



## プロジェクトレビュー

# 2030年以降を見据えたレーザー核融合研究開発の中長期展望

## Strategy of Laser Inertial Confinement Fusion Research and Development beyond 2030

森 芳孝<sup>1)</sup>, 坂上仁志<sup>1)</sup>, 岩本晃史<sup>1)</sup>, 重森啓介<sup>2)</sup>, 三浦永祐<sup>3)</sup>,  
城崎知至<sup>4)</sup>, 河仲準二<sup>2)</sup>, 有川安信<sup>2)</sup>, 藤岡慎介<sup>2)</sup>, 千徳靖彦<sup>2)</sup>

MORI Yoshitaka, SAKAGAMI Hitoshi<sup>1)</sup>, IWAMOTO Akifumi<sup>1)</sup>, SHIGEMORI Keisuke<sup>2)</sup>,

MIURA Eisuke<sup>3)</sup>, JOHZAKI Tomoyuki<sup>4)</sup>, KAWANAKA Junji<sup>2)</sup>,

ARIKAWA Yasunobu<sup>2)</sup>, FUJIOKA Shinsuke<sup>2)</sup> and SENTOKU Yasuhiko<sup>2)</sup>

光産業創成大学院大学, <sup>1)</sup>核融合科学研究所, <sup>2)</sup>大阪大学レーザー科学研究所,

<sup>3)</sup>産業技術総合研究所, <sup>4)</sup>広島大学先進理工系科学研究科

(原稿受付: 2021年3月13日)

2030年以降を見据えた国内におけるレーザー核融合研究開発の中長期展望について述べる。慣性閉じ込め核融合を牽引するレーザー核融合の研究開発は、2010年代において、炉心物理と工学技術の両面において着実に進展した。炉心物理についてはメガジュール級爆縮レーザー及びキロジュール級加熱レーザーの稼働により点火燃焼物理の解明が開始され、工学技術については半導体レーザー及びレーザー媒質の技術進展により将来の炉ドライバ候補となる高繰り返し半導体レーザー励起固体レーザーの開発が加速している。2018年11月にレーザー核融合戦略会議が設立され、国内における中長期的な研究開発の方向性が議論された。その結果、2020年9月に、点火燃焼物理の解明を国際連携で推進し、高繰り返しハイパワーレーザーを活用した炉工学研究を国内で推進する方針が提案された。今後は策定方針に沿い、核融合エネルギー源の実現に向けて、様々な方面に対してその意義をアピールし、支援を賜りながら研究開発を進めていく所存である。

### Keywords:

inertial fusion energy, laser fusion, ignition, high-repetition laser, fusion engineering

## 1. はじめに

2030年以降を見据えた国内におけるレーザー核融合研究開発の中長期展望を概説する。中長期展望は、IFEフォーラムの支援を受けて設立されたレーザー核融合戦略会議(以下、戦略会議と略す)において纏められた[1]。IFEフォーラムとは、1992年に設立されたレーザー核融合に代表される慣性核融合エネルギー(Inertial Fusion Energy: IFE)の実現に向けた研究を振興する組織である。運営母体はレーザー核融合技術振興会である。産業界が会員の組織であり、レーザー核融合研究の支援と関連技術の産業応用、産業の技術協力を推進している。戦略会議の取り組みについては、2019年12月に中部大学にて開催された第36回プラズマ・核融合学会年会のシンポジウム[2]、及び2020年9月にオンラインで開催された核融合科学研究所一般共同研究研究会「Fusion2030研究会」[3]を通じて、コミュニティ内に発信し、議論を深めてきた。そして、最後にオンライン形式の活動報告会を開催し、中長期展望として点火燃焼物理の解明を国際連携で推進し、高繰り返しハイパワーレーザーを活用した炉工学研究を国内で推進する方針を提案した。本方針は、2020年10月に開催された文部科学

省核融合科学技術委員会にて報告された将来のレーザー核融合研究開発に反映されている。

本稿の構成は以下の通りである。第2章で戦略会議設立の背景となるレーザー核融合研究開発の2010年代の進展を概説し、第3章で戦略会議の活動概要を記す。第4章で炉の実現に向けた課題整理と将来展望の概要を紹介し、第5章で近況と今後の取り組みに触れる。最後に第6章でまとめる。

## 2. レーザー核融合研究開発2010年代の進展

慣性閉じ込め核融合を牽引するレーザー核融合の研究開発は、2010年代に、炉心プラズマ研究とレーザー工学技術の両面において着実な進展がみられた。

炉心プラズマ研究では、燃料ペレットへのレーザーの照射方法と核融合点火の方法により様々な方法が提案研究されてきた[4]。最近の進展は、レーザー学会誌の解説記事に詳しい[5]。燃料ペレットへ直接レーザー光を照射して爆縮する方式を直接照射、レーザー光を金などの重金属の空洞内でX線に変換し、そのX線で燃料ペレットを爆縮する方式を間接照射と呼ぶ。点火方式については、中心点火

The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries, Hamamatsu, SHIZUOKA 431-1202, Japan

corresponding author's e-mail: ymori@gpi.ac.jp

方式と高速点火方式がある。中心点火は慣性核融合の研究開始当初より行われている方式であり、燃料球をレーザー光で圧縮し、低温・高密度の主燃料部の中心に高温・低密度の点火プラズマを形成する。一方で高速点火は圧縮により低温・高密度の燃料部を形成するが、その後外部より追加熱を行い、点火・燃焼へと至るスキームである。追加熱のソースとして、超高強度レーザー照射により発生する高速電子や高速イオンのほか、超高压力衝撃波の適用などが提案されている。

2009年米国に完成した国立点火施設 (National Ignition Facility: NIF) の稼働 [6] により、メガジュール級レーザーを用いた間照射による中心点火方式の爆縮実験が進み、燃料の爆縮に使用されたエネルギーを超える核融合エネルギーの放出が達成された [7]。当初目標の一つであった核融合点火実証と利得、すなわち、レーザーエネルギーを超える核融合エネルギー放出の達成は叶わなかったものの [8]、点火に向けた炉心プラズマの性能向上 [9]、及び爆縮燃料の空間均一性を阻害する要因解明 [10] が進められている。中心点火方式では燃料球を高速で圧縮する際に発生する流体不安定性が顕著となり、その結果としておこる主燃料部と点火プラズマとの流体混合によって点火が困難であることがわかっている。一方、高速点火方式では燃料の圧縮と加熱・点火を分離することにより、流体不安定性の抑制や点火時のエネルギー結合効率向上などの利点が多く、日本で重点的に研究されてきた。2009年大阪大学レーザーエネルギー学研究所 (現 レーザー科学研究所) に加熱用レーザー LFEX (Laser for Fast ignition Experiment) [11] の建設が完了し、キロジュール級ピコ秒加熱レーザーによる高速点火原理実証実験: Fast Ignition Realization Experiment (FIREX) プロジェクトが開始された。高速点火の実現に向けて、爆縮レーザー 12 号との併用により、核融合生成中性子数の増大、高速電子の制御、加熱効率の向上をめざした研究が進められている [12-16]。

レーザー工学技術については、半導体レーザー及びレーザー媒質の技術進展により、日欧米にて将来の炉ドライバ候補である高繰り返し半導体レーザー励起固体レーザーの開発が加速している [17]。レーザーモジュールの開発仕様として、パルスエネルギー 100 ジュール超、パルス幅ナノ秒、繰り返し 10-100 Hz が掲げられている。欧米では、欧州プロジェクトとして 2011 年から東欧に建設が進められてきた先端高強度レーザー施設 Extreme Light Infrastructure (ELI) [18]、及びチェコ共和国の高平均出力パルスレーザープロジェクト HiLASE [19] に代表される欧州各国主導の計画に支えられ、レーザー開発が進められている。核融合研究を通じてレーザー開発技術を蓄積した米ロレーンズ・リバモア研究所や、英国ラザフォードアップルトン研究所が連携機関として参画している。国内では、大学、国研、及び民間企業で培われてきたレーザー工学技術を基盤として、内閣府、経済産業省、科学技術振興機構等の国策により開発が支援されてきた。国内外における半導体レーザー励起固体レーザーの開発動向については、レーザー学会誌の解説記事が詳しい [20]。

国内では、民間企業の参入により、レーザー核融合の研究開発環境が拡張された。レーザー核融合研究は、1983 年に大阪大学レーザー核融合研究センター (現: レーザー科学研究所) に整備された 12 号レーザー施設を中核として推進されてきたが、浜松に新たな研究開発拠点が整備された。2005 年、レーザー核融合発電の実現に熱い情熱を傾けた晝馬輝夫 [21] を理事長として、浜松に光産業創成大学院大学が設立されると、2008 年には、当大学に隣接する浜松ホトニクス社産業開発研究センターにレーザー核融合の研究開発体制が整備された。

浜松では、民間大学等共同で、将来の炉につながる高繰り返しレーザーを活用したレーザー核融合の研究開発プロジェクトが進められてきた。本プロジェクトでは、繰り返し 1 Hz、エネルギー 10 ジュール級の高速点火レーザードライバ HAMA [22, 23] を基盤として、発電に繋がる連続運転システム原理実証をめざした研究開発が進められた。その進展については、2015 年に本学会誌にて小特集が組まれている [24]。高強度レーザーの対向照射によるプラズマ加熱 [25, 26]、ベレットインジェクションによる連続中性子発生 [27-29]、及び球殻ベレットインジェクション開発 [30] が実施され、プロジェクトの目標として、レーザー核融合で発電実証を行うミニ炉 CANDY 構想 [31] が掲げられた。CANDY 構想の背景と現状については、最近 IOP 社より刊行された書籍「核融合エネルギーの商用化」の第 6 章に記されている [32]。

浜松における取り組みは、2017 年に本学会誌にて小特集として取り上げられた「民間企業による核融合研究」においても触れられている [33]。浜松ホトニクス社では、光産業創成大等との共同研究と並行して、社独自の研究開発も進められており [34]、高繰り返し 100 ジュール級レーザー TERU とレーザー核融合実験用のビームラインが整備されている [35]。

レーザー核融合ドライバ開発から振り返る 2010 年代は、成熟と萌芽が交錯した時代であった。点火燃焼を見通せるシングルショットメガジュール級レーザーの稼働によりフラッシュランプ励起大型レーザー技術が成熟する一方で、半導体レーザー励起固体レーザーの進展により、新たに炉につながる 1-10 Hz 級の高繰り返しレーザーが本格稼働した。図 1 にレーザー核融合におけるレーザードライバの動向を示す。レーザー核融合の研究は、従来、数時間に 1 回の割合で稼働するフラッシュランプ励起の大型レーザーを駆使した炉心プラズマの点火燃焼原理実証に注力されてきた。フラッシュランプ励起大型レーザーの集大成が NIF である。一方、半導体レーザー励起固体レーザーの出現により、高繰り返しレーザーによる核融合研究が可能となった。国内では、世界に先駆けて、高繰り返しレーザーによる核融合研究が萌芽し、多目的高繰り返しハイパワーレーザー施設の提案により、その芽を育む土壌が整備されようとしている。

核融合に代表される長丁場の研究開発を継続するためには、世代継承も含めた定期的な進捗確認と評価が不可欠である。国内外における研究開発の進展と国内の研究環境の

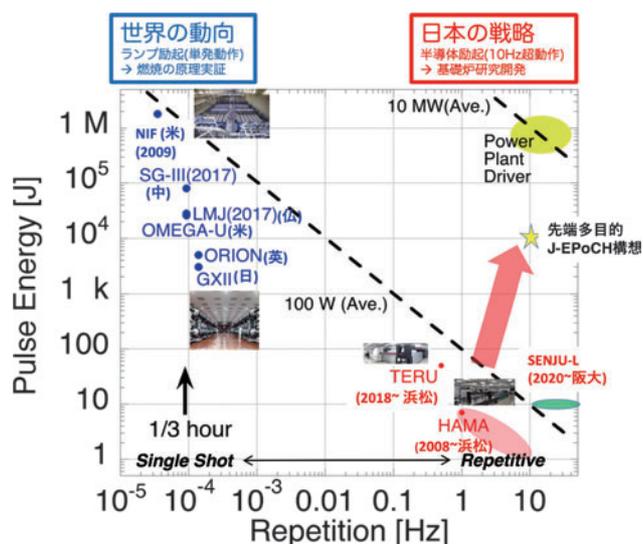


図1 レーザー核融合におけるレーザードライバーの動向。

拡張を踏まえ、2018年11月に、IFE フォーラムの支援を受け、レーザー核融合戦略会議が設立された。幅広い世代の研究者が結集し、オールジャパン体制で、レーザー核融合発電炉の実現を見越した中長期的展望の議論を開始した。第3章で、活動概要を記す。

### 3. レーザー核融合戦略会議の活動概要

戦略会議の体制は、4つのワーキンググループ (WG) と、3つの班からなる。図2に体制とスケジュールを示す。4つのWG (炉, ターゲット, レーザー, 炉心) を縦糸に、3つの班 (TRL: Technology Readiness Levels, リソース, アウトリーチ) を横糸とした体制を構築した。炉の実現に向けて、最新の実験炉概念設計を元に、今できることを整理整頓する作業を進めた。有限の期限内に一定の成果を得るため、合宿 (浜松合宿: 2019年9月場所 光産業創成大学院大学, 館山寺) を企画し、活動の中核に据えた。会議の様子を図3に示す。

戦略会議の設立に際し、以下の3点に留意した。第1点: 中長期的な戦略が検討可能なチームを形成すること, 第2点: レーザー核融合炉の将来像を見据えること, 第3点: これから実行できる項目を見定めることである。

第1点のチーム形成については、レーザー核融合分野に加え、重イオンビーム慣性核融合、及び核融合炉工学の研究者に参画を要請した。結果、20機関より委員37名、オブザーバー2名の協力を得ることができ、炉の実現を中長期的に検討できる人的ネットワークが形成された。この人的ネットワークにより、慣性閉じ込め方式であるレーザー核融合炉実現に向けた具体的な課題検討が可能となった。

第2点のレーザー核融合炉の将来像については、4つのWGに分かれて炉の実現に向けた課題整理を行った。2018年11月の第1回全体会議においてワーキング活動の進め方を議論し、2019年4月の第2回全体会議において活動進捗を確認した。その後、2019年9月の浜松合宿にてワーキング作業を集約し、炉システム評価シート (第4.2節) を整備した。本評価シートは、高速点火レーザー核融合実験炉

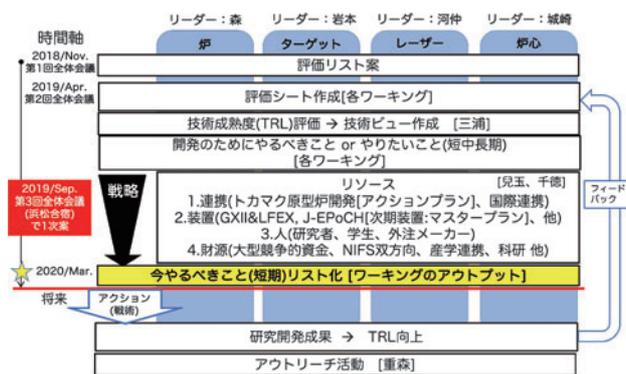


図2 レーザー核融合戦略会議の体制とスケジュール。



図3 レーザー核融合戦略会議の様子: 第1回全体会議2018年11月(上), 浜松合宿2019年9月 ワーキング作業(左下), 全体会議(右下)。

(LIFT) 概念設計報告書[36]に記載されている仕様を確認し、開発項目を書き出し、各要素技術の現状・課題を網羅的に俯瞰したものである。課題から開発目標を定め、開発チーム組織・研究資金の獲得など、次のステップへ進むための指針を得るために活用できる。

第3点の実行できる項目の見定めについては、3つの班で、現状リソースで実現可能な項目を整理した。

TRL班はレーザーによる炉心プラズマ研究と高繰り返しレーザーによる炉工学研究の不連続性に留意した技術ビュー (第4.3節) を作成し、要素技術において必要な研究開発項目の俯瞰と抽出を試みた。技術ビューは、高繰り返しレーザーシステムを基軸としたレーザー核融合研究開発ロードマップ案 (第4.4節) に反映された。

リソース班は、国内および、国際的な研究開発体制の整備を進めた。国内における基盤整備については、高繰り返し大型パワーレーザー施設としてパワーレーザーインテグレーション新共創システム: J-EPoCH 計画が提案され、日本学術会議マスタープラン2020のヒアリングを経て、文科省大型プロジェクトロードマップ2020にて審議された。ロードマップ2020への掲載は叶わなかったものの、国内に繰り返し大型パワーレーザー施設を整備することの重要性については、日本学術会議からの提言に言及されている[37]。国際連携については、2019年1月に、日米政府間科学技術協力事業として新たに「高エネルギー密度科学」に

関する協定が文部科学省－米国エネルギー省間で締結されると、2020年1月、米国ローレンスリバモア研究所とメガジュール級レーザーを用いた燃焼プラズマ実験への日本人研究者の参加の合意が交わされた。

アウトリーチ班は、レーザー核融合エネルギーの社会への発信の一環として、関係機関の協力の元、主に小学生を対象とした体験型・対話型公開イベント「核融合とレーザー作る・体験する・学ぶ」を2019年9月に大阪で開催した[38]。公開イベントの開催に際し、第2回全体会議において、対象をフォーカスすることの重要性について議論が交わされ、方向性と目的が精査された。当日は、当初の想定を遥かに上回る588名の参加者に来場いただき、核融合とレーザーに触れていただく機会を提供できた。

戦略会議の活動を踏まえ、点火燃焼物理の解明を国際連携で推進し、高繰り返しレーザーを活用した炉工学研究を国内で新たに推進する方針が提案された。従来のシングルショットハイパワーレーザーで得られた知見と国外のシングルショットレーザー拠点との連携を活かしつつ、国内では炉の実現に不可欠な高繰り返しハイパワーレーザーを基軸に据え、レーザー核融合研究開発を推進する。今後は、第4章で示す将来展望に沿って、研究開発を進めていく予定である。

#### 4. レーザー核融合炉実現に向けた課題整理と将来展望

本章では、まずレーザー核融合炉の構成要素に触れ、戦略会議で纏めた3つの成果：炉システム評価シート、技術ビュー、研究開発ロードマップ案を紹介する。その後、戦略会議の活動が契機となって立案された炉工学基礎研究を加速する研究提案、及び原型炉開発に向けたアクションプランへの反映について述べる。

##### 4.1 レーザー核融合炉の構成要素技術

レーザー核融合炉は、電力駆動のパルス炉である。図4に、レーザー核融合発電炉 KOYO-Fast を構成する要素技術を示す。炉は、核融合反応を起こす真空炉容器と核融合

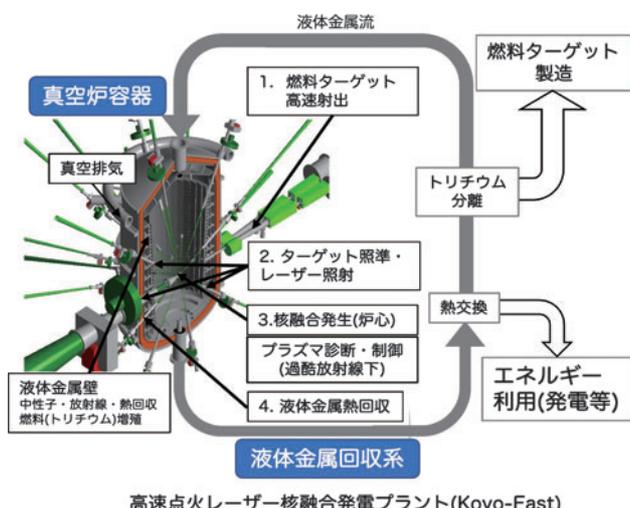


図4 レーザー核融合炉を構成する要素技術。

エネルギー回収系で構成される。真空炉容器内では、炉の中心めがけて連続高速射出される重水素トリチウム燃料ペレットに、照準をあわせてレーザーを連続照射し、炉心で核融合反応をパルスの定常発生させる。核融合エネルギー回収系では、液体金属リチウム鉛を媒体として、熱回収と燃料製造を担う。炉壁を流れる液体金属で、炉心からパルスの定常発生する核融合エネルギーを受け止め、熱として回収する。液体金属中では核融合生成中性子とトリチウム鉛との核反応によりトリチウムが生成され、分離の後、燃料ターゲット製造へ供給される。回収熱は発電等のエネルギー利用へ供され、発電した電力の一部を使ってレーザーを駆動する。

戦略会議では、炉の実現に向けた課題整理に際し、過去の炉設計を踏まえ、最新の概念設計である実験炉 LIFT に着目した。これまで、国内外において様々なレーザー核融合炉が設計されてきた。最近の概念設計を列挙してみると、海外では、米国の間接照射中心点火方式による LIFE [39]、欧州の直接照射衝撃波点火方式を採用した HiPER [40]、国内では、直接照射高速点火方式による Koyo-Fast [41]、高速点火方式で炉のパルス出力の抑制と高繰り返し化を狙った FALCON-D [42] がある。いずれも商用炉を想定したものであるが、LIFT は、2015年に提案された当時最新の炉心プラズマ研究と炉用ドライバー技術の進展に基づくレーザー核融合実験炉の概念設計であり、発電実証から商用炉に向けた材料試験を目的として設計された[43]。実験炉は Phase-I から III までの3段階で構成され、レーザードライバーは3段階で共通で、半導体レーザー励起低温冷却 Yb セラミックレーザーを採用している。爆縮レーザー 500 kJ (波長 0.35  $\mu\text{m}$ )、加熱レーザー 150 kJ (波長 0.53  $\mu\text{m}$ ) で、繰り返し動作 1–4 Hz を想定している。Phase-I の炉チャンバは、SUS で構成され、繰り返し核融合の燃焼の実証と物理研究が目的である。Phase-2 の炉チャンバは、水冷却の固体ブランケットを採用し、発電実証が目的である。Phase-3 の炉チャンバは、液体リチウム鉛を採用し、商用炉の経済性に資する材料試験が目的である。

実験炉 LIFT を参考に、レーザー核融合炉のプラント構成要素と機能・役割の整理、及び構成要素間のフローを可視化した。レーザー核融合炉のプラント構成要素を図5に示す。レーザー核融合炉の構成要素を10要素(AからJ)に分類した。それぞれの要素は、単一ないし複数の系で構成され、その系を合計19の系に分類した。それぞれの機器・系の機能役割を整理し、機器・系毎に、評価する担当者を割り当てた。図6は、構成要素のエネルギーフロー、トリチウムフロー、デブリフローを示したものである。それぞれのプラント構成要素は、他要素と接続されており、境界条件を共有する。炉成立のためには、それぞれの要素の仕様適合のみならず、他要素を考慮した境界条件の最適化が求められる。炉実現に向けた課題整理には、各要素仕様の到達度とともに、境界条件を考慮することが欠かせない。

##### 4.2 炉システム評価シート

レーザー核融合炉実現に向けた課題整理のために、実験炉 LIFT の仕様を踏まえた炉システム評価シートを整備し

た。炉システム評価シートの目的は、炉の実現に向けて開発項目を抽出して、各要素技術の現状・課題を網羅的に俯瞰することである。課題から開発目標を定め、開発チーム組織・研究費獲得など次のステップへ進むための指針を得るために活用する。炉システム評価シートは、構成要素の

機器／大項目毎に整備した。内訳は、小項目、炉設計仕様、開発状況、研究開発課題、課題解決リソースからなる。表1に大項目と小項目の分類を示す。

評価シートの作成は、4つのWGが担当し、TRL班が総合調整を行った。例として、レーザードライバー爆縮レーザーの評価シートを図7に示す。炉システム評価シートには、取りまとめ者による総評を記載した。炉システム評価シート大項目毎の総評を表2に示す。この内容は、総合調整を担うTRL班によって技術ビュー作成に反映された。

尚、炉心ワーキングでは、評価リスト作成の過程において点火・燃焼に向けた課題の抽出を行い、発電炉で要求される高利得核燃焼の実現に向けたシナリオ作成を行った。その内容は、レーザー学会誌の解説記事に掲載されている[44]。

構成要素	機器(大項目)	機能・役割	担当
A. 計測制御系	1. 計測制御系	核融合炉の運転制御・出力制御・事故予防検知	
B. ドライバー系	2. レーザー系	発振 → 増幅 → 伝送/パルス圧縮 → 波長変換 → 集光 → 追尾	河仲
	2A. 爆縮レーザー		
	2B. 加熱レーザー		
	2C. 集光光学系/ステアリング		
	3. 最終光学系	照射	梶村
C. 燃料系	4. ターゲット製造系	ペレット生産	岩本
	5. ターゲットインジェクション系	燃料層形成 → インjekター・射出	岩本
D. 炉心	6. 核融合反応(サイエンス)	レーザー吸収・アブレーション → 爆縮 → (追)加熱 → 点火 → 燃焼 → エネルギー放出	城崎
	6A. 爆縮		
	6B. 高効率加熱		
	6C. 点火・燃焼		
E. 炉	7. 第一壁	輻射・荷電粒子捕獲、エネルギー吸収	羽原
	8. 増殖ブランケット	エネルギー変換・燃料増殖	後藤/八木
	8A. 固体		
	8B. 液体		
	9. 燃料回収系	燃料製造、トリチウム回収・精製、貯蔵	片山/近田
	10. 真空容器	真空・応力保持	菊池
F. 冷却系	11. 排気系	真空条件の維持、(燃料の排気)	菊池
	12. 液体増殖材ループ(1次系)	原子炉容器の冷却、2次系への熱の伝達、トリチウム回収	森
G. 発電設備	13. 中間熱交換器	1次系と2次系の熱交換	日渡
	14. 2次系ループ	1次系の冷却と蒸気発生器への熱の輸送	
	15. 蒸気発生器	蒸気の発生	
H. 工学的安全設備	16. 緊急時冷却系	緊急時の崩壊熱除去	
	17. 格納施設(建屋)	放射性物質の放散の抑制防止	
I. 保守交換系	18. 保守交換系	最終光学系の交換	
J. バックエンド系	19. バックエンド系	放射性廃棄物の処分	

図5 レーザー核融合炉のプラント構成要素。

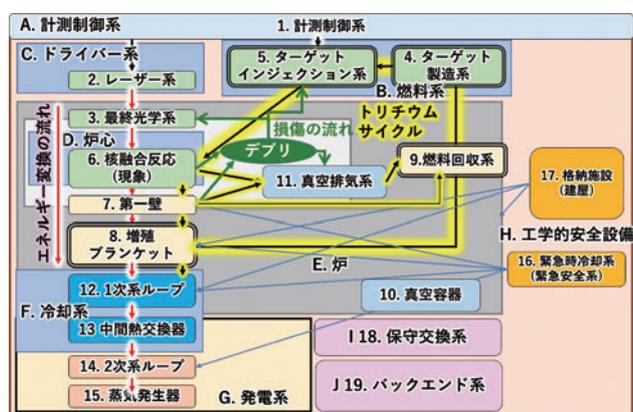


図6 レーザー核融合炉プラント構成要素間のエネルギーフロー、トリチウムフロー、デブリフロー。

表1 炉システム評価シートの大項目と小項目の分類。

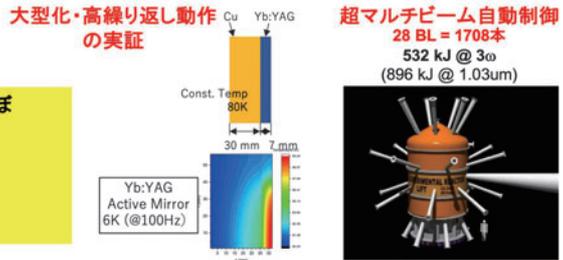
大項目	小項目
2 A. 爆縮レーザー	ファイバフロントエンド部・増幅モジュール 波長変換・テラードパルス/超マルチビーム
2 B. 加熱レーザー	ファイバフロントエンド部・光パラメトリックチャープパルス増幅部 Yb:YAG (225K) 増幅部・パルス圧縮部
2 C. 集光光学系/ステアリング	光学駆動部
3. 最終光学系	最終反射ミラー・ビームポート保護
4. ターゲット製造系	初期トリチウム実装・ターゲット生産・燃料層形成・製造個数
5. ターゲットインジェクション系	ターゲット移送・ターゲット射出・トラッキング・シャッター
6 A. 炉心 爆縮	高密度・高面密度爆縮
6 B. 炉心 高効率加熱	点火温度までの加熱
6 C. 炉心 点火・燃焼	点火・核燃焼特性(高利得燃焼)
7. 第一壁	耐久負荷・壁材料(固体壁)・壁材料(液体壁)・SiC/SiC構造体(液体壁)・LiPb温度(液体壁)
8 A. 増殖ブランケット(固体)	ブランケット方式・ブランケット構造材・固体増殖剤/増倍材 冷却材・放射線遮蔽・トリチウム増幅率・エネルギー増倍率
8 B. 増殖ブランケット(液体)	同上
9. 燃料回収系	初期トリチウム装荷・燃料サイクル・排ガスT回収設備 LiPbT回収設備・同位体分離設備(H除去)・T所蔵設備 水処理設備(発電系)・T除去設備(雰囲気浄化)
10. 真空容器	真空容器
11. 排気系	排気ポンプ・要求真空度/排気速度・排ガス精製設備
12. 冷却系:液体増殖材ループ(1次系)	循環ポンプ/LiPb純化設備・LiPb内Li濃度制御
13. 冷却系:中間熱交換器	熱交換器・伝熱管材料・鉛リチウム/水反応
14. 発電設備:2次系ループ	タービン発電機

## 2. ドライバー 1/3

単一モジュールまたはスモールモデルでの技術的問題はほぼ解決できる見込み

**【主な重要課題】**

- ・大型化、繰り返し化実現のための実験、検証
- ・超マルチビームの自動制御システムの検討



大項目	炉設計仕様	開発状況 [小項目]	研究開発課題	課題解決リソース
爆縮レーザー	64 kJ/ω/4 Hz (モジュール) → 100J/4Hzに変更 500 kJ/3ω/4 Hz, 30 nsテラード (14モジュール)	【ファイバフロントエンド部】 (1) パルス波形整形の現状 パルス幅約10psから数10nsまで任意波形整形可能 (2) 最大パルスエネルギーと繰り返し周波数 ファイバコア口径約135μmが実現し、40nsパルス幅、28.5m出力、M2=1.6 (3) SSD	(1) 数10nsの増幅時のSBS抑制技術の検討 (2) ラック挿入化を検討 (3) 高出力時の長期出力およびビーム安定性を測定する必要あり。 (4) 技術的には特になし、コンパクト化	・kW級ファイバレーザー
		【増幅モジュール】 (1) Yb:YAG (77K) による10J/10Hz動作：確認	(1) 10cm級金属-セラミック接合技術 (1) 100J/>10Hzの実証試験	・LFEX ・GENBU/QUADRA
		【波長変換】 (1) 31.7J, 10Hz, 317W, 10ns, YCOB (2) 5.5J, 10Hz, 55W, 10ns, LBO (3) 2.7mJ, 300kHz, 820W, 8ps, LBO	(1)(2) 1kW級レーザーの波長変換 (2) 大口径LBO結晶製作	・VUV5kWレーザー ・GENBU/QUADRA ・LBO結晶は現状中国製、テストはLFEXで可能
		【テラードパルス/超マルチビーム】 (1) 100J/>10Hzモジュールを用いたマルチビームによる5ステップテラードパルスの実現と6角形配置によるビームレット化 (1) 9kJ@3ω/beamlet(61beam) (2) 28ビームレットによる>500kJ@3ω	(1) (2) 現状、概念設計のみとし、実証はシステム製作時 (2) 超マルチビームの自動制御	・GENBU/QUADRA-UPGRADE (50)は未来事業で目指す

図7 炉システム評価シート (爆縮レーザー)。

表2 評価シートの総評。

大項目	総評
2 A. 爆縮レーザー	単一モジュールまたはスモールモデルでの技術的問題は、ほぼ解決できる見込み。主な重要課題は、大型化、繰り返し化実現のための実験・検証、および、超マルチビームの自動制御システムの検討。
2 B. 加熱レーザー	超短パルスは光パラメトリック増幅と Yb:YAG (225 K) の両方で検討。主な重要課題は、大型 LBO 結晶 (光パラメトリック増幅用) の品質向上/さらなる大型化、および高繰り返し動作による誘電体多層膜回折格子の実証試験が必要。
2 C. 集光光学系/ステアリング	光学素子などの個別動作は確認できているが、ターゲット供給との調整ができていない。主な重要課題は、集光のためのコヒーレントビーム結合、および、ステアリング関連のビーム制御 (ターゲット供給との調整が必要)。全てのビームによる複雑なシステム化の検討が必要。
3. 最終光学系	最終反射ミラーは 10 ms 動作の回転シャッターで保護。ビームポートは中心磁束密度 0.9 T のパルス磁場で90%のエネルギー負荷を除去可能と試算。コイル自体の放射化対策として、筐体をアルミナ、導体を LiPb の液体金属とし、循環・冷却対策の研究が必要。
4. ターゲット製造系	フォームシェル法の基礎 (シェル、燃料充填) 研究が進展。最終的なターゲットの仕様を決めるために炉心研究の進展を待つ。DT 燃料を使用した実験技術の保有・維持が必要。大量生産技術を確認し製品化。
5. ターゲットインジェクション系	常温でのインジェクション研究は進展。極低温環境での大量移送、連続インジェクションは大きな課題。概念設計をさらに進展させる必要がある。
6 A. 炉心 爆縮	中実球の導入により 6 ビーム爆縮で面密度 $\rho R = 0.08 \text{ g/cm}^2$ コア実現。DT 燃料で高密度 (300 $\text{g/cm}^3$ ) および、高面密度 ( $\geq 2.0 \text{ g/cm}^2$ ) を実現する設計 (ガイディングコーンとの共存)。
6 B. 炉心 高効率加熱	2016年統合実験にて、8%加熱 (高速電子) および、1.7 keV 加熱 (拡散加熱) を実証。点火実証に向けたスケールアップが必要。加熱レーザーを長パルス・高エネルギー化した場合の加熱特性・点火実現加熱機構。
6 C. 炉心 点火・燃焼	圧縮コアを仮定し、任意の電子ビームを入射して点火条件・核融合出力評価から、LIFT 設計へ。コード妥当性検証が必要である。
7. 第一壁	炉設計仕様の妥当性 (シミュレーション) は議論進行中。実際の環境での研究開発課題を明確化し、研究者人口を増やしたい。
8 A. 増殖ブランケット(固体)	LIFT Phase II で使用が想定され、磁場核融合原型炉の詳細計算。一部材料開発の成果を適用可能。レーザー用のパラメータの最適化が必要。
8 B. 増殖ブランケット(液体)	LIFT Phase-III および、KOYO-F で基本検討は完了。LiPb 自体は磁場核融合でも利用が検討されており成果。数値計算ツール等は適用可能。カスケード方式は独自開発が必要。
9. 燃料回収系	ITER に向けて研究されている。LiPb 処理系は基礎研究段階。循環連続運転実証等の工学試験要。要素技術をレーザー炉に最適化した処理系の具体化が必要。
10. 真空容器	LIFT-II, III 共に明確な開発状況の記載なし。実スケールモデルを製作して試算必要。
11. 排気系	ポンプ同位体分離の状況が不透明。ポンプ設計仕様を含め同位体分離の検討必要。
12. 液体増殖材ループ (1次系)	容量 50 L/min の液体金属ループは実証済。発電実証クラス 100 $\text{m}^3/\text{min}$ 級システムは、もんじゅ技術の適用検討。LiPb 純化設備はレーザー特有。
13. 冷却系：中間熱交換器	LiPb と伝熱管材料の腐食試験等、中間熱交換器伝熱管材料の開発が重要。腐食等を考慮した材料開発、破損時の LiPb - 水反応試験が課題。
14. 発電設備	2次系ループ：蒸気発生器で過熱蒸気条件が達成可能。

炉システム評価シートの特徴は、炉設計仕様を固定した上で、現在技術との乖離を把握し、開発状況の共有をめざした点である。レーザー核融合炉概念設計における従来の検討では、過去に概念設計に最新の研究開発成果を盛り込む方式で、炉設計の仕様更新が行われてきた。従来の方式では、概念設計に最新成果が反映される利点がある一方で、検討のリソースが各々の専門領域の仕様の再検討に注力され、専門領域を跨いだ炉実現に向けた現状と目標値との乖離の共有化は課題であったように思える。今回、検討対象を実験炉 LIFT の概念設計仕様値に固定したことで、検討リソースが現状技術と開発目標との乖離の把握にフォーカスされた。更に、評価シート構成のフォーマット統一により、各要素・系の担当者と境界条件を共有する他要素・系の担当者ととの開発進捗状況の共有が可能となった。現状技術と開発目標との乖離の把握は、どのように開発目標を達成していくかの研究開発工程を顕在化し、それが技術ビューに繋がっている。

### 4.3 技術ビュー

技術ビューは、要素技術において必要な研究開発項目の抽出と俯瞰のために整備された。特に、レーザー核融合開発が内包するシングルショットレーザーによる炉心プラズマ研究と、高繰り返しレーザーによる炉工学研究の不連続性に留意し、要素技術において必要な研究開発項目の抽出と俯瞰を試みた。技術ビューの指標軸を、高繰り返し高出力レーザー装置の性能とした。レーザー核融合技術ビューの指標を図8に示す。目的は想定されるレーザー装置を利用したの開発項目、課題および、その段階までに達成すべき目標を明らかにすることである。研究の進展と共にレーザーは高出力化されるので、指標軸は核融合出力と等価と考えることができる。レーザー核融合において、核融合出力は、技術成熟度レベル (TRL) の評価を実施するにあたり最適な客観的評価軸となりうる。つまりは、TRL との相関を同時に与えることも可能になる。炉につながる高繰り返しレーザー装置を指標とすることで、研究開発をシームレスにつなぐことができる。

技術ビューは、レーザー核融合炉のTRL評価の検討過程において、考案されたものである。以下に、TRL評価から技術ビューに至る経緯を記す。技術成熟度は、研究開発に

おける個々の技術の成熟度を系統的に評価する手法である。これまでも、本学会誌に、笠田等による核融合炉実現に向けたTRL評価の報告があり、レーザー核融合のTRL設定についても提案されている[45]。本会議では、最近の研究開発の進展を踏まえ、最新の高速点火レーザー核融合実験炉設計LIFT Phase I-IIIをゴールとして、各要素技術についてTRLを再評価するために活動を開始した。しかし、レーザー核融合の場合、レーザードライバー開発ひとつ例に挙げても、点火燃焼を実証するための単発動作の高出力レーザー開発と炉用の繰り返しレーザードライバー開発には、技術的不連続があり、これらを同じ基準でTRL評価を実施することは困難が予想された。さらに、炉システムの様に、現状とLIFTの目標との乖離が大きい場合、個々の技術の厳密なTRL評価が現段階ではあまり意味をもたない場合もあると考えた。重要なことは、技術開発の現状を把握し、課題を抽出することである。そこで、当初の活動方針であったTRL評価を変更し、実験炉実現に向けての技術課題を俯瞰するための技術ビューを作成することとした。

技術ビューは、ワーキンググループ構成に従い作成された。ドライバーレーザー(図9)と炉心プラズマ(図10)については、次期レーザー装置として想定されるJ-EPoCHの開発とそれを活用して実施する炉心プラズマに関連した研究開発項目が明確化されている。一方、ターゲット(図11)と炉システム(図12)に関しては、当面はオフサイトでの研究が中心になる。よって、想定されるレーザー装置とその段階で想定される開発項目と目標を、研究開発の進展に合わせて、適宜対応させていくことが求められる。今後は、破線で囲ったオフサイト中心の開発項目のフェーズと、オンサイトにおける開発の整合性を検証していくこととなる。高繰り返しレーザーの活用により、高繰り返しレーザーによって発生する核融合中性子を利用した炉システム実現に向けた開発、更に、レーザーと同期したターゲットインジェクション実証等のオンサイトにおける開発が加速される。

技術ビューにおいて繰り返しレーザーの性能を指標軸とすることで、ロードマップ案との整合性を取ることが可能となった。技術ビューは、第4.4節で記すロードマップ案を下支えする各項目の研究展開を俯瞰する役割を果たす。この様に技術課題をあぶりだすこと、更に、それらを俯瞰し共有化することは、今後の研究開発戦略を策定し具体化する上で有用である。

### 4.4 研究開発ロードマップ案

高繰り返しハイパワーレーザーを基軸としたレーザー核融合研究開発ロードマップ案を、炉システム評価シートと技術ビューをもとに策定した。ロードマップ案作成の背景には、高繰り返しハイパワーレーザーの技術進展により、従来のシングルショットレーザーを中心とした炉心プラズマ研究に加えて、レーザー核融合生成中性子環境を利用した核融合炉工学を進めることが可能となったことが挙げられる。図13にロードマップ案を示す。本ロードマップ案は、現状の研究開発状況から高速点火レーザー核融合実験炉

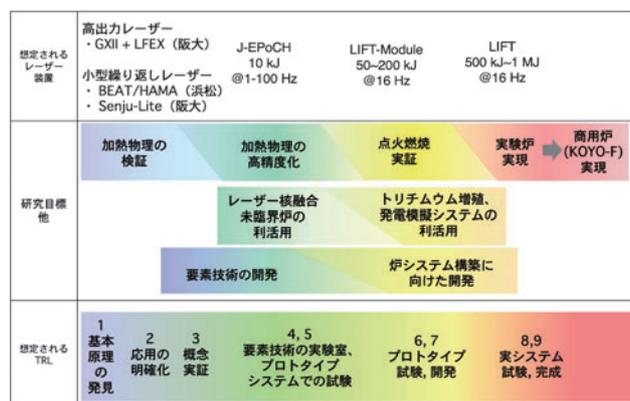


図8 レーザー核融合技術ビューの指標。

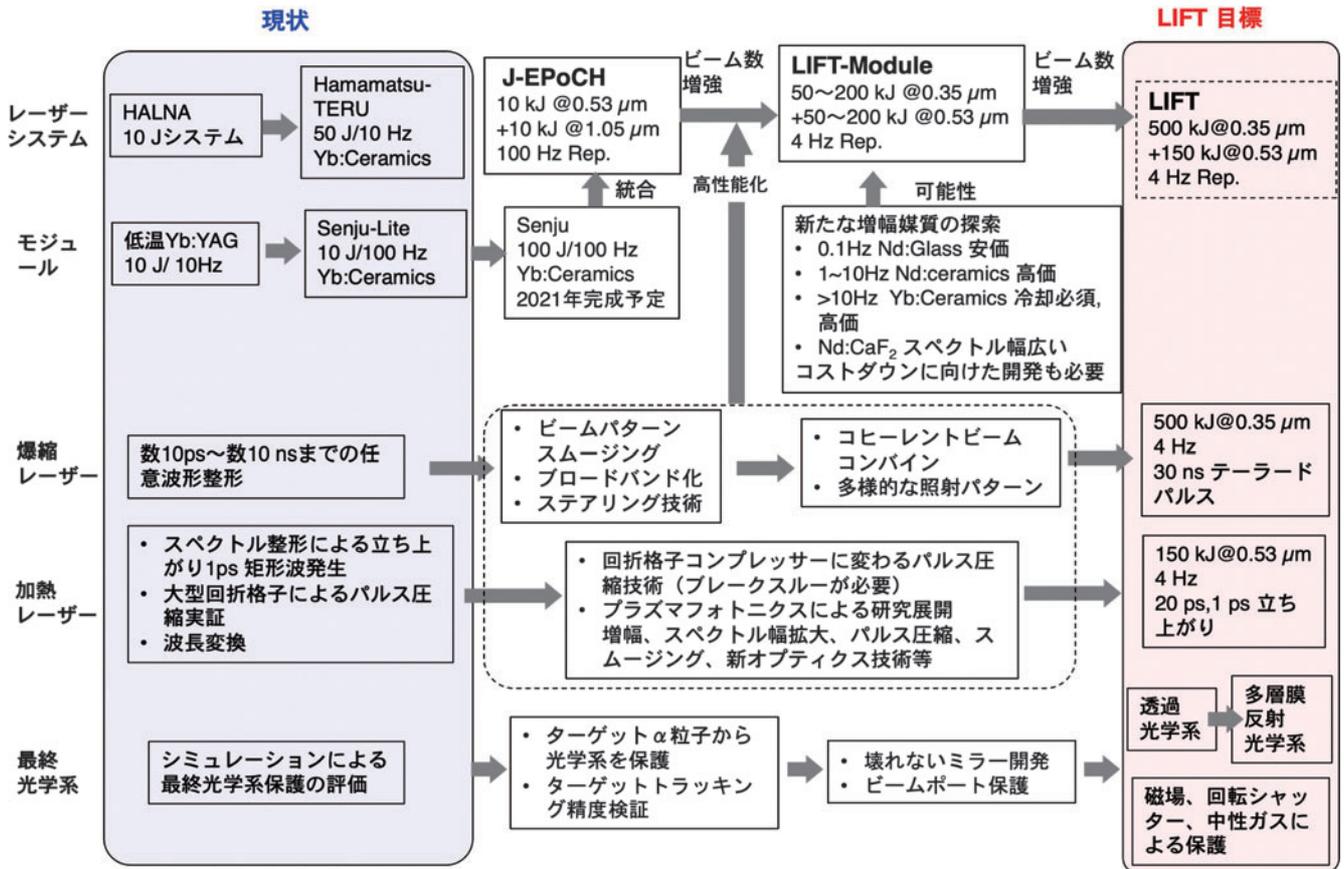


図9 レーザードライバー技術ビュー。

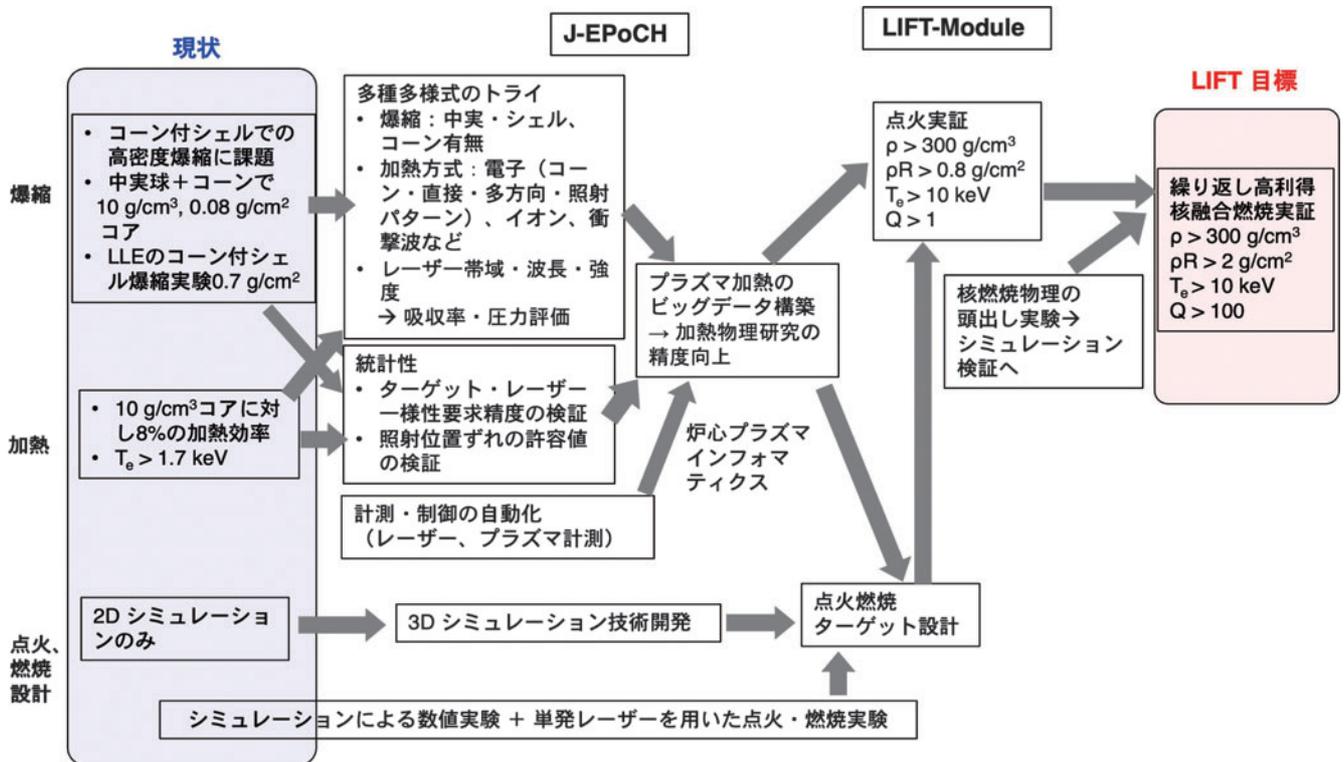


図10 炉心プラズマ技術ビュー。

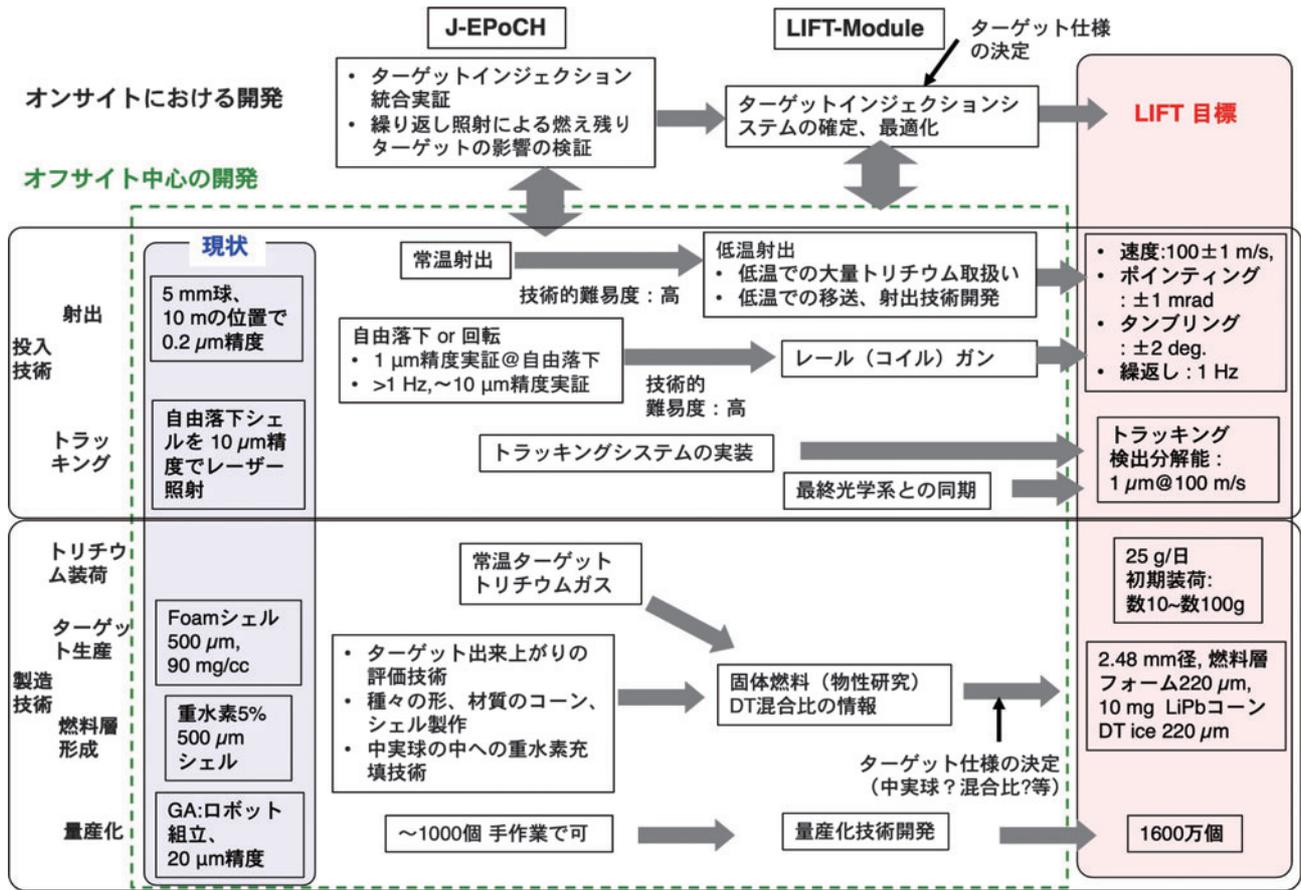


図11 ターゲット技術ビュー.

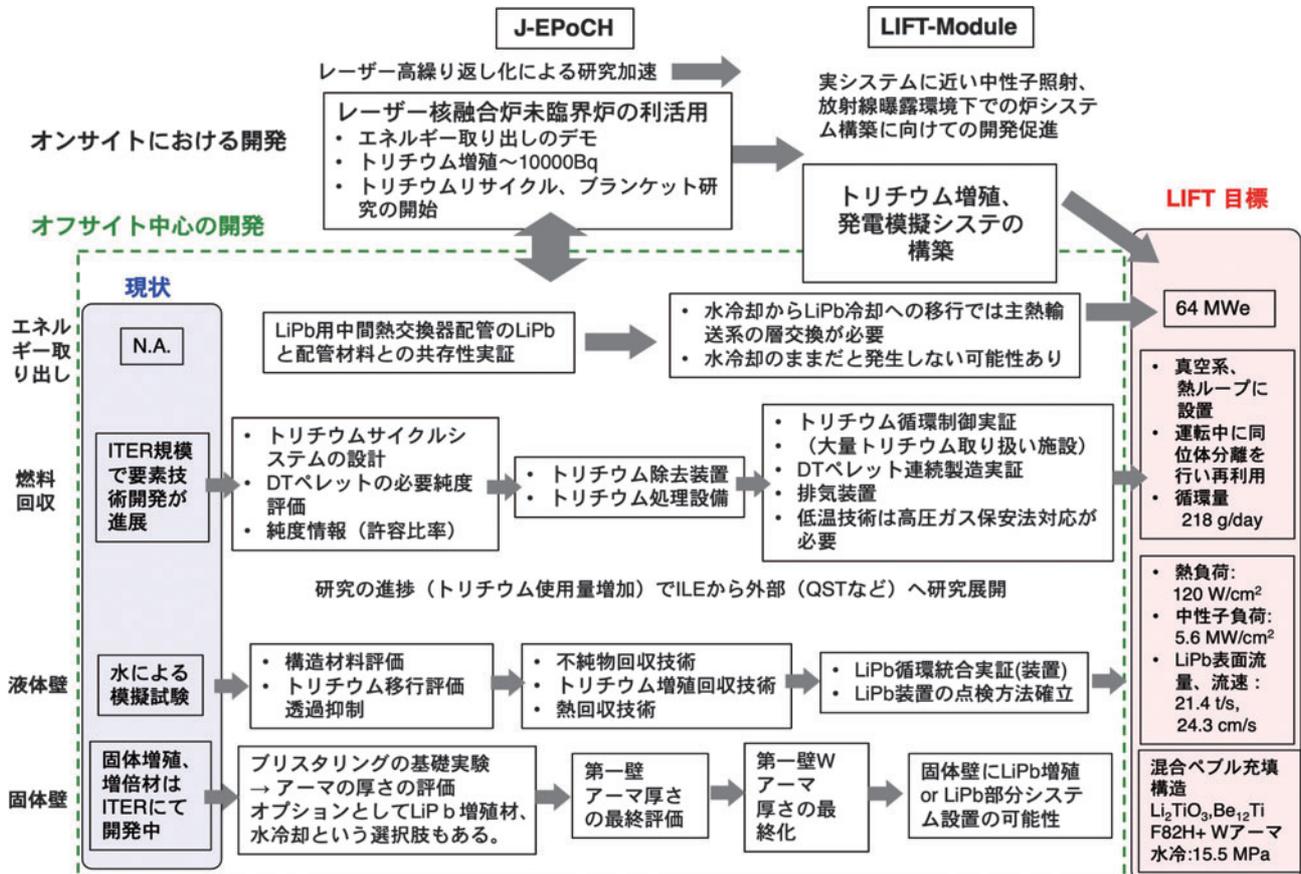


図12 炉システム技術ビュー.

LIFT Phase-I の実現までを示している。数値実験による核融合点火 (FIREX-NEO) 及び, J-EPoCH を使った未臨界炉 [46] によるプラズマ加熱研究と炉工学研究の実施により, LIFT Phase-I の部分的建設開始が可能になる。

研究開発ロードマップ案は, 横軸を時間, 縦軸を装置群とする。時間スケールとして, 2020年に, モジュール開発を含む J-EPoCH 建設が開始されるとした。装置群は, レーザー装置と炉工学装置で構成される。レーザー装置として, GXII/LFEX, J-EPoCH レーザー装置 (10 kJ 級/1-10 Hz), LIFT-module (100 kJ 級/16 Hz), LIFT (MJ 級/16 Hz) を挙げた。J-EPoCH は多目的共用施設であり, LIFT-module より, 核融合専有装置とする。J-EPoCH は共用施設である

ため, 核融合実験には, 別途, 照射チャンバー, および, 炉工学装置等を整備する。炉工学装置として, ターゲットシステム研究開発装置, 未臨界炉装置, トリチウム増殖・発電模擬システム装置を列挙した。

LIFT Phase-I の実現に向けて, 4つのレーザー装置と3つの炉工学装置を活用し, 9つの基礎研究/研究開発プロジェクトが必要である。表3に, LIFT Phase-1実現に向けた基礎研究・プロジェクト案を示す。図13と表3に沿って, 各々の基礎研究・プロジェクトの目的と接続性について, 以下に記す。

まず, J-EPoCH レーザーを活用した開発について概説する。FIREX-1のチェック&レビュー後, レーザー核融合炉

表3 LIFT Phase-1 の実現に向けた基礎研究・プロジェクト立案。

基礎研究・プロジェクト名	目的
1. FIREX-NEO	レーザー核融合炉心プラズマ点火燃焼スケーリング則確立に向けた (国際連携) 要素物理モデルの確立, 及び点火燃焼ターゲットデザインの確立
2. 炉工学基礎研究 (個別の研究)	レーザー核融合炉工学プロジェクトの要素技術研究開発
3. レーザー核融合炉工学プロジェクト	レーザー核融合による発電実証・トリチウム増殖研究
4. ターゲットシステム研究開発	実験炉 LIFT Phase-I で採用するターゲット開発およびその量産化
5. 高繰り返し実験によるプラズマ加熱の統計学	加熱物理研究の精度向上及び先進加熱方法の探求
6. J-EPoCH レーザー高性能化	LIFT 建設判断のための要素技術開発
7. ターゲットインジェクション統合実証	連続インジェクションの実証
8. FIREX-II プロジェクト	高速点火方式の点火実証 (前期: 点火実証, 後期: 高利得実証)
9. 中性子源によるトリチウム増殖・発電模擬	炉に外挿可能なスケールにおけるトリチウム増殖・発電模擬の実証

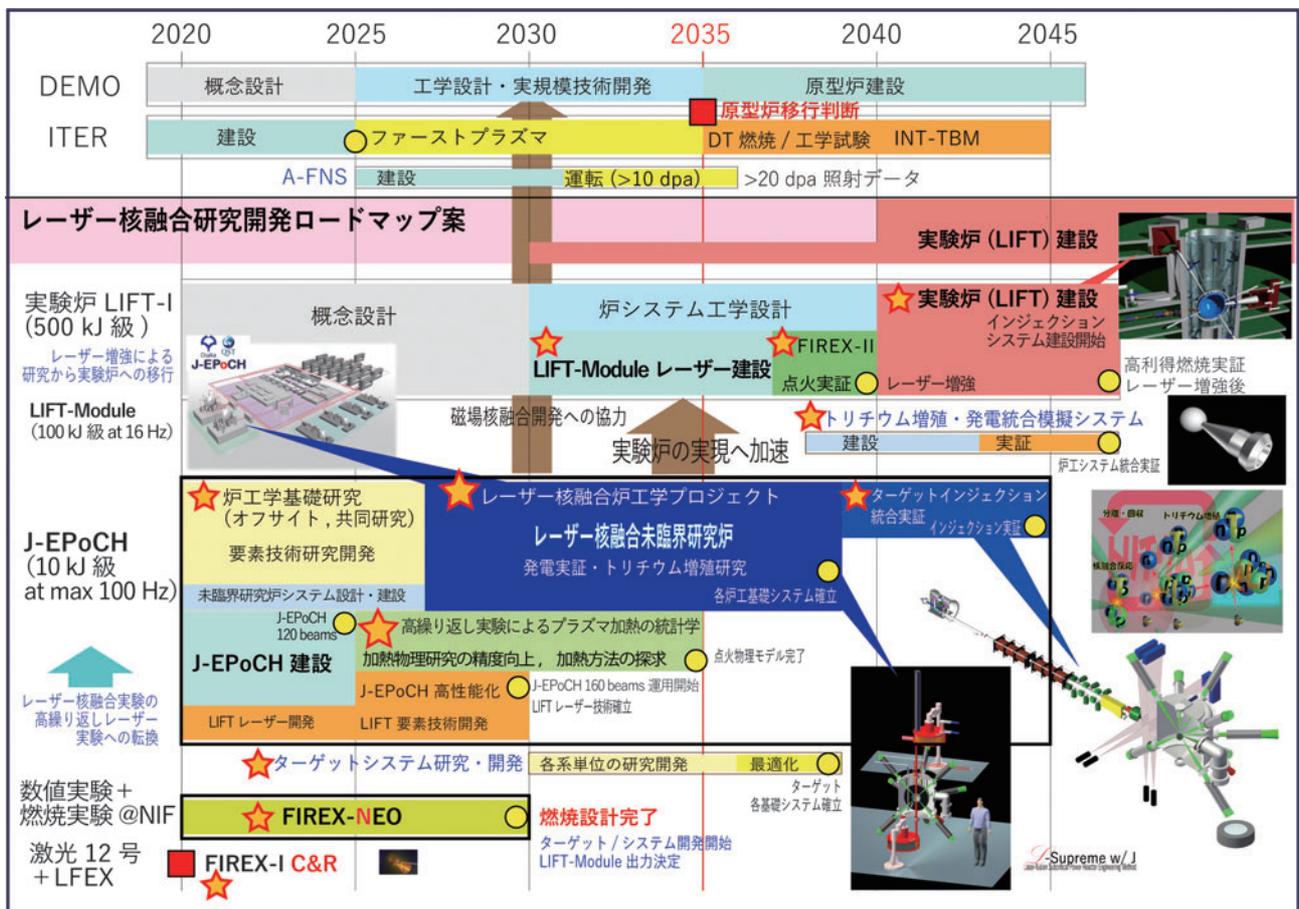


図13 レーザー核融合研究開発ロードマップ案。時間軸は検討時 (2020年前半) におけるもので, 2020年に J-EPoCH レーザー建設が判断されるとした。星印: プロジェクト等研究・開発の枠組み, 丸印: 達成目標, 四角印: 重要判断。

心プラズマ性能予測の確度を上げるため、国内実験（現有装置 激光12号/LFEX等）と並行して海外装置 NIF を活用した燃焼プラズマ実験へ参画し、数値実験を行うプロジェクト 1：FIREX-Numerical Experiment Operation (NEO) を立ち上げる。FIREX-NEO の目的は、炉心プラズマ燃焼設計の完了であり、実験炉 LIFT 実験で用いるターゲットデザイン候補を確定する。点火燃焼ターゲットデザイン候補の確定後に、4：ターゲットシステムの研究開発を開始する。ターゲット製造、射出、トラッキング等に代表される各系それぞれの研究開発を行い、最適化を行う。これらの成果は、J-EPoCH レーザーを活用した 7：ターゲットインジェクション統合実証に反映される。

J-EPoCH レーザー建設中に、オフサイトで共同研究等を通じ、ターゲットインジェクション、中性子照射、トリチウム燃料、エネルギー変換等の 2：炉工学基礎研究を行う。これらの成果は、J-EPoCH レーザーで実施する 3：レーザー核融合炉工学プロジェクトの要素技術として活用される。

J-EPoCH レーザーを活用して、5：高繰り返し実験によるプラズマ加熱の統計学的高精度解析と 3：レーザー核融合炉工学プロジェクトを実施する。高繰り返し実験によるプラズマ加熱の統計学解析では、ビックデータの AI による解析を通じて、加熱物理研究の精度向上と新しい加熱方法の探求を行う。3：レーザー核融合炉工学プロジェクトでは、実験炉に向けて、炉・システム工学研究を進展させるためにレーザー核融合未臨界炉[46]を構築する。ここでは、中性子照射環境を通じて、トリチウム増殖、トリチウムリサイクル、エネルギー変換の原理実証が行われる。この未臨界炉の構築により、安全炉工技術検証が達成される。安全炉工技術検証が達成後に、7：ターゲットインジェクション統合実証に取り組む。

次に、実験炉 LIFT Phase-I 構築について概説する。LIFT Phase-I の仕様検討は、高速点火レーザー核融合実験炉概念設計報告書（2015年3月）[36]にまとめられている。FIREX-1及び FIREX-NEO の成果をもとに、適宜、LIFT 概念設計の仕様更新を継続する。まず、J-EPoCH レーザー建設の知見をもとに、繰り返し 100 kJ 級 LIFT-module レーザーを建設する。建設に際し、J-EPoCH レーザー建設開始後に、6：J-EPoCH レーザー高性能化プロジェクトを立ち上げ、LIFT レーザー建設のための 3つの要素技術：(1)全ビーム（160本）コヒーレント結合、(2)全ビームナノ秒波長変換、(3)全ビームステアリングを確立する。これら LIFT レーザー要素技術をもとに、LIFT-module レーザー（爆縮 100 kJ（波長 0.35  $\mu\text{m}$ ）、加熱 100 kJ（波長 0.53  $\mu\text{m}$ ））を建設する。建設後、照射システムおよび、真空照射チャンバを整備し、LIFT-module でシングルショットベースの高速点火方式の点火実証（8：FIREX-II プロジェクト前期）を行う。点火実証達成後、LIFT-module レーザーを MJ 級へ増強し、LIFT レーザーとする。

LIFT レーザー増強期間中に、LIFT による高繰り返しレーザー核融合利得エネルギー回収に備え、オフラインで、トリチウム増殖システムを立ち上げ、プロジェクト

9：中性子源によるトリチウム増殖・発電模擬を行う。ここでは、模擬炉心中性子源（加速器中性子源、熱核融合中性子源等）で、ブランケットを模擬したトリチウム鉛金属（固体及び液体）中に生成されるトリチウムを回収し、発電模擬を行う。これら発電模擬システムをスケールアップすることで、LIFT-II（固体壁ブランケット）及び III（液体壁ブランケット）の炉システムコンポーネント構築につなげる。

LIFT レーザー増強完了後、9：トリチウム増殖・発電模擬システム、及び 7：ターゲットインジェクション統合実証の知見を集約して、炉システムを増強する。LIFT レーザーをシングルショットで運用し、8：FIREX-II 後期による高利得燃焼実証を達成後、高繰り返し点火燃焼試験により、統合システム実証を達成する。

本ロードマップ案の要は、高繰り返しキロジュール級ハイパワーレーザーである。ここでは、J-EPoCH をその第一候補とした。J-EPoCH の活用により、表 3 に掲げる 4つのプロジェクト（3, 5, 6, 7）が推進され、レーザー核融合炉の実現に向けて必須となる爆縮燃料加熱物理モデルの確立、レーザー核融合基礎炉システム、ターゲットインジェクション統合実証、及び LIFT-Module レーザー技術の確立が達成される。

高繰り返しハイパワーレーザーによる研究開発と並行して、別途、ターゲット及びインジェクションの開発を実施する必要がある。未臨界研究炉の基盤確立後は、統合システム実証を行う必要があり、別サイトで実施することを想定している。未臨界研究炉の研究開発の進展によっては、原型炉との協業の可能性もある。さらに、プロジェクトの進行に合わせて、安全や法律への対応も求められる。

#### 4.5 炉工学基礎研究を加速する研究提案

ロードマップ案に示されている 2：炉工学基礎研究に着手するため、戦略会議の委員が中心となり研究提案を纏めた。図 14 に、提案の概要を示す。定常的に高出力運転が可能な高繰り返しハイパワーレーザー装置の出現を好機と捉え、核融合発電実現への最緊要課題を解決し、その実現を加速することを意図したものである。四つの開発課題、

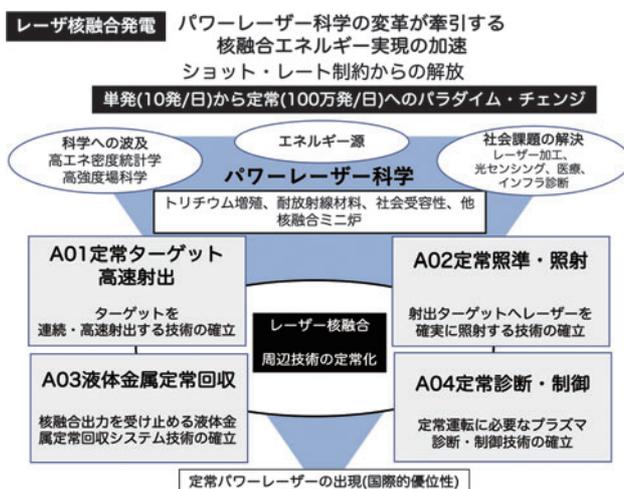


図14 炉工学基礎研究を加速するための研究提案。

(i)燃料ターゲットの高速連続供給, (ii)ターゲットへのレーザーの照準と照射, (iii)核融合エネルギーに曝露された液体金属炉壁の回収と回復, (iv)過酷放射線環境下での核融合出力の診断と制御の解決に取り組み, 定常的な核融合エネルギー発生の実証へと繋げるビジョンを掲げた。本研究提案を基礎として, 研究リソースの獲得に向けた環境が構築された。

#### 4.6 原型炉開発に向けたアクションプランへの反映

戦略会議における議論は, 原型炉に向けたアクションプランの進展に反映されている。現在, 原型炉開発総合戦略タスクフォースにおいて, アクションプランの進捗状況が議論されている。戦略会議の議論は, カテゴリー14:レーザー方式の進展に貢献しており, 液体金属壁開発において液体金属による拡散ポンプ設計と検証が開始されたこと, 繰り返し炉工学試験装置に関連して, 第4.5節で述べたパワーレーザー技術の革新による高繰り返しレーザーを用いた核融合エネルギー開発に資するプラットフォームの提案が示された。

### 5. 近況と今後の取り組み

我が国が重点を置き研究を先導してきた高速点火方式は, 中国, 欧州において, 大規模展開されようとしている。中国では, 中国科学院において, 1000億円規模のレーザー核融合高速点火事業が開始された。上海光学精密機械研究所 SIOM にて稼働中のシングルショットキロジュール級レーザー SG-II upgrade を 100 kJ 級まで増強する計画であり, 炉心デザインとして対向照射による高速点火:ダブルコーンイグニッションが提案されている[47]。欧州では, 2019年に独にて, 独ベンチャーキャピタルからの出資により Marvel Fusion 社が設立され, 2020年にレーザー核融合発電をめざしていることが公表された。公開情報によると, 欧米研究機関と連携して超高強度ペタワットレーザーを用いた中性子発生のないプロトンボロン反応による核融合発電をめざしているようである[48]。

戦略会議で策定したロードマップ案の実行には, 多方面からの支援とリソースの確保が欠かせない。例えば, ロードマップ案の要とした高繰り返しキロジュール級ハイパワーレーザーの第一候補である先端多目的パワーレーザープラットフォーム J-EPoCH の実現には, 学術コミュニティに対しては核融合分野に加えて他分野からの支持, 産業界に対しては利用者としての支持と支援が求められている。レーザー核融合に対する支持と支援をいただくためには, 我々が実現しようとしていることを, まず知っていただくことが第一である。

戦略会議の活動を広く知っていただくために, 2020年9月にオンラインで開催した活動報告会では, 学会及び関連団体を通じて, 産業界も含めて広く参加を募った。産業界から20社を超える事前登録があり, 当日の参加者は90名を超えた。報告会では, パネル討論会を開催し, 事前に寄せられた質問, レーザー核融合の国際情勢, 開発ロードマップ案における基礎研究と研究開発のつながり等に関する議論を行った。さらに, 産業界からは, レーザー核融合の宇

宙利用の提案紹介があり, 人類の活動領域の拡大と核融合エネルギーのポテンシャルについて再認識する機会となった。多方面に対しこのような会話を地道に継続し, 頂いたコメントをロードマップ案と戦略に反映させていくことが, レーザー核融合実現に対する支援, 及びリソース確保につながると強く認識している。

核融合の研究開発は, 多様な閉じ込め方式の存在が研究開発を活性化してきた。ここで述べた慣性閉じ込め方式は, 世の中の主流である磁場閉じ込め方式と手法及び道具立ては異なるが, 共通目標である核融合エネルギーの実現にむけて, 炉工学等の共通項目を見出しながら共創を進めていきたい。今後は, 戦略会議の活動を踏まえ, 平均出力メガワット級レーザーによる核融合炉基本設計チームを設立する予定である。チーム設立に際し, 学術コミュニティとともに, 将来のレーザー核融合炉実現に向けて欠かせない産業界へも参加を募る予定である。慣性閉じ込め方式を牽引するレーザー核融合研究開発に対して, これからも, 引き続き, ご支援とご協力をお願いするとともに, 核融合エネルギーの実現に向けて, 忌憚のない御叱正を賜りたい。

### 6. まとめ

レーザー核融合戦略会議において策定した2030年以降を見据えたレーザー核融合研究開発の中長期展望を概説した。点火燃焼物理の解明を国際連携で推進し, 高繰り返しハイパワーレーザーを活用した炉工学研究を国内で推進する方針を提案した。今後は策定方針に沿い, 核融合エネルギー源の実現に向けて, 様々な方面に対して, その意義をアピールし支援をいただきながら研究開発を進めていく。

### 謝辞

本稿は, レーザー核融合戦略会議の活動内容を公に紹介するために取りまとめました。活動をご支援いただいたIFEフォーラムに感謝申し上げます。活動に際し, 会議設立をご提案いただきました兒玉了祐氏, 委員の近藤正聡, 後藤拓也, 笠田竜太, 長井圭治, 片山一成, 羽原英明, 梶村好宏, 日渡良爾, 余語覚文, 長友英夫, 山ノ井航平, 尾崎典雅, 佐野孝好, 菊池崇志, 長谷川純, 古賀麻由子, 佐々木徹, 砂原 淳, 尾崎 哲, 椿本孝治, 藤岡加奈, 荻野純平, 本越伸二, 近田拓未, 八木重郎の各氏, 顧問の乗松孝好氏, 及び, オブザーバーの米田 修, 染谷洋二の両氏に謝意を表します。会議運営でお世話になりました大阪大学レーザー科学研究所, 光産業創成大学院大学, および浜松ホトニクス株式会社中央研究所産業開発研究センターの関係者に感謝いたします。

### 参考文献

- [1] 「レーザー核融合戦略会議報告書」, IFEフォーラム/レーザー技術振興会, 2020年9月。
- [2] 森 芳孝: 第36回プラズマ・核融合学会年会 シンポジウム エネルギーリソースをめざしたレーザー核融合研究の進展と展開 - 趣旨説明, S8-1, 2019年12月2日。
- [3] 森 芳孝, 菊池崇志: 慣性核融合の取り組み, Fusion

- 2030研究会週イチ Zoom #11 2020年9月1日 : <https://www.col.nifs.ac.jp/info/Fusion2030/>
- [4] 疇地 宏 : プラズマ・核融合学会誌 **81** 増刊, 2 (2005).
- [5] 藤岡慎介, 千徳靖彦 : レーザー研究 **49**, 30 (2021).
- [6] Ed. Moses 他 : プラズマ・核融合学会誌 **87**, 295 (2011).
- [7] O.A. Hurricane *et al.*, Nature **506**, 343 (2014).
- [8] J. Lindl *et al.*, Phys. Plasmas **21**, 020501 (2014).
- [9] S. Le Pape *et al.*, Phys. Rev. Lett. **120**, 245003 (2018).
- [10] H.G. Rinderknecht *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 145002 (2020).
- [11] N. Miyanaga *et al.*, EDP Sciences, J. de Physique IV **133**, 81 (2006).
- [12] Y. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **114**, 195002 (2015).
- [13] S. Fujioka *et al.*, Phys. Rev. E **91**, 063102 (2015).
- [14] S. Sakata *et al.*, Nature Commun. **9**, 3937 (2018).
- [15] T. Gong *et al.*, Nature Commun. **10**, 5614 (2019).
- [16] K. Matsuo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 035001 (2020).
- [17] 河仲準二 : プラズマ・核融合学会誌 **90**, 440 (2014).
- [18] 植田憲一 : レーザー研究 **42**, 113 (2014).
- [19] T. Mochek 他 : レーザー研究 **42**, 145 (2014).
- [20] 関根尊史 他 : レーザー研究 **49**, 6 (2021).
- [21] 晝馬輝夫 : 「できない」と言わずにやってみる! (イースト・プレス, 2003).
- [22] Y. Mori *et al.*, Nucl. Fusion **53**, 073011 (2013).
- [23] 森 芳孝 他 : プラズマ・核融合学会誌 **91**, 540 (2015).
- [24] 北川米喜 : プラズマ・核融合学会誌 **91**, 537 (2015).
- [25] Y. Kitagawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 155001 (2012).
- [26] Y. Mori *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 055001 (2016).
- [27] O. Komeda *et al.*, Sci. Reports **3**, 2561 (2013).
- [28] 西村靖彦 他 : プラズマ・核融合学会誌 **93**, 421 (2017).
- [29] Y. Mori *et al.*, Fusion Sci. Technol. **75**, 36 (2019).
- [30] Y. Mori *et al.*, Nucl. Fusion **59**, 096022 (2019).
- [31] Y. Kitagawa *et al.*, Plasma Fusion Res. **8**, 3404047 (2013).
- [32] W.J. Nuttal *et al.*, Commercializing Fusion Energy: How Small Businesses are Transforming Big Science, (IOP Publishing Ltd., London, 2021) Chapter 6 Laser Fusion CANDY GPI/Hamamatsu by Y. Mori.
- [33] 浅井朋彦 : プラズマ・核融合学会誌 **93**, 18 (2017).
- [34] 佐藤伸弘 他 : プラズマ・核融合学会誌 **93**, 38 (2017).
- [35] 渡利威士 他 : レーザー研究 **49**, 173 (2021).
- [36] 「高速点火レーザー核融合実験炉概念設計委員会報告書」, IFE フォーラム/レーザー技術振興会, 2015年3月.
- [37] 「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」, 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, 2020年6月.
- [38] 重森啓介 : 日本物理学会誌 **75**, 101 (2020).
- [39] T.M. Anklam *et al.*, Fusion Sci. Technol. **60**, 66 (2011).
- [40] "HiPER Preparatory Phase Study Final Report", HiPER Project Team, Dec. 1st, 2013.
- [41] T. Norimatsu *et al.*, Fusion Sci. Technol. **52**, 893 (2007).
- [42] T. Goto *et al.*, Nucl. Fusion **49**, 075006 (2009).
- [43] T. Norimatsu *et al.*, Nucl. Fusion **57**, 116040 (2017), 乗松孝好 他 : プラズマ・核融合学会誌 **92**, 304 (2016).
- [44] 城崎知至 : レーザー研究 **49**, 135 (2021).
- [45] 笠田竜太 他 : プラズマ・核融合学会誌 **89**, 193 (2013).
- [46] A. Iwamoto and R. Kodama, High Energy Dens. Phys. **36**, 100842 (2020).
- [47] J. Zhang *et al.*, Phil. Trans. R. Soc. A **378**, 20200015 (2020).
- [48] Marvel Fusion web site: <https://www.marvelfusion.io>