商用レーザ駆動核融合に不可欠な高精度光学部品

サリー・コール・ジョンソン

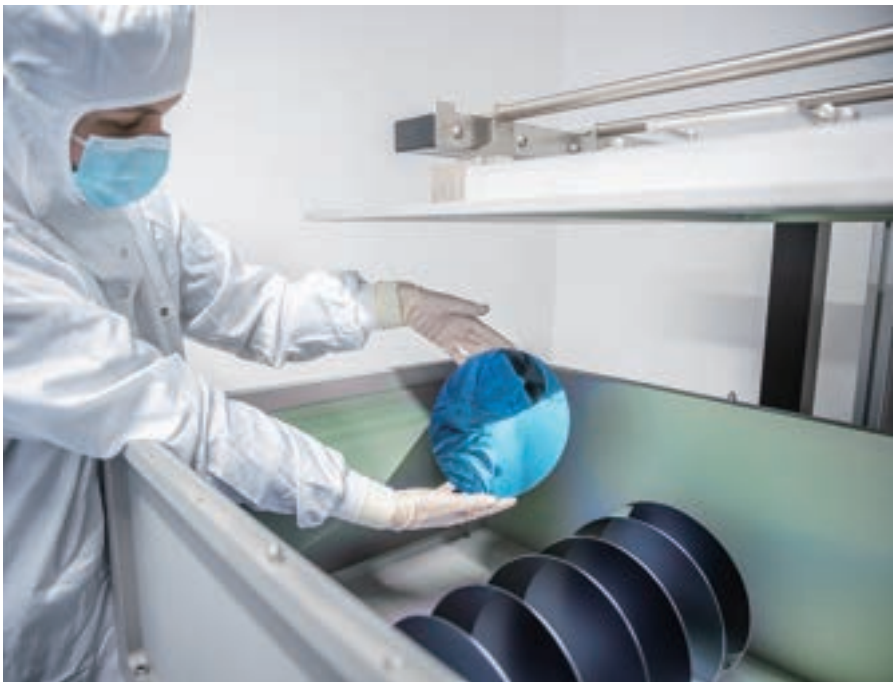
高反射で熱安定性に優れたミラーシステムは、将来の商用のレーザ駆動核融合発電所に欠かせないコンポーネントである。

2040年代または2050年代までに商用のレーザ駆動核融合エネルギーを送電網に組み入れるには、レーザ技術の進歩だけでなく、過酷な条件に耐えるための非常に厳しい光学的、機械的、熱的仕様を満たすことのできる高精度な光学部品が必要である。

レーザ駆動核融合技術は現在、カーボンフリー（CO_2を排出しない）のエネルギーを送電網に供給し、願わくば地球を救う手助けとなるために、急ピッチで開発が進められている。商用の核融合発電所の設計はまだ進化途上にあるが、ドイツの科学者とエンジニアは、2035年頃までにおよそ400本のビームラインを備えるものを建設することを目指している。

設計は今後も進化し続けるが、約400本のビームラインを備える商用レーザ駆動核融合発電所には、約7000個の光学部品が必要で、その中には、核融合実験の効率と効果を最適化するために綿密に設計された約3200個の反射ミラー光学系が含まれる。

これらの反射ミラーは、「レーザ核融合発電所内の過酷な条件に耐えるための非常に厳しい光学的、機械的、熱的仕様を満たす必要があり、その要件の組み合わせはまだ完全には達成されていない」と、独フラウンホーファー応用光学・精密機械工学研究所（Fraunhofer Institute of Applied Optics and Precision Engineering：IOF）の機能性表面およびコーティング部門（Functional Surfaces and Coatings Department）の科学コーディネーターで副長を務めるナジャ・フェルデ氏（Nadja Felde）は述べた。



レーザアプリケーション用の高反射ミラーを手にする研究者。この技術はレーザ核融合向けに最適化されている（写真提供：フラウンホーファー IOF）

レーザ駆動核融合用の高精度光学部品を追求するフラウンホーファー IOFの取り組みは、光学とフォトニクスのイノベーションを創出してきた数十年に及ぶ専心的な研究に端を発している。「われわれは堅牢なプロセスチェーンをこの25年の間に構築しており、これによって、平面とフリーフォームの両方の形状を網羅する、500mmからメートル規模の大型光学部品に至るまでの高品質な光学コンポーネントを設計して製造することができる」と、同氏は述べた。

卓越した光学部品の開発は、エネルギー情勢に革新をもたらすと期待されるレーザ駆動核融合技術を前進させるために極めて重要である」と、フェルデ氏は説明した。

核融合用の高精度光学部品の課題に取り組むSHARPコンソーシアム

ドイツのScalable High-power Reflectors for Petawatts（SHARP：ペタワット出力のためのスケーラブルハイパワーリフレクタ）コンソーシアムは、

ドイツ連邦教育研究省（German Federal Ministry of Education and Research）によるプログラム「Fusion 2040: Research on the Way to the Fusion Power Plant」（核融合2040：核融合発電所の実現に向けた研究）を通じて、920万ユーロ（1040万ドル）の核融合助成金を獲得した。ショット社（SCHOTT）、レイヤーテック社（LAYERTEC）、アスフェリコン社（asphericon）、3Dマイクロマック社（3D-Micromac）、オプティックス・ファブ社（optiX fab）、カッティングエッジコーティングス社（Cutting Edge Coatings）、ロベコ社（robeko）、レーザ・ツェントラム・ハノーバ社（Laser Zentrum Hannover）、フラウンホーファーIOF、フラウンホーファーIMWSによって、次のような研究が進められている。大面積ミラーの熱特性の制御による高性能の維持、スーパーポリッシュ（超研磨）加工の曲面大面積光学部品の製造技術の開発、ゼロディフェクト（zero defect：欠陥ゼロ）のクリーニング戦略と基板最適化の実現、熱安定化とアクティブ冷却、革新的な熱管理ソリューションによる光学コーティングの開発。

「光学プロセスチェーンの分野において、科学と産業の両方におけるドイツの主要な利害関係者を団結させる、このような卓越したコンソーシアムに参加するのは、本当に素晴らしいことだ」と、フェルデ氏は述べた。「最も胸躍る側面の1つは、商用のレーザ駆動核融合発電所に向けた最初のステップに貢献することである。変革的な分野の最前線にいるという感覚は爽快で、レーザ駆動核融合技術の可能性の限界を押し広げようという、私やフラウンホーファーIOFの同僚たちの意欲をかき立てる」。

SHARPの全体的な目標の一環として、「フラウンホーファーIOFは、高性能ミラーのための基板製造技術、基板冷却のためのシリケートおよびプラズマ活性化接合技術、新しいコーティング、熱安定性とレーザ耐性を備えたリフレクタの特性評価方法の科学的および技術的基盤を開発している」と、フェルデ氏は述べた。

基板に関しては、「新世代の超研磨表面を作成するために、研削と研磨を組み合わせたプロセスが開発されている」と、同氏は説明した。「われわれは、欠陥ゼロを目標に、基板表面領域内の欠陥を除去する方法と、大面積基板のクリーニングとハンドリングの戦略に取り組んでいる。また、レーザ核融合に適した異なる熱膨張係数を持つ、溶融シリカ、超低膨張（ultralow expansion：ULE）ガラス、Borofloat 33（ボロフロート：ホウケイ酸ガラス）、Zerodur（ゼロデュア：ガラス／セラミック材料）など、さまざまな基板材料を調査している」。

コンソーシアムの最大の焦点は、システム全体の基板側冷却による熱安定化とアクティブコンディショニングである。「われわれは、十分に低い微量元素含有量による、熱的に安定していて熱的に最適化された層設計を行うための新しいアプローチを開発している」と、フェルデ氏は述べた。「熱伝導率を高めるように設計されたコーティングシステムは、従来の誘電体ミラーコーティングに一般的に伴う熱バリアを低下させる可能性があるため、量子化ナノラミネートや金属強化リフレクタのほか、光透過性のダイヤモンドライクカーボン（Diamond-Like Carbon：DLC）などの材料を使用することも検討している」。

SHARPコンソーシアムが目指す進歩は、レーザ駆動核融合だけでなく、高出力レーザアプリケーションやレーザ材料加工など、他の将来市場に対しても可能性を秘めているはずである。「このプロジェクトで得た知識は、宇宙通信や、特に極端紫外線（EUV）リソグラフィ用の次世代の基板やコーティングに対しても、有用である可能性がある」と、同氏は語った。

過酷な条件下での熱安定性

レーザ駆動核融合は極度の熱を伴い、すべての光学部品がそれに耐えられる必要がある。例えば、400本のビームラインが横切るレーザミラーは、極度の負荷に長時間にわたって耐えなければならない。「レーザ駆動核融合炉には高いレーザパルスエネルギーが必要で、平均出力は非常に高くなり、最大100メガワット（MW）に達する可能性がある。これは、光学部品1個あたり最大1MWに相当する」と、フェルデ氏は述べた。

吸収率と熱伝導率が低い場合でも、「著しい温度上昇が生じて、波面の変形、亀裂、アブレーション効果を引き起こす可能性がある」と、同氏は指摘した。「各ビームラインに沿って配置された多数のリフレクタも、熱による変形を増長させる可能性がある。これまでのレーザ光学部品の取り組みでは、レーザ誘起損傷しきい値に主に焦点が当てられていたが、今後の考察は、連続稼働時の熱吸収に左右されることになる」。

つまり、熱伝導率と反射率の高いコンポーネントの開発が、レーザ核融合発電所に向けて非常に重要である。そのためには、プロジェクトのさまざまなアプローチの材料、コーティング技術、構造、設計に関連する熱特性を完全に理解する必要がある。

「基板冷却については、フローサポートレーザアブレーション（FSLA）と、層間接着剤を使用しない接合方法（シリケート接合やプラズマ活性化接合など）によるガラス接合を、レーザ内部処理において利用する」と、フェルデ氏は述べた。「コーティングに関しては、イオンビームスパッタリング／IBS、マグネトロンスパッタリング、原子層堆積法（Atomic Layer Deposition：ALD）といったさまざまな成膜技術を利用して、ナノラミネートやヘテロ構造といったメタマテリアルを探究するつもりだ。これに加えて、メタルハイブリッドミラーの開発と試験によって、熱伝導率の向上を目指す」。

1ギガショットに対して予想される耐用年数は、繰り返し周波数10Hzで約3年で、将来のレーザ駆動核融合発電所の経済効率と生態学的均衡は、プロセスのスケーラビリティに依存する。「これには、約12インチの高出力レーザビームに適した光学系と、レーザ損傷後に交換または再生が必要となるすべての光学部品のサイズが含まれる。生産適性は、95％の歩留まり、最大限の生産効率、最小限のコストで定義される」と、フェルデ氏は付け加えた。

大面積光学部品の製造

大面積光学部品の製造も進行中の課題であり、求められる高い品質を低いコストで実現するのは非常に難しい。「大量の部品を確実に生産できる効率的なプロセスチェーンを開発することが極めて重要だ。レーザ核融合アプリケーションの非常に厳しい要件を満たすには、製造するすべての光学部品の一貫性と精度を確保することが不可欠となる」と、フェルデ氏は述べた。

熱安定性、表面品質、光学性能の問題に対処する必要がある。「サプライチェーン内のさまざまな利害関係者の間の協調を促進することが、知識の共有、プロセスの最適化、イノベーションの推進に不可欠だ。これらの課題を克服することで、スケーラブルで経済的に実行可能なレーザ核融合技術ソリューションに向けた道を開くことができる」と、同氏は補足した。

SHARPプロジェクトに取り組むフラウンホーファーIOFのチーム。複雑な大面積基板の精密制御コーティングに使用されるバッチALDコーターの前で撮影（写真提供：フラウンホーファーIOF）

時間との闘い

コンソーシアムの取り組みの主な適用先はレーザ核融合だが、レーザ駆動核融合発電所に必要な技術は、完全に開発されているとは全く言えない状況にある。

「機能的で経済的な核融合発電所によって送電網に電力を供給できるようになるまでには、まだ時間がかかるだろう」と、フェルデ氏は述べた。「レーザ駆動核融合発電プラントに必要な技術的アプローチとコンポーネントを開発するためのR&D（研究開発）フェーズは、われわれのSHARPプロジェクトを含めて、2030年代前半まで続く見込みだ。2040年までに移管フェーズに入り、それと同時期に最初の発電所が稼働すると予想している」。

ビームラインセグメント内におけるレーザ核融合のシステム全体の利用だけでなく、高出力レーザアプリケーション、レーザ材料加工、EUVリソグラフィ用の次世代基板やコーティングを対象とした、基盤技術の二次的なアプリケーションが開発されている。

光学部品内の熱による影響は、多くの産業アプリケーションにおいて制約要因となっている。「次世代のレーザ通信端末では、連続波（CW）レーザ出力が増加しているため、波面誤差を避けるために効果的な温度管理を検討する必要がある。ディスクレーザの中では、リフレクタは温度上昇につながる恐れがあり、励起出力レベルが高くなるとそれが問題になる」と、フェルデ氏は述べた。

レーザ材料加工における高反射率部品も、かなりの熱負荷にさらされる。EUVリソグラフィでは、吸収レベルや温度勾配が低くても、著しいイメージング誤差が生じる可能性がある。チームは、こうした問題を解決するための代替部品を積極的に開発している。

SHARPが正式に始動した今、フェルデ氏とその同僚らは、技術開発の初期フェーズに没頭している。このフェーズでは、「大面積光学部品に徐々にスケールアップしていく前に、概念の厳格な試験と検証を行う」と同氏は述べた。

LFWJ