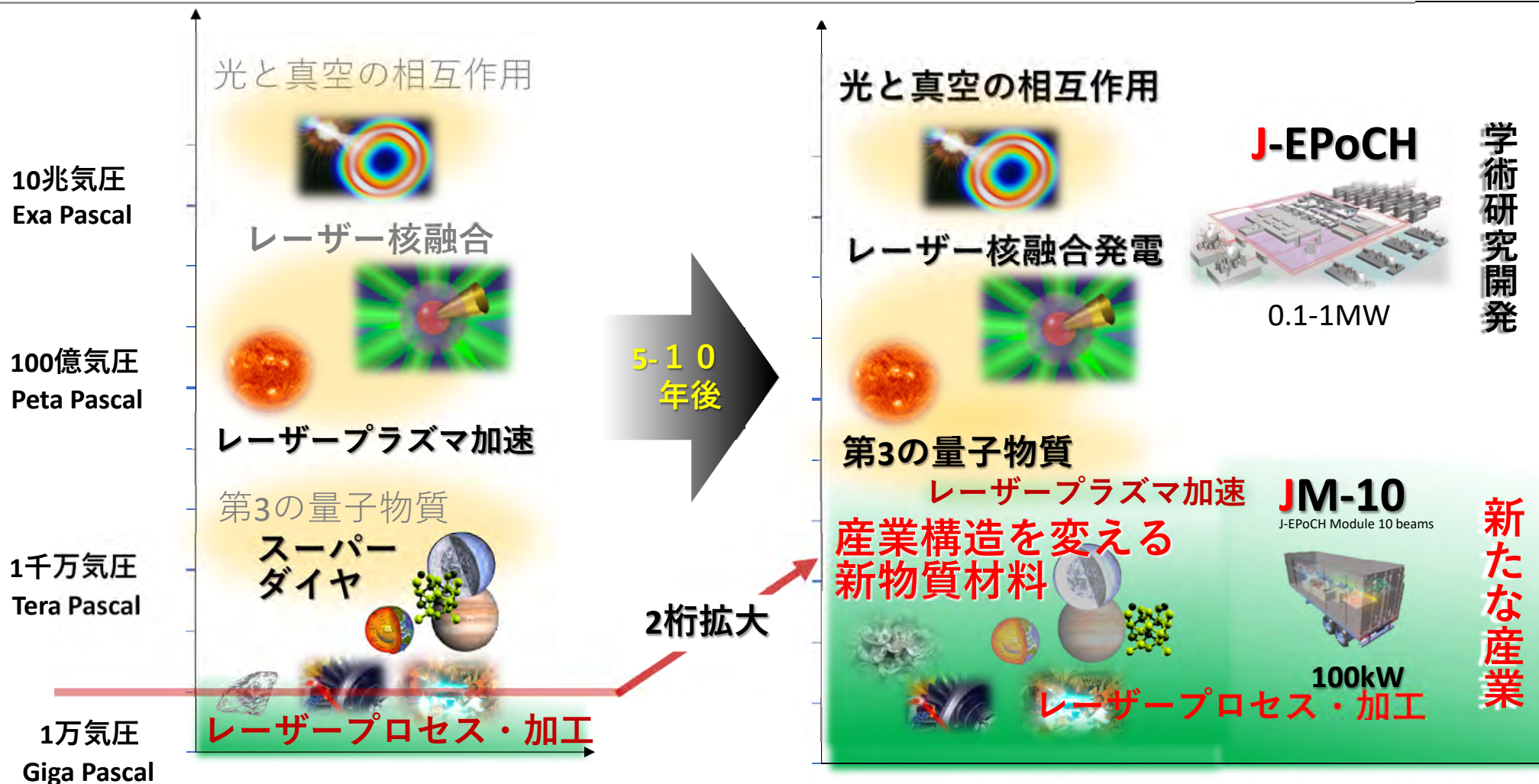
world's highest
Peak Power

eli nuclear physics



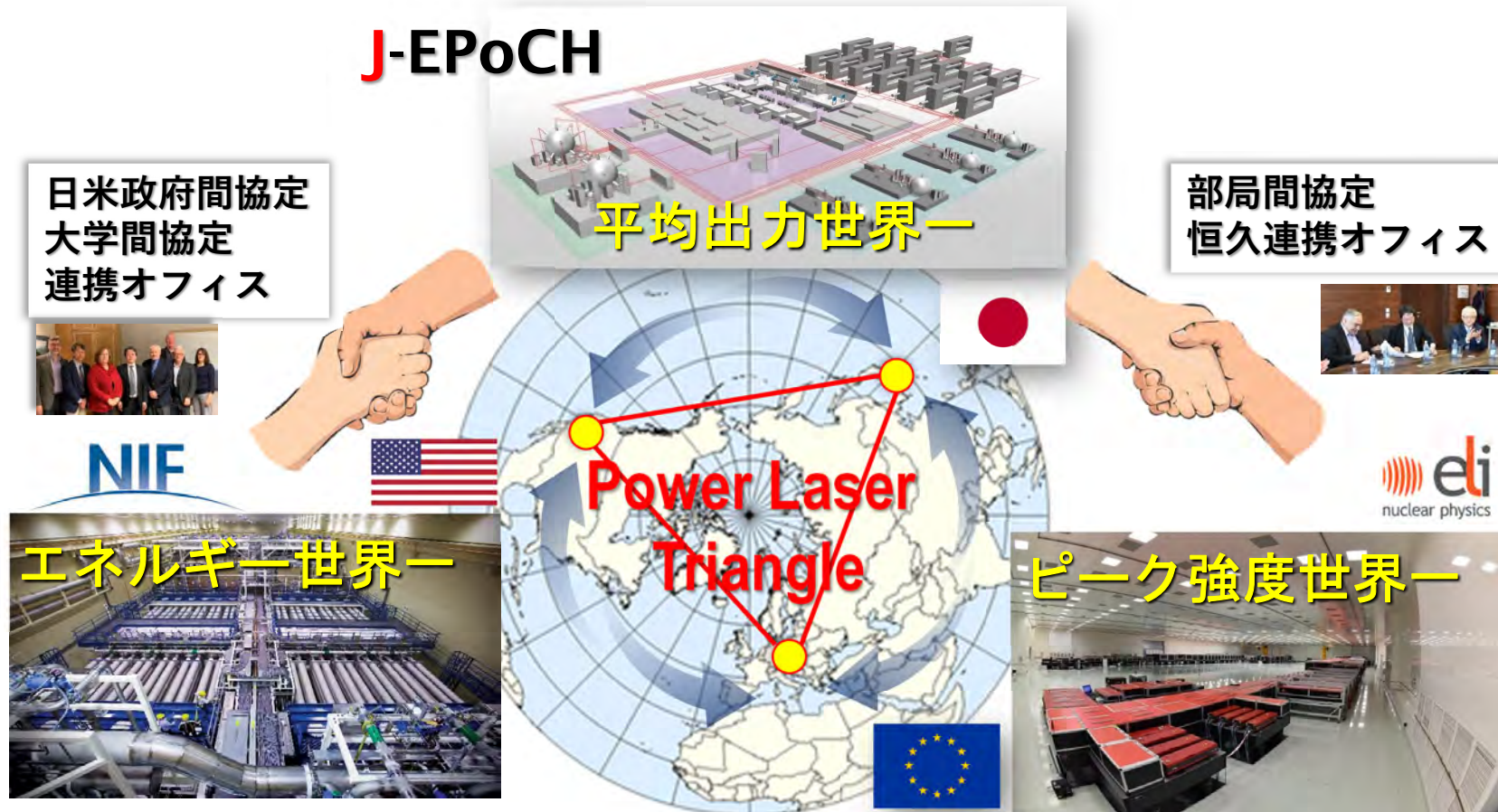
新たな学術を切り拓き、新しい産業を産み出す

パワーレーザーによる産業応用が、加工・プロセスから**新物質材料創生**へ**構造変革**をもたらす



世界一の頭脳循環システムを構築できる世界一連携

- 欧州の世界一のピーク強度のレーザー施設(ELI-NP:ピーク強度:10ペタワット)との連携合意(2019.6.24)と米国の世界一の高出力のレーザー施設(NIF:エネルギー:メガジュール)との連携合意(2020.1.6)ができた。
- これに日本の世界一の高平均出力レーザー施設(J-EPoCH:平均出力メガワット)ができれば、異なる種類で世界一のパワーレーザー施設ネットワークが形成できる。



日本学術会議提言(2020.6.16) 「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」

提言の内容

世界最高峰の繰り返し大型パワーレーザーによる高エネルギー密度科学の中核拠点

我が国において、大学と国立研究機関は、高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関する研究開発を産業界とも連携協力して推進し、多くの人材を育成し、先導的技術を生み出し、この分野におけるコア・コンピタンスを築いてきた。こうした人材育成と先導的技術開発への挑戦の取り組みを産業界の協力も得て一層強化してこの科学技術の更なる飛躍的發展を追求することは、我が国における次の時代を担う国際競争力のある産業創成に極めて有効であり、鮮烈な国際競争の動向に鑑みれば急務である。

よって、これまで高エネルギー密度科学とパワーレーザー技術に関する研究開発を先導してきた大学と国立研究機関は、産業界と連携して知と技術を集約し、組織改編で**世界最高レベルの繰り返し・高出力の大型パワーレーザー施設を高エネルギー密度科学推進の中核拠点として世界に先駆けて設置し、機械学習技術も活用して大型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を実現し、新たな学術の開拓や産業創成に繋がる価値創造・人材育成を行う切磋琢磨・共創の道場とするべきである。**

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



令和2年(2020年)6月16日
日 本 学 術 会 議
総合工学委員会
エネルギーと科学技術に関する分科会

・本提言のポイント
<http://www.sci.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-24-t291-2-abstract.html>
・本提言の原本
<http://www.sci.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-24-t291-2.pdf>

3つのコ・クリエーションを推進できる核融合科学

高エネルギー密度科学

②知の共創と③産業界との共創

- ・ 極限量子材料科学
- ・ 量子真空物理学
- ・ 超高压量子物性物理学
- ・ 超高压材料科学
- ・ 物理インフォマテイクス
- ・ ニュクリアフォトニクス
- ・ プラズマフォトニクス
- ・ レーザー宇宙物理学

新たな量子材料の創生

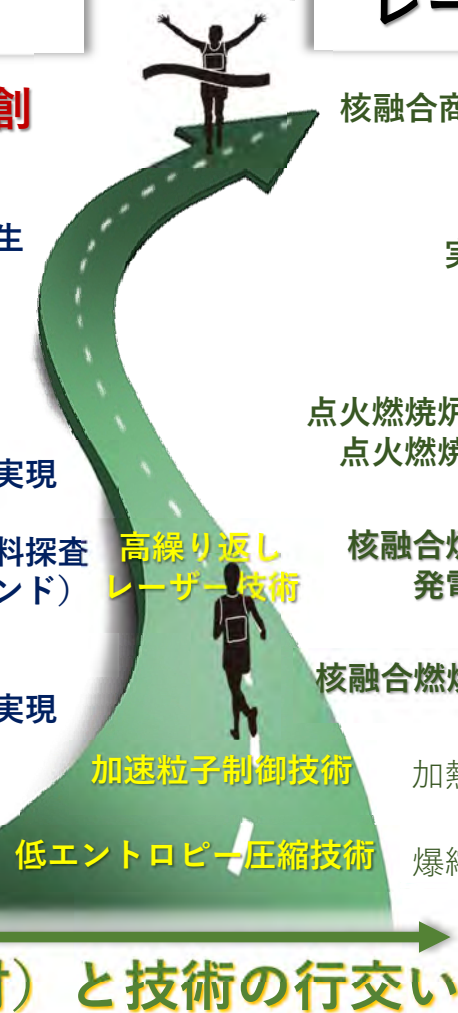
真空の謎、時空の謎
解明への挑戦

第3の量子物質状態実現

超高压凍結技と新材料探査
(スーパーダイヤモンド)
産業構造の変革

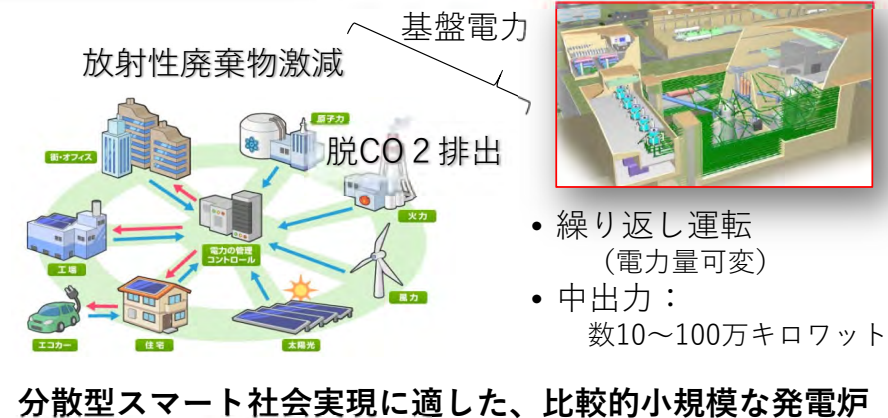
レーザー粒子加速器実現

レーザープロセスの
スマート化



レーザー核融合科学

①学術・技術統合（共創）



GEKKO-XII/LEFEX