J. Plasma Fusion Res. Vol.102, No.10 (2026) 428-441

ムーンショット最前線 (2)
研究論文

ハイパワー・パルスレーザーに向けた光蓄積技術の挑戦的課題

Challenges in Optical Energy Storage Technology for High-Power Pulsed Lasers

藤岡 慎介[1,2]，椿本 孝治[1,2]，小原 侑也[2,3]，道根 百合奈[4]，米田 仁紀[1,4]，三上 拓哉[1,5]，飯塚 清太[2,3]，新井 宏二[2,3]，中村 修二[3]

FUJIOKA Shinsuke, TSUBAKIMOTO Koji, OHARA Yuya, MICHINE Yurina, YONEDA Hitoki, MIKAMI Takuya, IIZUKA Seita, ARAI Koji and NAKAMURA Shuji

[1]大阪大学 レーザー科学研究所，[2]大阪大学 Blue Laser Fusion エネルギー協働研究所，[3]Blue Laser Fusion Inc.，[4]電気通信大学 レーザー新世代研究センター，[5]株式会社オカモトオプティクス

（原稿受付：2026 年 8 月 2 日／原稿受理：2026 年 9 月 14 日）

2050 年までのフュージョンエネルギーの社会実装に向け，ムーンショット型研究開発事業・目標 10（MS10）のプロジェクト「光をためて挑むレーザーフュージョンエネルギー」では，コヒーレントビーム結合（Coherent Beam Combining: CBC）と光蓄積共振器（Optical Enhancement Cavity: OEC）を組み合わせた新方式の高効率・高繰り返しフュージョンドライバーの研究開発を進めている．本稿では，OEC レーザーをフュージョンドライバーとして成立させるための 4 つの基幹要素技術，すなわち（1）OEC へのシードレーザー入射，（2）OEC でのレーザー蓄積，（3）OEC からの光取り出し，（4）OEC 用の高反射・高耐力ミラーの大型化について，国内外の最新の研究成果に基づく技術的成立性の検討を行い，各要素技術が段階的に到達可能な仕様と最終目標に向けた課題を整理した．加えて，システムとしてのこれら要素技術の同時成立性についても見通しを得た．

Keywords:
inertial fusion energy, optical enhancement cavity, coherent beam combining, gas optics, high reflectivity mirror, laser-induced damage threshold

1. はじめに

本プロジェクト「光をためて挑むレーザーフュージョンエネルギー」は，2050 年までのフュージョンエネルギーの社会実装を見据え，革新的なレーザードライバー技術と自律型研究基盤を統合的に開発することで，フュージョンエネルギーの実現を加速することを目的としている．**図 1** に示すように，中核技術として，高効率レーザーのコヒーレントビーム結合（Coherent Beam Combining: CBC）と，「光を空間に蓄積する」原理に基づく光蓄積共振器（Optical Enhancement Cavity: OEC）を採用し，高効率かつ高繰り返しでフュージョン反応を駆動可能なレーザーシステムの可能性を立証する [1].

本プロジェクトは，次の三つの開発大項目で構成される．第一に，CBC で高出力化したレーザーパルスを OEC 内で蓄積・増幅し，システム全体で高効率と 10 Hz オーダーの高繰り返し動作を両立したフュージョンドライバーを確立する．第二に，レーザー照射，ターゲット供給，データ解析，シミュレーションを統合した自律型研究開発基盤 OASIS（OEC-based Autonomous System for Innovative fusion Sciences）を構築し，従来比約 1000 倍の速度で実験と解析を繰り返すことで，点火条件および炉設計パラメータを高速に最適化する．第三に，実験・理論・シミュレー

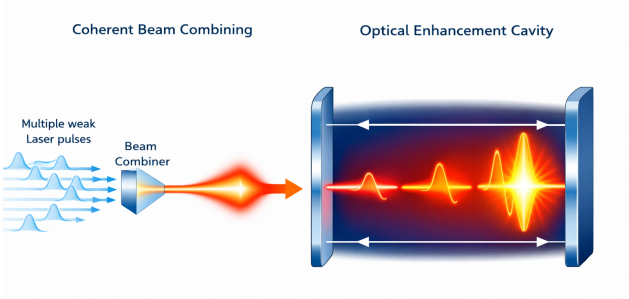


図 1　本プロジェクトで目指すフュージョンドライバー用パワーレーザーの概念図．コヒーレントビーム結合（Coherent Beam Combining：CBC）により空間的にレーザービームを結合した後に，二枚のミラーで構成された共振器内（Optical Enhancement Cavity：OEC）で時間的にレーザービームを重ね合わせる．

Institute of Laser Engineering, Suita, Osaka, 565-0871, Japan

corresponding author's e-mail: fujioka.shinsuke.ile@osaka-u.ac.jp

©2026 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

ションを統合した数理モデルに基づき，経済性および安全性を含むフュージョン発電炉の設計仕様を提示し，発電実証炉および商用炉開発へと接続する．これらを段階的に推進し，2034 年に 10 kJ 級レーザーと OASIS の統合を達成し，2030 年代から 2040 年代にかけての発電実証炉，2050 年の商用炉へと展開する．

ムーンショット型研究開発事業・目標 10（以下 MS10）では，プロジェクト開始から約 2 年目にあたる 2027 年 11 月頃までにステージゲート評価（以下，SG）が実施され，中間目標の達成状況と研究開発計画の妥当性が審査される．本プロジェクトでは，この SG まで，OEC レーザーの成立性検証に研究資源を集中的に投入する方針を定めた．SG に向けてのアプローチは，以下の 4 つの要素技術の統合である．第一に，高効率レーザー入射技術として，複数のレーザーをコヒーレントに結合し，位相および空間モードを精密制御することで，OEC への高効率入射（目標：蓄積効率 30%）を実現する．第二に，共振器内光蓄積・増幅技術として，反射率 99.999%級のミラーで構成された長尺共振器においてナノ秒パルスを蓄積し，10^5 倍のエネルギー増幅を達成する．第三に，高効率光取り出し技術として，蓄積エネルギーをタイミング制御により外部へ取り出す手法を開発し，90%以上の取り出し効率を目指す．第四に，高耐力・大口径光学素子技術として，kJ 級レーザーに耐える超高反射ミラーの大型化（8 インチ級）と，平均・ピークパワー密度限界の定量化を行い，スケールアップ時の物理限界を明確化する．これらの要素技術を統合し，実験とシミュレーションを結合することで，OEC レーザーのリアクタースケールへの外挿性を科学的に実証する．

OEC を構成する要素技術は，今日まで重力波天文分野において飛躍的な発展を遂げてきたものである．本プロジェクトは，それらをさらに高出力領域へと拡張し，GW 級に匹敵する高出力光閉じ込めでフュージョンエネルギーを実現するという新たな挑戦である．この挑戦は，既存技術の延長ではなく，新機能の追加と高耐力化を同時に推し進めるものであり，我が国の基礎科学力の向上および新規産業創出に寄与する．

OEC レーザーの確立は，フュージョン技術の一要素にとどまらず，広い波及効果をもたらす．第一に，固体・気体レーザーに続く第三の高出力レーザー方式としての革新的パワーレーザーの創出である．第二に，高出力光源としての材料加工，宇宙応用，粒子加速など多分野への展開である．さらに，新原理レーザーの先行確立により国際的な技術主導権を確保し，我が国の科学技術競争力の強化へとつながる．

本稿では，本プロジェクトの本格開始にあたり実施した，OEC レーザーの技術的成立性に関する予備評価を整理する．第 2 章で OEC レーザーの基本設計と開発目標を述べ，第 3 章でその動作原理である Fabry-Perot 共振器の基礎方程式と，フィネスおよびエンハンスメントの定義を整理する．第 4 章および第 5 章では技術基盤となる重力波天文分野の長距離・高フィネス共振器技術と，共振器の安定化・振動対策に関する知見をまとめる．続いて第 6 章から第 9 章で 4 つの基幹要素技術の現状と課題を整理し，第 10 章で全体システムとしての同時成立性・整合性を論じる．

2. OEC レーザーの基本設計と開発目標

米国ローレンス・リバモア国立研究所の国立点火施設（National Ignition Facility: NIF）では，10 kJ 級のガラスレーザー 192 本から構成される総エネルギー約 2 MJ のレーザーシステムを用いた間接照射方式（レーザー光を金の円筒ホーラムに照射し，X線に変換してターゲットに照射する方式）によって，レーザーフュージョン反応によりエネルギー利得 4（出力 8 MJ）が達成された [2]．この成果は，高出力レーザーによるフュージョンエネルギー創出の実現可能性を示した重要なマイルストーンである．一方で，NIF で用いられているガラスのレーザー増幅媒体における熱蓄積の制約により，NIF では高繰り返し動作が困難であり，現状は 1 日 1 回程度の運転にとどまっている．すなわち，レーザー方式核融合による核燃焼は実証されたものの，炉として要求される高効率・高繰り返し動作には本質的な限界が存在する [3]．このため，フュージョンエネルギーの社会実装には，従来技術の延長ではない新たなドライバー技術が不可欠である．

本プロジェクトでは，この課題に対する解として OEC に基づく新しいレーザー方式を提案する．本方式は，CBC による空間的なビーム統合と，共振器内での時間的なパルス蓄積を組み合わせることで，高効率かつ高繰り返しのエネルギー増幅を実現するものである．OEC は，対向配置されたミラー間の真空空間に光エネルギーを蓄積する光共振器であり，ガラスレーザー増幅媒体を必要としないため，繰り返し運転への制約を回避できる．また，光共振器の安定制御技術は重力波検出分野が先駆的に取り組んでおり，大規模・高精度な光蓄積に関する技術基盤が存在している（第 4 章および第 5 章で詳述する）．

高効率・高繰り返し光源としてはファイバーレーザーが有力であり，電気-光変換効率の高さ，優れた熱管理特性，回折限界に近いビーム品質を兼ね備える点でフュージョンドライバーに適した特性を持つ．しかし，ファイバーレーザーは単パルスあたりのエネルギーが低く，非線形効果によってスケールアップが制限されている [4]．このため，単体では必要な kJ 級エネルギーに到達できず，CBC による多数ビームの統合が不可欠となる．過去には 10^7 本規模の結合が提案されている [5] が，実現は極めて挑戦的である．

本提案は，CBC への要求を緩和するために，OEC による時間結合を組み合わせることで，比較的少数のビームから高エネルギーを生成する新しい設計概念である．本設計では，CBC で統合されたファイバーレーザーの光を共振器内に蓄積し，10^5 倍のエネルギー増幅を達成した上で，kJ 級パルスを高繰り返しで取り出すことを基本目標とする．この実現には，電気-光変換効率，CBC 効率，共振器蓄積効率，光取り出し効率といった複数の要素が同時に成

表 1 最終目標および SG における目標仕様.

	Goal@SG	After SG	Final goal
Cavity length	15 m	15 m	150 m
Clear aperture	2 inch class	2 inch class	8 inch class
Seed power	1 kW	1 kW	10 kW
Seed repetition rate	10 MHz	10 MHz	1 MHz
Seed energy	0.1 mJ	0.1 mJ	10 mJ
Enhancement	10^4	10^5	10^5
Stored energy	1 J	10 J	1 kJ
Fluence on mirror	0.5 J/cm^2	5.5 J/cm^2	55 J/cm^2
Linear power density on mirror	9.1 MW/cm	91 MW/cm	300 MW/cm
Extraction frequency	–	–	∼10 Hz

立する必要がある.

本プロジェクトの最終目標は，蓄積効率 30%，ピークパワー増大率 10^5，10 Hz 動作時の光取り出し効率 90%，および大口径ミラー製造技術の確立である．具体的なマイルストーン項目は以下の通りである.

①「OEC へのシードレーザー入射技術」の検討を行い，蓄積効率 30%に向けて，段階的に到達可能な入射効率を定量化する.

②「OEC でのレーザー蓄積技術」の検討を行い，ピークパワー増大率 10^5 に向けて，段階的に到達可能な蓄積効率を定量化する.

③「OEC からの光取り出し技術」の検討を行い，10 Hz で 90%の効率に向けて，段階的に到達可能な光取り出し効率を定量化する.

④「OEC ミラーの大型化技術」の検討を行い，段階的に製造可能なサイズ及び性能を定量化する.

⑤ 全体システムとして，これらの技術の同時成立性・整合性を明らかにする.

表 1 は，最終目標と SG における到達目標を段階的に整理したものである．**表 1** の右列に示す最終目標では，共振器長 150 m，エンハンスメント 10^5 により 1 kJ 級のエネルギーを蓄積し，約 10 Hz で取り出す構成とする．これに対し（**表 1** の左列）に示す SG では，共振器長 15 m，エンハンスメント 10^4 により 1 J 級の蓄積を実証し，入射・蓄積の要素技術の成立性を検証する．SG の段階では，ミラー面の線形パワー密度が石英基材の許容限界近傍に達するため，熱変形や損傷の影響を実験的に評価することが可能である．150 m への拡張前の中間段階として，**表 1** の中央列に示す SG 後の目標として，共振器長は 15 m のまま，エンハンスメント 10^5 を達成し 10 J 級蓄積を実現することで，最終ゴールへのスケーリング則を検証する．この領域では線形パワー密度は 100 MW/cm 級に達するため石英基材では成立が困難と予想され，高熱伝導基材の導入が不可欠となる．最終段階ではフルーエンス 55 J/cm^2，線形パワー密度 300 MW/cm 級に到達し，単に高レーザー誘起ダメージ閾値（Laser Induced Damage Threshold: LIDT）のミラーを導入するだけでなく，長期間の安定運用のため欠陥管理および清浄環境維持も重要な課題となる．**表 1** を見ると SG 後の中間段階の蓄積エネルギーと最終目標の蓄積エネルギーの間には 2 桁の差が存在するが，OEC の成立性を規定する主要パラメータであるフルーエンスおよび線形パワー密度は，各開発フェーズ間で概ね 1 桁の差に抑えられている．すなわち，本プロジェクトは成立性を支配する指標に基づいて段階的に負荷を増加させる計画となっており，現実的かつ検証可能な開発シナリオといえる.

以上のように，本プロジェクトは短尺共振器による段階的実証から長尺共振器へのスケールアップへと展開し，物理的成立性を段階的に検証する構成を採用している．一方で，本方式で必要とされる技術は極めて挑戦的であり，熱歪み，光学素子損傷，位相制御など複数の高難度課題が相互に結合している．このため，プロジェクトとして数値目標は明確にしつつ，単一の最適解に依存するのではなく，設計自由度と技術的余裕度を確保した上で，段階的に成立性を検証していく必要がある.

本章で示した OEC レーザーの基本設計は，マイルストーン項目① ∼ ④すべてに関係する全体設計の基盤であり，特に各要素技術の到達目標（入射効率，蓄積効率，取り出し効率，ミラーサイズおよび耐力）の整合性と同時成立性を検証する指針を与えるものである.

3. Fabry-Perot 共振器の基礎とエンハンスメントの定義

OEC の動作原理は，真空中で 2 枚の高反射ミラーを対向させた Fabry-Perot 共振器そのものである．後章の議論の基礎として，本章ではその基礎方程式と，フィネスおよびエンハンスメント（ピークパワー増大率）の定義を整理する．共振器長，つまり 2 枚のミラーの距離を L，入射側ミラー（以下，フロントミラー）の振幅反射率および振幅透過率を r_F，t_F，対向ミラー（以下，エンドミラー）のそれらを r_E，t_E とする．入射電場に対し，共振器内を何度も往復する光の重ね合わせは等比級数として足し上げることができ，共振器全体の振幅反射率 r_cav および振幅透過率 t_cav は次式で与えられる.

$$r_\mathrm{cav}(\omega) = -r_\mathrm{F} + \frac{{t_\mathrm{F}}^2 r_\mathrm{E} e^{-i\varphi}}{1 - r_\mathrm{F} r_\mathrm{E} e^{-i\varphi}} \tag{1}$$

$$t_\mathrm{cav}(\omega) = \frac{t_\mathrm{F} t_\mathrm{E} e^{-i\varphi/2}}{1 - r_\mathrm{F} r_\mathrm{E} e^{-i\varphi}} \tag{2}$$

ここで φ は光が共振器を 1 往復する間に受ける位相変化で

あり，レーザーの角周波数を ω として次式で与えられる．

$$\varphi = \frac{2L\omega}{c} \tag{3}$$

共振は $\varphi = 2\pi n$（n は整数）で生じ，共振周波数は $\nu_n = nc/2L$ と等間隔に並ぶ．この間隔が自由スペクトル間隔（Free Spectral Range: FSR）である．

$$\nu_{\mathrm{FSR}} = \frac{c}{2L} \tag{4}$$

また，透過（蓄積）ピークの半値全幅 ν_{FWHM} と ν_{FSR} の比は共振の鋭さ（共振回路の Q 値に対応）を表し，フィネス F と呼ばれる．

$$F = \frac{\nu_{\mathrm{FSR}}}{\nu_{\mathrm{FWHM}}} = \frac{\pi\sqrt{r_{\mathrm{F}} r_{\mathrm{E}}}}{1 - r_{\mathrm{F}} r_{\mathrm{E}}} \approx \frac{2\pi}{\delta} \tag{5}$$

式 (5) の最右辺の近似は高反射率極限（$r_{\mathrm{F}} r_{\mathrm{E}} \to 1$）で成立し，$\delta$ は透過・吸収・散乱を含む，パワーで測った 1 往復あたりの全損失である．すなわちフィネスは共振器の損失のみで決まる無次元量であり，例えば $\delta = 20\,\mathrm{ppm}$ は $F \approx 3 \times 10^5$ に対応する．

エンハンスメント G は，共振時に共振器内を周回するパワーと入射パワーの比として定義される．フロントミラーのパワー透過率を $T_{\mathrm{F}} = t_{\mathrm{F}}^2$，それ以外の損失（エンドミラーの透過，吸収，散乱等）の合計を ℓ とすると，1 往復あたりの全損失は $\delta = T_{\mathrm{F}} + \ell$ と書け，共振時のエンハンスメントは次式で与えられる．

$$G = \frac{4T_{\mathrm{F}}}{\delta^2} \tag{6}$$

G は $T_{\mathrm{F}} = \ell$ のとき最大値 $G = 1/\ell = F/\pi$ をとり，このとき共振器からの反射が消失して，原理的に入射パワーの全てが共振器へ結合する（インピーダンス整合）．したがって，エンハンスメント 10^5 の達成には，フロントミラー以外の 1 往復損失を $\ell = 10\,\mathrm{ppm}$ 級に抑えた上で，T_{F} をこれと整合させる必要がある．これが，第 9 章で述べる超高反射・低損失・大口径ミラーへの要求の直接の起源である．

なお，蓄積効率（入射エネルギーに対する，取り出しに供することができる蓄積エネルギーの割合）は G とは別の指標であることに注意が必要である．例えばフロントミラー透過率 10 ppm，その他の損失 10 ppm の条件でエンハンスメント 10^5 を達成する場合，時間積算した蓄積効率の最大値は約 40%と評価される．本プロジェクトが蓄積効率の目標を 30%と設定しているのは，この物理限界を踏まえたものである．

フィネスおよびエンハンスメントは，リングダウン法により実験的に評価できる．共振状態で入射光を遮断すると，蓄積パワーは時定数 τ で指数関数的に減衰し，τ から 1 往復あたりの損失 δ が求まる．

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \qquad \delta = \frac{2L}{c\tau} \tag{7}$$

δ とフロントミラーの透過率 T_{F} が分かれば，$F \approx 2\pi/\delta$ および $G \approx 4T_{\mathrm{F}}/\delta^2$ として共振器の性能を定量化できる．また，蓄積の立ち上がりも同じ時定数で特徴付けられ，この時定数に対応する共振器ポール（第 5 章）は，共振器の安定化制御の設計にも直結する．

4. 重力波天文が拓いた長距離・高フィネス共振器技術

長距離かつ高フィネスの光共振器技術は，重力波検出という要求の極めて厳しい精密計測の分野で体系的に発展してきた．レーザー干渉計型重力波検出器は，マイケルソン干渉計の両腕に Fabry-Perot 共振器を組み込んだ構成をとり，LIGO では共振器長 4 km [6]，Virgo および KAGRA では 3 km [7,8] という長尺共振器が運転されている．腕共振器のフィネスは数百級（Advanced LIGO で約 450 [6]，KAGRA では約 1500 [8]）に達し，パワーリサイクリングと組み合わせることで，設計上は数百 kW 級の連続光を共振器内に定常的に蓄積する．すなわち，km 級の長尺共振器において高出力光を長時間安定に閉じ込めるという，OEC レーザーが必要とする技術要素の多くが，重力波検出器において既に実証されている．

この蓄積を支えるのが，超低損失ミラーと高精度な共振器制御の技術である．重力波検出器の鏡には，直径 34 cm・質量 40 kg 級の大型石英基材に，イオンビームスパッタ法による Ta_2O_5/SiO_2 系多層膜を成膜したものが用いられ，吸収は ppm 以下，散乱を含む往復損失も 100 ppm を大きく下回る水準に管理されている [6]．表面形状誤差はサブナノメートル rms（Root-Mean-Square）級に抑えられており，本プロジェクトが目標とする大口径・超高反射ミラーの基本技術は，まさにこの分野で確立されたものである．また，レーザー周波数を共振器の共振に追従させる Pound-Drever-Hall（PDH）法 [9] は，重力波検出を目的とした周波数安定化研究の中で考案・洗練された手法であり，多自由度の共振器を同時にロックする制御技術や，低雑音の周波数安定化レーザーの技術とあわせて，長尺共振器の安定運転を可能にしている．

さらに，高蓄積パワー下で顕在化する熱的課題への対処も，重力波検出器において先行して経験されてきた．鏡コーティングの吸収が ppm レベルであっても，数百 kW 級の蓄積光の下では基材に温度勾配が形成され，熱レンズ・熱変形により共振器モードが変化する．このため Advanced LIGO 等では，リングヒーターや補償用レーザーを用いた熱補償システムが導入され，蓄積パワーに応じてミラーの実効曲率を能動的に補正する運用が確立されている [6]．また，KAGRA は熱雑音低減のために低温（約 20 K）のサファイア鏡を採用しており [8]，高熱伝導基材を用いた共振器という観点で，本プロジェクトの基材選定（第 7 章および第 9 章）にも示唆を与える．

一方で，重力波検出器の共振器が扱うのは狭線幅の連続光であり，本プロジェクトが目指すナノ秒パルスの蓄積，10^5 倍のエンハンスメント，そして kJ 級エネルギーの高効率取り出しは，これらの技術をピークパワーと線形パワー密度の両面で桁違いに拡張するものである．すなわち，本プロジェクトは，重力波天文が半世紀をかけて築いた長距離・高フィネス共振器の技術基盤を継承しつつ，それを蓄積パワー 1 GW という未踏の超高出力パルス動作領域へ展開する挑戦と位置付けられる．

5. 共振器の安定化と振動対策

高フィネス共振器では，共鳴の線幅が共振器長に換算して波長のごく一部にまで狭くなるため，レーザーの周波数雑音や鏡間距離の微小な変動が直ちに蓄積パワーの変動・喪失につながる．したがって共振器の安定化とは，本質的にこれらの雑音を共鳴線幅より十分小さく抑え込む問題である．重力波検出器は，km 級の腕共振器の残留長変動を 10^{-14} m 台にまで抑え込むことでこの問題の極限に到達しており，その手法は受動防振，能動防振，階層的フィードバック制御の三層構造として整理できる [10].

第一の受動防振は，多段振り子により共振周波数以上の振動を機械的に減衰させる手法である．振り子はその共振周波数以上で周波数の 2 乗に反比例する伝達特性を持つため，多段化により急峻な減衰が得られる．Virgo の「スーパーアテニュエータ」は倒立振り子と多段振り子を組み合わせた約 10 m の防振塔であり，数 Hz 以上において 10 桁を超える振動減衰を実証している [11]．Advanced LIGO では 4 段振り子が採用され，最終段は溶融石英ファイバーによるモノリシック懸架として機械損失と熱雑音も同時に抑えている [12]．第二の能動防振は，慣性センサ（地震計・加速度計）で振動を検出しアクチュエータで打ち消す方式であり，Advanced LIGO では油圧式プリアイソレータと 2 段の能動除振プラットフォームの組合せにより，受動防振が効きにくい 0.1 ～ 10 Hz 帯で最大 3 桁程度の抑圧を達成している [10]．さらに KAGRA は検出器全体を神岡鉱山の地下に設置することで，地表に比べ地面振動そのものを約 2 桁低減しており [13]，サイト選定・環境設計も防振の一部であるという重要な教訓を与えている．

第三の柱が階層的なフィードバック制御である．共振維持のための誤差信号は PDH 法 [9] で取得するが，重要なのはその補正の「振り分け」であり，高速・微小な変動はレーザー周波数側（電気光学変調器，音響光学変調器，ファイバーストレッチャー等）へ，低速・大振幅の変動は鏡側のアクチュエータへと，周波数帯域ごとに役割を分担させる．鏡側の制御についても，懸架系の上段には粗く大きな駆動を，鏡本体には静電型などの微小駆動を割り当てる階層構造とすることで，制御雑音の混入を最小化しつつ広いダイナミックレンジを確保している [12]．また，複雑な干渉計の動作条件への引き込みを簡素化するため，Advanced LIGO では倍波の補助レーザーを用いて腕長をあらかじめ安定化してから主レーザーを共鳴に引き込む手法が確立されている [14]．レーザー光源自体の周波数・強度安定化技術 [15] も含め，これらは「静的に硬い構造で振動を止める」のではなく，「受動・能動・制御を組み合わせて系全体として共鳴条件を維持する」設計思想であり，本プロジェクトの OEC にそのまま継承できる．

以上の知見を踏まえ，150 m 級 OEC に求められる安定化性能を概算する．二枚鏡共振器の共鳴は，共振器長に換算すると半値全幅 $\Delta L_{\mathrm{FWHM}} = \lambda/2F$ の幅しか持たない．目標とするエンハンスメント 10^5 をインピーダンス整合条件で実現する場合，フィネスは $F \approx \pi \times 10^5 \approx 3 \times 10^5$ に達するため，波長 $\lambda \approx 1\,\mu$m に対して $\Delta L_{\mathrm{FWHM}} \approx 1.6$ pm となる．蓄積パワーの変動を 1%以下に抑えるには，共鳴点からの残留長ずれを半値全幅の約 1/20，すなわち $\Delta L_{\mathrm{rms}} \approx 0.1$ pm（10^{-13} m）以下に維持する必要がある．ここで 0.1 pm という値は原子 1 個のサイズよりはるかに小さいが，レーザーが感じる「共振器長」は，ビームスポット（cm 級）にわたる鏡表面位置のモード加重平均であり，膨大な数の原子にわたって平均された量として，原子スケール以下の変位にも明確な物理的意味を持つ．一方でこの水準の要求は，狭義の「防振」だけで論じられるものではない点に注意が必要である．すなわち 0.1 pm は，地面振動の残留成分のみならず，ミラー基材・コーティングのブラウン運動などの熱雑音，制御系の雑音，さらに高蓄積パワー下で顕著となる吸収起因の非定常な熱変形まで含めた，全長さ雑音バジェットに対する割り当てとして理解すべきである．このうち熱雑音については，重力波検出器の実測から，関連帯域での積分値が 0.1 pm を大きく下回ることが分かっているため，支配的となるのは低周波の地面振動と制御残差である．また，非定常な熱変形は振幅こそ大きいものの時間スケールが遅く，準静的なドリフトとして，低速アクチュエータおよび第 7 章で述べるモード整合の再最適化により対処する．

同じ要求を周波数領域で見ると，自由スペクトル間隔 FSR $= c/2L = 1.0$ MHz に対して共鳴線幅は $\Delta\nu$ = FSR$/F \approx 3$ Hz となり，レーザー周波数（約 3×10^{14} Hz）を共鳴に対して 1 Hz 以下，比率にして 10^{-15} 級で追従させることに相当する．一方，SG の 15 m 系（エンハンスメント 10^4，$F \approx 3 \times 10^4$）では，$\Delta L_{\mathrm{FWHM}} \approx 16$ pm，共鳴線幅は約 300 Hz と要求は約 2 桁緩和される．したがって SG は，スケールアップ後に必要となる安定化技術を段階的に実証する場としても適切である．いずれにせよ，この水準は剛体的なマウントの受動的な安定性のみで達成できるものではなく，重力波検出器がそうであるように，懸架・防振されたミラーに対する多段の能動制御と，レーザー周波数への高帯域フィードバックとを常時働かせて初めて維持されるものである．逆に言えば，同程度の能動制御アーキテクチャを前提とする限り，重力波検出器で実証済みの安定度に鑑みて実現可能な水準と言える．

一般的な実験室環境の地面振動は，海洋波起源の微動（0.1 ～ 0.3 Hz）や人為的振動（1 ～ 100 Hz）を含め，変位振幅にして 10^{-7} ～ 10^{-6} m rms 程度に達する．したがって裸の地面振動と要求値 10^{-13} m の間には 6 ～ 7 桁の隔たりがあるが，このすべてを機械的防振で賄う必要はない．重力波検出器と決定的に異なるのは，レーザーフュージョン用の OEC は変位計測器ではなく，レーザー周波数が共振器の共鳴周波数に追従すればよい点である．すなわち，PDH 誤差信号に基づき，音響帯域を大きく超える制御帯域（電気光学変調器・音響光学変調器を用いれば 100 kHz ～ MHz 級）でレーザー周波数をフィードバック制御すれば，レーザー周波数雑音と地面振動雑音の主要成分はすべて制御帯域内に収まり，また十分なループ利得が得られ

ると試算される．残る 2 ～ 3 桁を，除振台等の受動防振（10 Hz 以上で 1 ～ 2 桁），真空チャンバーによる音響絶縁，機械共振を高周波側へ逃がし減衰を付与した高剛性ミラーマウントで分担すれば，要求値に到達する見通しが得られる．さらに低周波（概ね数 Hz 以下）では，地震波の波長（数百 m ～ km 級）が共振器長 150 m を十分に上回るため，両端のミラーは概ね同相で動き，差動長変動は無相関の場合に比べて大きく抑制される．ただしこの抑制は完全ではなく，残留する差動成分は地面振動の空間勾配と共振器長の積で決まるため，共振器長にほぼ比例して増大する点には注意が必要である．

ここで，防振・制振に要求される精度と共振器長 L との関係を整理しておく．共鳴条件の許容幅を長さに換算した $\Delta L_{\mathrm{FWHM}} = \lambda/2F$ には L が含まれないため，同一のエンハンスメント（同一フィネス）であれば，防振・制振後に許容される残留長変動の絶対値は，15 m 系でも 150 m 系でも同じ約 0.1 pm である．この事情は，共振器内を周回する光波束の描像で理解するのが分かりやすい．光蓄積とは，周回する波束に入射光を 1 往復ごとに同位相で重ね続ける操作であり，ミラー位置のずれ ΔL は，1 往復あたり $4\pi\Delta L/\lambda$ の位相誤差として波束に乗る．波束はおよそ F/π 往復にわたって共振器内に生き残るため，累積位相誤差を 1 rad 程度以下に保つ条件から $\Delta L \lesssim \lambda/2F$ が導かれる．これは 1 往復ごとの位相整合条件であるため，共振器長 L は現れない．したがって，長尺化に伴って厳しくなるのは許容値ではなく，抑え込むべき外乱の側である．第一に，前述の同相除去が有効な上限周波数は概ね $v/(2\pi L)$（v は地盤中の弾性波速度）でスケールする．15 m 系ではこの上限は数 Hz ～ 数十 Hz に位置し，地面振動が強い帯域の一部まで同相除去の恩恵が及ぶのに対し，150 m 系では概ね 1 Hz 以下へ後退する．また，同相除去が働く低周波帯においても，前述の通り残留差動変動は共振器長にほぼ比例して増大する．これら二つの効果により，低周波の差動外乱は全体として約 1 桁増加する．なお，同相除去を失う 10 Hz 以上の帯域では，受動防振・共振器のローパス応答・サーボ利得のいずれもが有効に働くため，同相除去の喪失自体は対処可能である．第二に，レーザー周波数雑音は長さ換算で L 倍されて混入するため，周波数雑音（Hz 単位）に対する許容値は線幅と同様に約 1 桁厳格化する．なお，共振器長の増加に伴い共振器のローパスフィルタ周波数（共振器ポール，150 m・エンハンスメント 10^5 で $\Delta\nu/2 \approx 1.6$ Hz）も低周波側へシフトするが，これは入射レーザーの周波数雑音の抑圧自体には寄与しない点に注意が必要である．第三に，構造の大型化に伴い機械共振が低周波側へ移動し，受動防振が効きにくい帯域と重なりやすくなる．

一方で，共振器ポールが 1.6 Hz と低いことは，それより速い長さジッタに対しては蓄積場自体がローパス応答して実効的に鈍感になることも意味する．すなわち，長尺化における実質的な勝負所は，ポール周波数以下の 0.1 ～ 数 Hz 帯，まさに地面振動の主成分と重なる帯域に集中する．以上より，150 m 系への拡張で必要なのは「残留変動の要求値を 1/10 にすること」ではなく，「同じ約 0.1 pm の残留値を，同相除去の消失により約 1 桁増加した低周波差動外乱と，1 桁厳格化した周波数雑音要求のもとで維持すること」である．この問題への対処としては，レーザー周波数安定化サーボの広帯域化と利得強化，両ミラー基礎の共通化・剛結による差動外乱の低減，およびレーザー周波数雑音そのものの低減が有効である．この整理は SG の位置付けにも直結する．すなわち，15 m 系で制御アーキテクチャと 0.1 pm 級の残留長変動によるロックを実証できれば，150 m 系への外挿において新たに検証すべき項目は低周波差動外乱の増加分に絞られ，安定化技術のスケーリングの見通しが明確になる．

角度安定性についても同様の概算が可能である．ミラー上のフルーエンスを低減するには，ミラー上のビーム径を大きく確保することが望ましい．一例として，両ミラーの曲率半径 R を等しくとり，共振器の g パラメータ（$g = 1 - L/R$，添字 F と E はそれぞれフロントミラーとエンドミラーを表す）を $g_{\mathrm{F}} = g_{\mathrm{E}} = g = -0.999$ とする配置を考えると，基本モードのウエスト半径は $w_0 = \sqrt{\lambda L/2\pi}\,[(1+g)/(1-g)]^{1/4} \approx 0.75$ mm，遠視野の発散角は $\theta_{\mathrm{div}} = \lambda/(\pi w_0) \approx 0.44$ mrad となる．このときウエストは共振器中央に位置し，両ミラー上のビーム半径は $w_{\mathrm{m}} = \sqrt{\lambda L/\pi}\,(1-g^2)^{-1/4} \approx 33$ mm まで拡大するため，**表 1** の蓄積エネルギー 1 kJ・フルーエンス 55 J/cm^2 という設計値と整合する．共振モード軸の角度ずれ θ に対し，小角度では高次モード励起による結合損失は $(\theta/\theta_{\mathrm{div}})^2$ で与えられるため，これを 1%以下に抑えるにはモード軸を数十 μrad 級で安定化する必要がある．さらに，このような安定限界に近い共振器では，ミラーの角度ずれが概ね $1/(1-|g|)$ 倍に増幅されてモード軸のずれとして現れるため，ミラー自体には数十 nrad 級の角度安定性が要求される．これは挑戦的な数字であるが，LIGO の懸架鏡において低周波帯で実現されている角度安定度と同水準であり，補助干渉計を用いたマウントの安定化により長期運用が達成可能な水準である [16]．またロック後の能動制御には，重力波検出器で確立された波面センシングに基づく自動アライメント制御の導入が有効である [6].

構造体の熱ドリフトへの対策も必要である．例えば鋼構造の温度が 0.01 K 変化するだけで 150 m の光路長は約 20 μm 変動し，これは共鳴線幅の 10^7 倍に相当する．しかしながら，時間スケールが遅いため，長ストロークの低速アクチュエータ（ミラー位置のピエゾ素子・電動ステージ）とレーザー周波数の追従で吸収できる．このときレーザー周波数の変動は比率で 10^{-7} 程度（数十 MHz）にとどまり，Yb 系増幅器の利得帯域内に十分収まる．パルス蓄積特有の要求である繰り返し周波数と自由スペクトル間隔の同期についても，ナノ秒パルスの包絡線の重なりに対する要求は相対精度 10^{-7} 級と緩く，厳しいのは位相の整合であるが，これは上述のレーザー周波数ロックの要求に帰着する．以上より，150 m 級 OEC の安定化は，重力波検出器で実証済みの技術群を本プロジェクトの（より緩やか

な）要求仕様に合わせて縮約・適用することで，設計段階から対処可能な課題と位置付けられる．

6. マイルストーン項目 1: OEC へのシードレーザー入射技術

本提案レーザーの成立性を左右する最も重要な要素の一つが，CBC されたレーザー光を OEC へ高効率かつ安定に入射する技術である．高フィネス共振器である OEC では，線幅が狭いため，入射光の空間モード，位相，周波数，時間構造のすべてが厳密に整合していなければ十分なエネルギー蓄積は実現できない．したがって，入射技術は蓄積技術とも密接に連結しており，OEC レーザー全体の性能を決定づける基幹技術として位置付けられる．

現在，大阪大学 Blue Laser Fusion エネルギー協働研究所では，ロッドアンプ型増幅器を複数用いた CBC レーザーシステムを構築している．ロッドアンプは高い利得により大出力化に有利である一方，出力ビーム同士のコヒーレントな結合は容易ではなく，安定運用には課題が残る．CBC により高出力レーザーを実現するためには，各増幅器が高いビーム品質を維持しつつ，非線形効果や損傷限界を回避しながら出力を増大できることが本質的に重要である．この観点から，本プロジェクトではテーパードファイバーアンプの導入を検討している [17]．テーパー構造では，入力側はシングルモード条件を満たす細いコアを有し，出力側に向かってコア径が徐々に拡大するため，断熱的なモード変換により基本モードを維持したまま実効モード面積を拡大できる．その結果，高次モードの励起を抑制しつつ非線形効果を低減し，高出力化と高ビーム品質を両立できる．実際に，局所断熱テーパーを導入した Yb 添加 Large Mode Area (LMA) ファイバーでは，回折限界に近いビーム品質を保ちながらピークパワー 375 kW，$M^2 = 1.3 \sim 1.7$ が実証されており [17]，非テーパーファイバーに比べてビーム品質が大きく改善されている．このように，テーパードファイバーアンプは，モード面積拡大による非線形抑制，断熱テーパーによる高次モード抑制，端面損傷耐性の向上，CBC に適したシングルモード入力構造を同時に実現する増幅器であり，本プロジェクトにおける高出力シード光源の基幹技術であると期待される．

中心波長 1030 ～ 1080 nm，パルス幅 10 ns，繰り返し周波数 10 MHz の条件で，平均出力 300 W 以上，ビーム品質 $M^2 < 1.3$，光-光変換効率 70%を満たすテーパードファイバーアンプは既に市販されている．このような高性能増幅器を 4 台用いた CBC により，SG で必要とされる 1 kW / 10 MHz のシード光源を構築する．一方，最終目標である 10 kW 級出力の達成には，約 40 台のアンプ出力を CBC により統合する必要がある．ここで課題となるのが，多チャネル化に伴う位相制御の複雑化である．ビーム数の増加とともに，各チャネル間の位相ゆらぎ，光路差，温度変動，振動などにより結合効率は著しく低下し，従来型の逐次最適化アルゴリズムでは制御速度と複雑性の両面で限界が生じると危惧される．

この危惧に対して，AI および深層学習（Deep Learning）を用いた位相制御手法は有力な解決策となる [18]．機械学習は，干渉・回折パターンなどの強度分布から位相情報を直接推定し，複雑な非線形対応関係をデータ駆動的に学習することで，高次元位相空間を高速に制御できる．特にニューラルネットワークを用いた手法では，位相補償を単一ステップで実行できる点が大きな利点である．実際に，深層学習により 9 チャネルの位相を単一ステップで同期させ，残留位相誤差 $\lambda/70$ という高精度の位相ロックが実証されている．また，36 チャネルに拡張しても 1 ステップ時間は約 1 ms に保たれ，位相制御時間がチャネル数に本質的に依存しないことがシミュレーションで示されている．

OEC への入射においては，まず入射光と蓄積光の空間モード整合が基本となる．CBC により結合されたレーザー光は単一の基底モードとして振る舞い，OEC の固有モードと高い重なりを持たなければならない．このため，波面，ビーム径，ウエスト位置の精密制御が不可欠であり，わずかな不一致でも結合効率は低下する．さらに，周波数および位相の整合も必要である．レーザー周波数を共振器の共振周波数に一致させるため，PDH 法による高精度ロック [9] が必要であり，CBC と組み合わせる場合には各チャネルの位相同期と共振器ロックを同時に維持しなければならない．加えて，パルス列を用いる場合には，繰り返し周波数と共振器の自由スペクトル間隔を一致させる時間同期も必要であり，この条件が崩れるとエンハンスメントは低下する．

さらに，高平均出力領域では，入射条件そのものが熱効果によって変化する．高平均出力 OEC では，ppm レベルの微小吸収であっても数百 kW 級の蓄積光によりミラー基材内に温度勾配が形成され，熱レンズ効果によって共振器モードが変化する．その結果，低出力時に最適化されたテレスコープ条件は高出力時には成立しなくなり，モードマッチングが崩れる．実際に，フィネス 45,000 の二枚鏡 OEC では，蓄積パワーの増加とともに最適ウエスト位置とウエストサイズの許容範囲が急激に狭まり，テレスコープ調整の難易度が高くなることが示されている [19]．ただし，SG と同等の線形パワー密度 10 MW/cm は補償可能な領域であり，熱レンズ効果を考慮したテレスコープ最適化により，安定な 710 kW 蓄積が達成されている [19]．すなわち，OEC へのレーザー入射技術は，空間モード整合，周波数・位相ロック，時間同期に加えて，高平均出力下での動的モードマッチングを統合した複合技術であり，単一条件での最適化ではなく，広い動作領域を許容する設計思想が不可欠である．

この観点から，SG は最終ゴールに向けたマイルストーンとして明確な意義を持つ．SG では共振器長 15 m，1 kW 級シード光の条件で，モード整合，周波数ロック，時間同期，さらに熱レンズ効果によるモードマッチング変動を含む動的制御の成立性を検証する．短尺共振器系で得られた設計指針が長尺・高出力の共振器系へ適用可能かを確認することで，入射技術のスケーリング則を明らかにし，最終

システム設計へ反映する．

7. マイルストーン項目 2: OEC でのレーザー蓄積技術

共振器内でのレーザー蓄積は，OEC レーザーの中核技術である．高効率な光蓄積を実現するためには，入射レーザーの空間モード，時間位相，周波数が，共振器の固有モードおよび共振条件と同時に整合していなければならない．すなわち，入射光が共振器モードと高い重なりを持ち，かつ適切なタイミングと周波数で供給されることで，パルスが共振器内で時間的に重ね合わされ，エネルギーが増幅される．この意味で，蓄積技術は入射技術と連続した関係にあるが，特に高エンハンスメント・高平均出力領域では，共振器内部で発生する熱応答が支配的となる点に独自の困難さがある．

低パワー領域では，モード整合と共振条件の制御により高い蓄積効率が実現できることが既に示されている．実際に，15 m 級共振器において 10^4 倍以上のエネルギー増幅が確認されており，理論計算との整合も得られている．したがって，OEC そのものの光蓄積原理は既に成立していると言える．一方で，今後の本質的課題は，この原理を高平均出力・高線形パワー密度領域へどこまでスケールできるかにある．

高平均出力 OEC では，熱蓄積によるミラー変形により基底モードと高次モードの縮退が生じ，モード間結合や不安定性を引き起こす．その結果，蓄積パワーの時間変動やフィードバック制御の破綻が生じ，最終的に蓄積効率の上限を規定する要因となる．また，熱レンズ効果は入射側のモードマッチング条件にも影響を与えるため，低出力時に最適化された条件が高出力時には成立しなくなり，蓄積パワーの飽和や効率低下をもたらす．

このような熱起因のモード劣化に対しては，空間モードの純度を維持する対策が不可欠である．その一つが，共振器内におけるスペーシャルフィルタ機能の導入である．先行研究では，高出力 OEC に D 字型ミラーを用いた高次モードダンパが導入されており，高次モード成分を選択的に抑制することで，基底ガウシアンモードを維持しつつ安定な蓄積が実現されている．また，500 kW 級の四枚鏡 OEC においても，高次モードを効果的に抑制することで，有効エンハンスメント係数の低下を小さく抑えながら安定蓄積が達成されている [20]．このような空間モード制御は，単に損失を減らすだけでなく，局所的な強度ピークの発生を防ぎ，ミラー損傷やさらなる熱変形を抑制する点でも重要である．

OEC に特有の事情として，共振器ミラーが反射素子であると同時に透過窓としての機能も兼ねるため，裏面から直接冷却できず，外縁部からのみ排熱する構造であることにも配慮が必要である．この制約により，蓄積された熱は主として面内方向に拡散し，面内の径方向に強い温度勾配が形成されやすい．結果として，屈折率変化と熱膨張により波面歪みが生じ，実効曲率が変化して共振器モードが変形する．すなわち，線形パワー密度に依存したミラーの熱変形が，OEC における光蓄積の成立性を決定する第一関門となる．

先行研究によれば，石英基材のミラーでは，線形パワー密度がおよそ 10 MW/cm 級の領域までは，ミラー変形が生じても入射側テレスコープの調整によりモードマッチングを再最適化し，安定な光蓄積が可能であることが示されている [19]．一方で，SG 後に計画する 100 MW/cm 級は未踏領域であり，本プロジェクトの最終目標である 300 MW/cm 級では，熱変形が補償可能な範囲を超え，共振器そのものの安定性を損なう可能性が高い．したがって，SG の段階では石英基材ミラーで成立性を検証できると期待されるが，SG 以降の最終ゴールに向けては，より高い熱耐性を有する基材の導入が不可欠となる．

このとき重要なのは，単純な熱伝導率の大小ではなく，熱勾配による変形をどれだけ抑制できるかである．その評価には，熱伝導率を熱膨張係数で割った値が指標として有効である．この指標によると，SiC が有力な候補であるが，光学素子としての性能は未知である．KAGRA にて実績のあるサファイアは，低温領域（< 100 K）で動作させることで，性能指標が常温の SiC を上回る．さらに究極的な基材としてダイヤモンドが考えられる．これらは高い熱伝導率と低い熱膨張係数を併せ持ち，極限的な高平均出力条件下でもモード安定性を維持できる可能性を有する．したがって，最終段階では，低吸収コーティング技術と高熱伝導基材を組み合わせた新しい OEC ミラーの開発が必要になる．ミラー基材候補の物性値を含むシミュレーション・コードを構築すると共に，高線形パワー密度を模擬した熱負荷に対してミラー歪みの実測を行い，シミュレーション・コードのベンチマークを実施することで，SG 以降のミラー基材の選択に不可欠な設計ツールを獲得する．

以上より，OEC 内でのパルス蓄積技術は，単なる共振器設計の問題ではなく，熱・光学・モード制御が強く結合した複合問題である．本プロジェクトでは，低パワー領域で既に成立している高効率蓄積を出発点として，ミラー基材およびコーティングの低吸収化と高熱伝導化，共振器設計の最適化，スペーシャルフィルタによる高次モード抑制を統合することで，高平均出力領域においても安定した光蓄積を実現し，OEC レーザーのスケーラビリティを確立することを目指す．

8. マイルストーン項目 3: OEC からの光取り出し技術

OEC に蓄積された光をフュージョン反応に利用するには，共振器内に蓄積された高エネルギー光を，そのまま外部へ取り出すことが不可欠である．例えば，ポッケルスセルによる偏光制御を用いた共振器からの光取り出しでは，ポッケルスセルそのものが光損失源となるため，我々が目指す高フィネス共振器とは両立しない．このため，本プロジェクトでは，共振器の共振状態に対して非侵襲かつ高耐力を本質的に実現し得る方式として，ガスグレーティン

グ [21] を用いた光取り出し技術を検討する．

ガスグレーティングは，固体光学素子とは異なり，媒質自体が逐次更新されるトランジェント光学素子であるため，極めて高い損傷耐性を有する．実際に，オゾンを混合した中性ガスに周期的な密度変調を形成することで，回折効率 96%が達成され，6 ns レーザーに対して 1.6 kJ/cm^2 という極めて高い損傷閾値が実証されている [21]．この値は従来の固体回折格子を大きく上回るものであり，高エネルギー密度環境で動作する OEC の光取り出し素子として有力である．

この方式では，オゾンの深紫外吸収を利用して空間的に周期的なエネルギー付与を行い，音波および第二音波（エントロピー波）に起因する密度変調を形成する．形成された密度変調は屈折率分布となって体積型回折格子として機能し，高効率な 1 次回折を実現する．特に重要なのは，この密度変調がほぼ 100%に近いコントラストで形成され，1 cm 程度の厚みの媒質内で十分な光路差を確保できる点である．これにより，不要な回折次数を抑えつつ，ほぼ単一方向にエネルギーを集中できる体積型回折が可能になる．また，回折ビームの波面歪みは適切な条件下で $\lambda/10$ 以下に抑えられることも実験的に示されており，単に高耐力であるだけでなく，ビーム品質維持の観点からも有望である．

一方で，OEC への適用においては固有の困難がある．OEC の内部全体にオゾンを含むガスを封入すると，ガスが吸収損失源となり，エンハンスメントを著しく損なう．このため，ガスは光取り出し部近傍に限定して局所的に導入しなければならない．すなわち，真空中にシート状のオゾン含有ガスジェットを形成し，その局所領域のみに回折構造を書き込む必要がある．しかし，ガスグレーティング法において，「真空中の局所ガス流」と「その内部における時空間的な屈折率構造形成」を同時に実現する技術は，まだ確立していない．流体ダイナミクス，光吸収，熱輸送，音波生成が複雑に結合するため，基礎的理解と実験的検証の両方が必要であり，ここに本研究の大きな挑戦性がある．

シート状のガスグレーティングによる吸収についても事前評価を行った．酸素分子単体は 1000 nm 付近の光をほとんど吸収しないが，複数の酸素分子が存在する場合には，分子間衝突により誘起される電子構造の歪みに起因して吸収が生じる．この吸収機構は衝突誘起吸収（collision-induced absorption）と呼ばれ，これまでに測定および理論計算に基づく断面積が報告されている [22]．一方，オゾン分子は赤外域において吸収を有し，地球大気科学の観点から高精度な吸収断面積データが発表されている [23]．これらの既知の断面積を用い，最新のガスグレーティング実験の成果を踏まえ，混合ガスの全圧を 0.5 atm，オゾン濃度を 2%，ガス厚さを 3 mm とした条件で吸収量を評価すると，0.16 ppm と見積もられた．この値は十分小さく，OEC の成立性に影響しない水準であることを確認した．

共振器スケールの拡大に伴い，要求されるグレーティング構造も大きく変化する．15 m 級共振器では，取り出し位置におけるビーム径が比較的小さく，レイリー長の範囲内で光取り出しが可能であり，波面も平面波に近いため，周期一定の比較的単純なグレーティングを用いることができる．これに対し，150 m 級かつ kJ 級蓄積を想定した最終系では，共振器中心付近ではフルーエンスが極めて高くなり，ガスグレーティング自体の動作領域を超える恐れがある．そのため，取り出し位置は中心から外れた領域に設定せざるを得ないが，その場合には取り出し点はレイリー長の範囲外になり，ビーム波面が球面波となり，ビームの場所によって入射角と回折条件が変化する．このため，周期一定の単純グレーティングでは高効率な取り出しが困難になる．

この課題に対しては，波面曲率に適合した不等間隔グレーティング，すなわちフレネルゾーンプレートに類似した構造の導入が必要となる．しかも，ガスグレーティングでは密度変調が静的に存在するのではなく，紫外書き込み後の時間発展に伴って形成・変形する．実際，オゾン密度変調は紫外パルス照射直後には生じず，50 ～ 60 ns 程度の遅れの後に顕在化し，その後はグレーティング周期に応じた時間変動を示すことが知られている．したがって，設計対象は単なる幾何学的なグレーティング周期ではなく，ガス膨張，熱拡散，音波伝播を含む時間依存の三次元密度構造そのものとなる．このような高次元設計問題に対しては，従来の解析的設計だけでなく，機械学習を含むデータ駆動的な最適設計の導入が有効であると考えられ，すでに予備研究が開始されている．

また，回折効率は入射角，屈折率変調量，グレーティング周期，媒質厚さに強く依存する．実験では，高い回折効率を維持できる角度許容幅が約 0.06° と狭いことが示されており，大面積ビームに対して均一な取り出しを実現するには，空間的に変化する局所条件に高精度で適合したグレーティング構造が必要となる．加えて，取り出し時のビーム品質維持も重要であり，高フルーエンス条件では波面歪みだけでなく，ガス中の非線形光学効果の発現にも注意が必要である．ナノ秒領域では非線形効果は比較的小さいと期待されるものの，最終的な高エネルギー動作では，回折効率と波面品質を両立できる動作領域を明確にしなければならない．

以上を踏まえると，OEC における光取り出し技術は，高耐力という観点ではガスグレーティングによって大きなブレークスルーが期待できる一方，最終目標で想定されるガスグレーティングの動作点は，空間・時間・流体・光学が統合される未開拓領域であり，システム全体の成立性を左右する重要なボトルネックの一つである．本プロジェクトでは，まず SG までに，真空中で安定なオゾン含有ガスジェットを形成し，その内部に周期的密度変調を生成する基盤技術を確立する．その上で，最終ゴールに向けては，10 Hz 動作を可能にするパルス的なガスジェットの形成と排気，高強度レーザー照射下における酸素・オゾンガスが光学素子に与える影響を明らかにすると共に，時間発展を含めた三次元的不等間隔グレーティング構造を実現し，ス

ケールアップに伴う波面変化に適応した高効率光取り出し技術の確立を目指す．これは極めて挑戦的ではあるが，15 m 級 OEC を念頭にした真空内での単純周期構造形成から開始し，最終的に 150 m 級 OEC に対応できる時間依存・空間依存構造へ発展させることで，段階的に開発する計画である．

9. マイルストーン項目 4: OEC ミラーの大型化技術

OEC レーザーに必要な高耐力ミラーの開発は，単なる大口径化の問題ではなく，高表面品質，高反射率，低散乱，高 LIDT，高熱耐性を同一素子上で同時に成立させる統合技術である．最終ゴールとしては，1 μm 帯で有効開口 8 インチ，反射率 99.999%以上，全積分散乱（Total Integrated Scattering: TIS）10 ppm/mirror 以下，表面形状誤差 0.5 nm rms 以下，高空間周波数誤差 0.1 nm rms 以下，さらに LIDT 55 J/cm^2 以上，線形パワー密度 300 MW/cm 以上を満たすミラーの実現を目指す．一方，SG で必要なオプティクスは 2 インチ級，線形パワー密度 9.1 MW/cm 以上であり，入手可能である．現状の技術調査から，表面品質や反射率など多くの仕様は，それぞれ単独では既存技術の延長で到達可能であるが，同時達成には材料の選定，構造の設計，製造プロセスの最適化などが不可欠である．

基盤技術としての基板加工および超精密研磨技術は既に高い水準に達しているが，大面積化に伴いサブサーフェスダメージ（Sub-Surface Damage: SSD）や残留応力が性能を支配する要因となる．このため，高温アニール，化学エッチング，洗浄による前処理が不可欠であり，これらは LIDT 向上と長期安定性確保の両面に寄与する．また，表面品質は低・中・高空間周波数成分ごとに管理する必要がある．低周波誤差はモードマッチングを損ない，中周波誤差は小角散乱と高次モード励起を引き起こし，高周波誤差は ppm レベルの散乱損失を増加させる．このため，表面形状誤差だけでなくパワースペクトル密度（PSD）に基づく包括的な面品質制御が必要であり，最終ゴールでは各周波数帯でサブナノメートルレベルの精度が要求される．

高反射率の実現には，透過・吸収・散乱の各損失を厳密に分離・制御する必要がある．総損失を 10 ppm 以下に抑えるためには，コーティングだけでなく基板品質，研磨，洗浄，成膜プロセスのすべてを統合的に最適化しなければならない．特に散乱は表面粗さに強く依存し，0.1 nm 級の粗さ制御が必要となることから，大面積化においてもこの精度を維持することが重要である．

OEC ミラーの最大の課題は，高反射率と高面精度を維持したまま高 LIDT を実現する点にある．従来の Ta_2O_5/SiO_2 多層膜は低損失特性に優れる一方，LIDT の観点では限界があり，最終ゴールには到達しない．このため，高バンドギャップ材料である HfO_2 への展開 [24] が有望であるが，HfO_2 は吸収や散乱を増加させやすく，単純な材料置換では解決しない．したがって，材料選択は反射率・吸収・散乱・耐損傷性のトレードオフ問題として扱う必要がある．

膜設計の高度化による LIDT 向上の可能性もある．単純な四分の一波長スタックではなく，電場分布を制御する複合層設計やトップ層設計により，損傷が発生しやすい領域の電場強度を低減する手法が有効であると考えられる [25]．実際に，高 LIDT を実現する設計は既に示されているが，吸収損失が増加するため，低損失特性との両立が今後の核心となる．

さらに，ポストアニールによるプロセス最適化も重要である．アニールにより吸収低減と応力緩和が同時に実現可能である一方，過度な温度では結晶化やデラミネーションが発生するため，プロセス窓の最適化が不可欠である．特に大面積ミラーでは膜応力の不均一が面形状誤差に直結するため，成膜均一性と応力制御の両立が必要となる．

また，OEC では高線形パワー密度に起因する熱変形も重要な制約となる．この観点では基材選択が決定的に重要であり，熱伝導率と熱膨張係数の比で評価される性能指標が高い材料が有利である．SiC は石英に比べて優れた特性を持ち，さらにダイヤモンドは極めて高い熱伝導率と低熱膨張を兼ね備え，最も有望な基材候補である．したがって，最終段階ではこれらの高熱伝導基材と低損失コーティング技術の統合が不可欠となる．

以上より，OEC ミラー開発の現状は「個別要素では達成されているが，同時成立には至っていない」段階にある．本質的課題は，基板加工，超精密研磨，低損失コーティング，高 LIDT 材料設計，プロセス最適化，熱変形抑制を一体として統合することである．本プロジェクトでは，SG においてサンプルミラー規模で既存技術の統合の可能性を検証し，その上で 8 インチ級かつ 300 MW/cm 級に耐えるミラー技術へと段階的に展開することで，炉級 OEC への適用可能性を確立する．

10. マイルストーン項目 5: 全体システムとしての同時成立性および整合性

本プロジェクトにおける最も重要な評価指標は，各要素技術の個別成立ではなく，それらが相互に矛盾なく同時に成立し，フュージョンドライバーとして機能するかどうかである．すなわち，OEC レーザーは，レーザー入射，共振器内蓄積，光取り出し，ミラー大型化の各要素が独立に最適化されるだけでは成立せず，相互に強く結合したシステムとして整合的に設計される必要がある．

まず，レーザー入射技術と共振器内蓄積技術は密接に結びついている．高効率入射を実現するための空間モード整合や周波数ロック条件は，共振器内の熱レンズ効果やモード変形によって動的に変化する．そのため，入射系で最適化された条件が蓄積時にも維持されるとは限らず，両者は一体として設計・制御する必要がある．特に高平均出力領域では，共振器内の熱応答が入射条件を変化させるフィードバックループが形成されるため，入射効率と蓄積効率は独立な指標ではなく，統合的に評価していく必要がある．

次に，共振器内蓄積と光取り出し技術の間にも強い相互依存性が存在する．光取り出しは共振器内のエネルギー分

表 2 システム全体として 10%の電気-光効率を満たすための各要素の効率例.

	Final goal	Goal@SG	Remark
LD O–E efficiency	0.5	合理的に高効率な市販品を活用	50%を超える実績あり
Fiber O–O efficiency	0.8	合理的に高効率な市販品を活用	84%の実績あり
CBC efficiency	0.9	0.9	10.4 kW で 96%の報告 [26]
Total seed efficiency	0.36	SG までの成果に基づき評価	
OEC efficiency	0.3	0.3	最適化の余地あり
Extraction efficiency	0.9	0.9	96%の実績あり [21]
System efficiency	0.1	SG までの成果に基づき評価	>0.1 の方向性を SG までに示す

布やモード構造に影響を与え，逆に共振器内の波面構造は取り出し効率に影響する．特にガスグレーティングを用いる場合，回折効率は局所的な入射角や波面曲率に依存するため，蓄積された光の空間分布と整合した取り出し設計が不可欠である．また，取り出しに伴う局所的なエネルギー変化や位相変化が共振器の共振条件に影響を与える可能性があるため，蓄積と取り出しは一体として最適化する必要がある．

さらに，ミラー大型化技術はこれらすべての基盤として機能する．ミラーの表面品質，反射率，LIDT，熱変形特性は，入射効率，蓄積効率，取り出し効率のすべてに直接影響を及ぼす．特に高線形パワー密度領域では，ミラーの熱変形が共振器モードを変化させ，結果として入射条件および取り出し条件にも影響を与えるため，ミラー設計は単独ではなく，システム全体との整合性の中で最適化される必要がある．

このように，OEC レーザーは各要素技術が相互に制約し合う強結合系であるが，現時点での設計検討および既存研究の整理に基づく限り，これらの要素間に本質的に両立不可能な相反条件は見出されていない．すなわち，各要素技術の要求仕様は厳しいものの，適切な設計領域を選択することで同時成立可能な範囲が存在すると考えられる．この点は，本プロジェクトの実現可能性を支える重要な知見である．

SG においては，この同時成立性を実験的に検証するために，15 m 級共振器および 1 kW 級シード光という条件のもとで，各要素技術の相互整合性を確認する．具体的には，蓄積効率（目標 30%）およびエンハンスメント 10^4，取り出し効率（目標 90%），ミラー耐力（2 インチ級）を個別に評価するだけでなく，それらが同時に成立する動作点を探索し，システムとしての安定動作領域を特定する．また，この過程で得られる実験データとシミュレーションを統合することで，150 m 級・kJ 級システムへのスケーリング則の妥当性を検証する．

システム全体として 10%の電気-光効率を達成するために要求される各要素の効率の一例を**表 2** に示す．レーザーダイオード（LD）の電気-光変換効率は最終目標として 0.5 を想定する．本項目については SG 段階での具体的な数値目標は設定しないが，既に 50%を超える実績が報告されており，達成の可能性はある．ファイバー増幅器の光-光変換効率は 0.8 を目標とし，テーパードファイバーアンプにおいて 84%の実績が報告されている．CBC の効率は 0.9 を目標とし，SG 段階においても同水準を目標とする．これについては 10.4 kW 出力において 96%の効率が実証されており [26]，技術的な裏付けがある．これらを踏まえたシード生成の総合効率は 0.36 となる．OEC の蓄積効率については 0.3 を目標とし，SG においても同値を設定するが，さらなる最適化の余地がある．また，エネルギー取り出し効率は 0.9 を目標とし，SG においても同等とする．SG 段階ではシステム全体としての定量的な目標値は設定しないものの，10%達成に向けた技術的方向性を実証することを目指す．

最終的には，OEC レーザーがフュージョンドライバーとして成立するための条件，すなわち各効率（電気-光変換，CBC，蓄積，取り出し）と光学素子耐力が同時に満たされる設計領域を明確化することが目標である．この設計領域の存在を実証することが本プロジェクトの科学的成果であり，将来の実験炉および発電炉設計への橋渡しとなる．

11. 研究開発体制

SG までの研究開発項目と実施体制を**図 2** と**表 3** に示す．本体制は，前章までに整理した技術課題，すなわちシードレーザーの高効率化と安定な入射制御，OEC 内での高効率な光蓄積，光取り出し機構の高効率化，ミラーの大型化および高耐力化，ならびにそれらを統合する設計指針の確立に対して，各分野の専門性を有する研究者・機関が有機的に連携する構成である．中核課題である OEC へのレーザー入射および OEC 内での光蓄積は，プロジェクト全体を俯瞰できるプロジェクトマネージャーが大阪大学 Blue Laser Fusion エネルギー協働研究所の枠組みの下で一体的に推進し，CBC，時間位相制御，空間モード整合，共振器安定化，ミラー冷却を統合的に扱うことで，入射効率と蓄積効率の同時最適化という本質的課題に対して分断のない開発を可能とする．

光取り出しについては，ガスグレーティング法に関する実績を有する電気通信大学のグループが主導し，OEC 内で形成される高エネルギー密度場との整合を考慮した取り出し機構の確立を担う．OEC ミラーに関しては，大口径化と高耐力化という二つの技術課題に対し，大型光学素子の製造技術を有するオカモトオプティクスがミラー開発の方向性の検討を担い，平均パワー密度およびパルス・ピーク

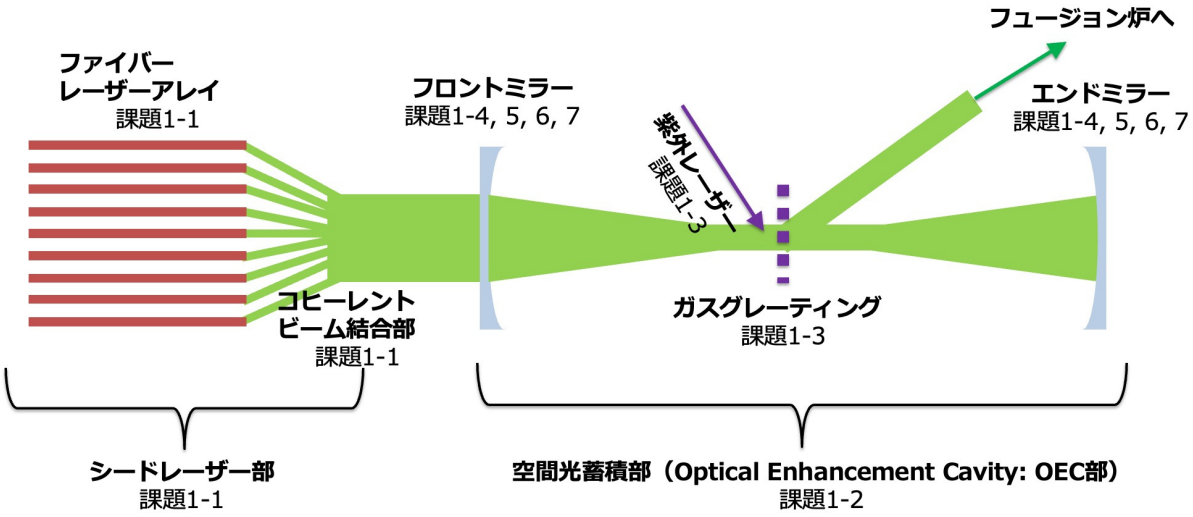


図 2　プロジェクト開始から 2 年目までの研究開発項目．

表 3　SG までの研究開発課題と対応するマイルストーン項目．課題番号は図 2 中の番号に対応する．

課題番号	課題名	実施機関	対応マイルストーン
1-1	効率的レーザーシード	大阪大学 Blue Laser Fusion エネルギー協働研究所	①
1-2	効率的 OEC 閉じ込め	大阪大学 Blue Laser Fusion エネルギー協働研究所	②
1-3	光取り出し	電気通信大学	③
1-4	ミラー大型化	オカモトオプティクス	④
1-5	OEC シミュレーション	東京工科大学	⑤（特に蓄積パワーに対する外挿性）
1-6	入力パワー限界	近畿高エネルギー加工技術研究所	②及び 1-5 シミュレーションへの検証データ提供
1-7	高反射ミラーダメージ限界	レーザー技術総合研究所	②及び 1-5 シミュレーションへの検証データ提供

パワー密度に対する損傷限界を，高出力レーザー設備およびダメージ評価に強みを有する近畿高エネルギー加工技術研究所とレーザー技術総合研究所が実験的に定量化する．さらに定量化されたデータベースを実機にスケールするため，東京工科大学のグループがシミュレーション・コードを開発し，実験結果と連動した設計指針の高度化を進める．以上により，各要素技術の整合性を確保しつつ，OEC レーザー全体としての成立性を定量的に検証できる体制となっている．

12.　まとめ

本稿では，OEC レーザーをフュージョンドライバーとして成立させるために必要な要素技術について，各マイルストーン項目に対して段階的に到達可能なスペックを整理した．

マイルストーン項目①「OEC へのシードレーザー入射技術」に関しては，テーパードファイバーアンプを用いた CBC レーザーにより，1 kW / 10 MHz 級のシード光源は既存技術の延長で実現可能であることが示された．また，AI および深層学習を用いた位相制御の導入により，多チャネル化に伴う制御困難性を克服しつつ，高いモード整合と位相同期を維持できる見通しが得られた．これにより，蓄積効率 30%に向けた入射効率は，SG までに段階的に検証可能である．

マイルストーン項目②「OEC でのレーザー蓄積技術」に関しては，15 m 級共振器においてエンハンスメント 10^4 以上が既に実証されており，低パワー領域では理論と整合した高効率蓄積が可能であることが確認された．また，石英基材ミラーにおいては線形パワー密度約 10 MW/cm 級まで安定動作が可能であり，SG までの条件では成立性が高い．一方で，100 MW/cm 級以上では熱変形が支配的となるため，高熱伝導基材の導入が不可欠であることが明らかとなり，ピークパワー増大率 10^5 に向けた課題が特定された．本プロジェクトにおいては，模擬熱負荷によるミラー変形の計測とその数値シミュレーションの開発を行い，100 MW/cm 級での設計を実施できる体制を整える．

マイルストーン項目③「OEC からの光取り出し技術」に関しては，ガスグレーティングを用いることで，高耐力かつ高効率の光取り出しが可能であることが示された．既存研究では回折効率 95%以上，損傷閾値 1.6 kJ/cm^2 が実証されており，SG の段階では単純周期構造により高効率取り出しが可能と見込まれる．一方で，スケールアップに伴い波面曲率への適応や時間依存構造設計が必要となるため，最終ゴールに向けた三次元構造制御技術の確立が重要課題である．また，真空中に安定にオゾンを含むガスシートをパルス的に形成することは，ガス・オプティクス開発における本質的に新しい挑戦である．

マイルストーン項目④「OEC ミラーの大型化技術」に

関しては，2 インチ級ミラーは既存技術の高度統合により実現可能である一方，8 インチ級かつ 300 MW/cm 級に耐えるミラーは未踏領域であることが明確となった．HfO_2 系材料の導入，膜設計の高度化，ポストアニールによる低損失化，さらに低温動作のサファイア，SiC 及びダイヤモンドなど高熱伝導基材の適用が必要であり，本要素は最終ゴールに向けた最大の挑戦課題の一つである．

マイルストーン項目⑤「全体システムとしての同時成立性」に関しては，各要素技術は強く結合しているものの，現時点で本質的に両立不可能な相反条件は見出されていない．すなわち，入射，蓄積，取り出し，ミラーの各要求仕様は，適切な設計領域において同時成立可能であると判断される．このため，SG では 15 m 級共振器および 1 kW 級シード光条件下で各要素技術の整合性を実験的に検証し，SG 以降は蓄積エネルギーを段階的に増加させることで，リアクタースケールへの外挿可能性を定量的に示すことが可能である．

以上より，本プロジェクトにおいては，SG までに「1 kW 級シード光」「エンハンスメント 10^4 以上」「1 J 級蓄積」「高効率光取り出し」「2 インチ級ミラー」を同時に成立させるシステム動作点を実証し，その上で 150 m 級共振器および kJ 級蓄積へのスケーリングに必要な課題を明確化する計画と体制が整っていることを確認した．

最後に，本プロジェクトの意義について述べる．OEC レーザーに不可欠な高反射ミラーは，重力波観測という物理学における極めて重要な挑戦を実現するために，長年にわたる研究開発の積み重ねの上で確立され，その成果が LIGO における重力波検出へと結実した．フュージョンエネルギーの実現もまた，超高エネルギー密度状態を連続的に作り出し，フュージョン反応で生み出される膨大なエネルギーを回収し市井で利用可能な形態に変換する点で，それに劣らない人類の大きな挑戦である．本プロジェクトにおける OEC の開発は，光学技術を中心として，材料，制御，流体，情報科学など多分野に新たな課題を提示し，その過程で新しい科学と技術の芽を生み出すことが期待される．すなわち，本研究はフュージョンエネルギーの実現に資するのみならず，基礎科学および応用科学の双方に新たな展開をもたらす挑戦である．

謝　辞

本稿の取りまとめにあたり，鈴木貴特任教授，瀧澤龍之介助教，金澤敏雄氏，丸田秀幸氏，山本佑氏（以上，大阪大学 Blue Laser Fusion エネルギー協働研究所），大久保友雅教授（東京工科大学），井澤靖和名誉教授，本越伸二氏（以上，レーザー技術総合研究所），竹本誠氏（近畿高エネルギー加工技術研究所）には議論に加わっていただき，多くのコメント，貴重な知見，資料の提供をいただきました．

ダイヤモンドミラーについては山村和也教授（大阪大学）及びサファイアミラーについては都丸隆行教授（国立天文台）よりご助言をいただきました．本研究の一部は Blue Laser Fusion Inc. との共同研究で得られた成果であり，JST ムーンショット型研究開発事業（JPMJMS25A9）の支援を受けたものです．本稿の元となった報告書に対してフィードバックをいただいた，吉田善章 PD をはじめとするムーンショット型研究開発事業・目標 10 のアドバイザー各位及び JST の担当各位に感謝いたします．

参　考　文　献

[1] A. Sunahara *et al.*, Laser-based inertial fusion energy system enabled by optical enhancement cavities and a direct-drive configuration reactor, Opt. Express **33**, 47104 (2025).
[2] H. Abu-Shawareb *et al.*, Achievement of Target Gain Larger than Unity in an Inertial Fusion Experiment, Phys. Rev. Lett. **132**, 065102 (2024).
[3] S. Fujioka, Nuclear-Fusion Reaction Beats Breakeven, Physics **17**, 14 (2024).
[4] T. Eidam *et al.*, Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power, Opt. Express **19**, 255 (2011).
[5] C. Labaune *et al.*, On the feasibility of a fiber-based inertial fusion laser driver, Opt. Commun. **281**, 4075–4080 (2008).
[6] J. Aasi *et al.*, Advanced LIGO, Class. Quantum Gravity **32**, 074001 (2015).
[7] F. Acernese *et al.*, Advanced Virgo: A second-generation interferometric gravitational wave detector, Class. Quantum Gravity **32**, 024001 (2015).
[8] T. Akutsu *et al.*, KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector, Nat. Astron. **3**, 35–40 (2019).
[9] E. D. Black, An introduction to Pound–Drever–Hall laser frequency stabilization, Am. J. Phys. **69**, 79–87 (2001).
[10] F. Matichard *et al.*, Seismic isolation of Advanced LIGO: Review of strategy, instrumentation and performance, Class. Quantum Gravity **32**, 185003 (2015).
[11] S. Braccini *et al.*, Measurement of the seismic attenuation performance of the VIRGO Superattenuator, Astropart. Phys. **23**, 557–565 (2005).
[12] S. M. Aston *et al.*, Update on quadruple suspension design for Advanced LIGO, Class. Quantum Gravity **29**, 235004 (2012).
[13] T. Akutsu *et al.*, Overview of KAGRA: Detector design and construction history, Prog. Theor. Exp. Phys. **2021**, 24 (2021).
[14] A. Staley *et al.*, Achieving resonance in the Advanced LIGO gravitational-wave interferometer, Class. Quantum Gravity **31**, No. 24 (2014).
[15] B. Willke, Stabilized lasers for advanced gravitational wave detectors, Laser Photonics Rev. **4**, 780–794 (2010).
[16] K. Numata *et al.*, Interferometric testbed for nanometer level stabilization of environmental motion over long time scales, Appl. Opt. **47**, 6832 (2008).
[17] Y. Zhu *et al.*, Yb-doped large mode area fiber for beam quality improvement using local adiabatic tapers with reduced dopant diffusion, Opt. Express **26**, 17034 (2018).
[18] H. Zhou *et al.*, Machine learning phase control of filled-aperture coherent beam combining: Principle and numerical demonstration, High Power Laser Sci. Eng. **13**, e39

(2025).

[19] X. Y. Lu *et al.*, 710 kW stable average power in a 45,000 finesse two-mirror optical cavity, Opt. Lett. **49**, 6884 (2024).

[20] X. Y. Lu *et al.*, Stable 500 kW average power of infrared light in a finesse 35 000 enhancement cavity, Appl. Phys. Lett. **124**, 0–6 (2024).

[21] Y. Michine and H. Yoneda, Ultra high damage threshold optics for high power lasers, Commun. Phys. **3**, 24 (2020).

[22] T. Karman *et al.*, O_2-O_2 and O_2-N_2 collision-induced absorption mechanisms unravelled, Nat. Chem. **10**, 549–554 (2018).

[23] V. Gorshelev *et al.*, High spectral resolution ozone absorption cross-sections – Part 1: Measurements, data analysis and comparison with previous measurements around 293 K, Atmos. Meas. Tech. **7**, 609–624 (2014).

[24] D. Zhang *et al.*, High laser-induced damage threshold HfO_2 films prepared by ion-assisted electron beam evaporation, Appl. Surf. Sci. **243**, 232–237 (2005).

[25] D. Schiltz *et al.*, Strategies to increase laser damage performance of Ta_2O_5/SiO_2 mirrors by modifications of the top layer design, Appl. Opt. **56**, C136 (2017).

[26] M. Müller *et al.*, 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser, Opt. Lett. **45**, 3083 (2020).