

# 光学業界が取り組むゲルマニウム問題

ピーター・フレッチ

潜在的なゲルマニウム供給問題を受け、光学機器メーカーと米国政府は、危機回避に向けて代替材料に注目している。

中国による現行のゲルマニウムやガリウムの輸出規制が、テクノロジー業界全体に大きな波紋を呼んでいる。それはもっともなこととも言える。というのも、一般によく知られているこれらの原材料に、熱光学素子、発光ダイオード(LED)、光ファイバ、赤外線センサー、半導体、ソーラーパネルといった現在の製品すべてが依存しているからだ。

2024年7月時点で、インゴット価格は2023年8月の中国による輸出規制開始以来、38%上昇し、過去最高値を記録している。懸念されている深刻な供給不足はまだ顕在化していないものの、中国が世界の原材料供給を独占している状況下では、潜在的なリスクへの対策が喫緊の重要課題となっている。特に、良好関係がない国からの戦略的材料への過度な依存は避けるべきだ。

## 許容できる代替材料とは

商業用途の大半を占めるシンプルなシステムには、実証済み代替材料が存在する。例えば、消防士のサーマルイメージングカメラ、体温測定用の携帯型カメラ、壁面の漏水を調査するホームインスペクター用カメラなどが挙げられ、定量的ではなく定性的なイメージングを行うシステムである。

一方、防衛用途の領域では、ゲルマニウムのように屈折率4という材料特性が極めて重要となる。硫化亜鉛やセレン化亜鉛などの他の材料は屈折率が2.5前後であり、この差は大きい。こ

れらの材料はいずれも屈折率が低いため、サーマルイメージング用途において実用的な代替材料として注目されることはなかった。

米ライトパス・テクノロジーズ社(LightPath Technologies)は、実用的なソリューションの創出を目指し、数年前に米海軍調査研究所(U.S. Naval Research Laboratory)と協働して、カルコゲナイド系光学材料のポートフォリオに関するライセンスを取得した。これにより、約10年前にライトパス社が初めて開発したカルコゲナイド光学系と比較して、はるかに広範な応用が可能になった。

「パラメータを精密に制御し、独自の特性を有する材料のポートフォリオを体系化できた」と、同社CEOのサム・ルービン氏は述べる。これらの材料は、柔軟性が向上したうえに、マルチスペクトル特性を有しており、580nmから18 $\mu$ mに及ぶスペクトル帯域をカバーする。

この共同開発の成果の1つが「BlackDiamond BDNL-4」材料である。BDNL-4は、防衛用途においてゲルマニウムの有力な代替材料として注目されており、その独自の負の熱光学係数が特に関心を集めている。

マルチスペクトルとは、光学系が中波と長波を同時に複数の分光点で色補正されていることを意味する。「ほこりやもやを見通すには長波の方が優れており、両波長で機能するカメラがあれば、現在主流のシステムのように、



「Black Diamond BDNL4」材質の円板材。(写真提供:ライトパス・テクノロジーズ社)

カメラを2台搭載する必要がなくなる」と、ルービン氏は言う。「中波はサーマルイメージングなので物体からの放射を認識でき、短波は反射イメージングなので物体から反射された光を認識できる。短波は、雲や霧など中波が遮られる状況でも見通すことができ、特に海軍の用途では重要だ」。

海軍調査研究所では、当初の目的はマルチスペクトルイメージングにあったが、ゲルマニウムの必要性を最小限に抑えながら、最終的には光学設計の状況を変える数多くの材料が開発された。

屈折率が低い場合、同じ光学出力で同等の屈折角を実現するには、より厚い材料が必要になり、場合によっては複数のレンズが必要になる。ゲルマニウムの高い屈折率は、競合する代替材料にとって常に制約となってきた。しかし、ライトパス社製「BDL-6」のような新材料は、屈折率が3.2であり、ゲルマニウムの特性値に相当近づいている。

比較対象となるレンズは一般的に柔らかい材質となる傾向があり、そのた

めゲルマニウムのほうが過酷な条件への耐久性に優れている。ただし、例えば、ミサイルが撮影に使用する波長を透過するもので、ミサイルに取り付けられたドームを想像されたい。「この場合、ゲルマニウムであっても100%完全には解決されていない」とルービン氏は述べる。「フロントレンズであれば、当社製ダイヤモンドライクカーボン(DLC)コーティングで解決できる。これは、ダイヤモンドとほぼ同等の硬度を有するからだ」。

### コーティングの課題を克服

カルコゲナイドのコーティングは必ずしも容易ではない。コーティングが付着しにくい材料であるため、新しい配合とアプローチが必要だ。ゲルマニウムで成功した方法でも、カルコゲナイドでは通用しないのだ。実現不可能ではないが、相当な困難が伴う。カルコゲナイドのコーティングには、光学層を適切に付着させるための接着層が必要となる場合もある。

コーティングは常に進化している。「終わりのない物語のようなもので、継続的な取り組みが必要だ」とルービン氏は言う。「新材料を発表する際には、標準的なダイヤモンドライクコーティング方法を複数用意しておき、各種の用途課題に対処できるようにしている」。

### 未解決の課題

第一の課題は、リサイクルへの道の構築だ。リサイクルは、ほとんどの生産材料において重要な役割を果たしている。メーカーがゲルマニウムブランクを購入すると、それをダイヤモンド旋盤で加工し、発生した粉じんやスクラップをすべて回収して、ゲルマニウムインゴットの生産者に再利用材料と



ライトパス・テクノロジーズ社は、ゲルマニウムの代替材料として「BDNL4」の製造を米国防総省から独占的ライセンスを取得している。(写真提供:ライトパス・テクノロジーズ社)

して再販できる。

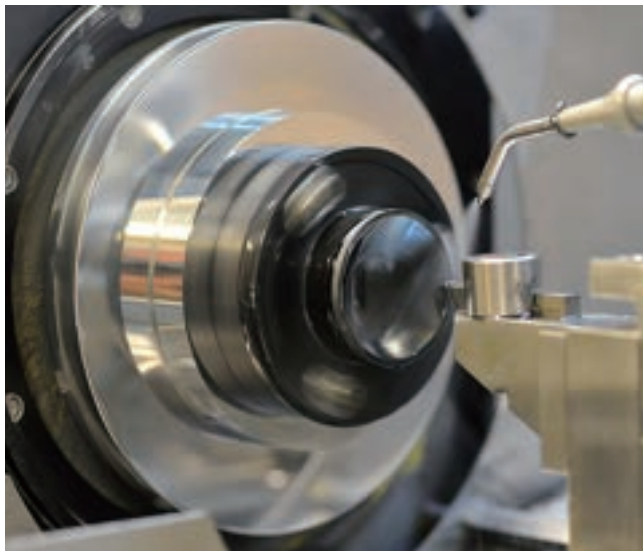
これは今日のカルコゲニドではまだ実現できていないが、カルコゲナイドガラスをリサイクルする技術開発プロジェクトが現在進行中であり、米国防生産法(DPA)のタイトル指定のない産業基盤政策および米国防兵站局(DLA)からの投資を受けている。この問題解決には数年かかるが、最終的にはカルコゲナイドの普及に貢献するだろう。現在、リサイクルは必須ではないが、2~3年後には大量のスクラップが発生し、リサイクルによる規模の経済が恩恵をもたらすだろう。

目標は、ゲルマニウムから完全に移行することではなく、国家的な依存を減らすことだ。「当社製マルチスペクトルカメラ、例えば、Mantisカメラは2~12 $\mu$ mで連続的に動作し、この範囲全体で色補正を行うが、それでも光学系内でゲルマニウム要素を1つは使用する必要がある」と、ルービン氏は述べる。「完全にゲルマニウムを使わないというわけにはいかないため、米国内にゲルマニウムの生産拠点を持つことは重要だ」。

米国防総省(DoD)は、ゲルマニウムの備蓄確保と再生用スクラップの在庫管理を効果的に行ってきたものの、備蓄量には限りがあり、最終的にはスクラップの供給も不足していくと予想される。米国ではゲルマニウムの採掘が行われ、特に精製技術の開発も進められているが、このプロセスは極めて効率が低く、課題が多い。

第二の課題は、安定性の確立だ。ブランク完成品の原材料費は、ゲルマニウムブランクの半額程度で済むものの、ブランクをレンズに加工すると、最終的なレンズのコストはゲルマニウムと同等になる可能性がある。これは、カルコゲナイドの製造体制が成熟していないことが原因だ。

カルコゲナイドブランクを光学部品の完成品に加工する技術が未成熟なこともまた、障壁となっている。光学設計者やエンジニアは、数十年にわたりゲルマニウムを使用してきた実績があり、ゲルマニウムの研磨や取り扱いに精通し、材料特性も熟知している。そのため、未知の材料への移行に慎重にならざるを得ないのが現状である。



ライトパス・テクノロジーズ社のフロリダ州オーランドの施設でのダイヤモンドレンズ旋盤加工の例。(写真提供:ライトパス・テクノロジーズ社)



ライトパス・テクノロジーズ社のオーランド施設でのレンズ検査。(写真提供:ライトパス・テクノロジーズ社)

ライトパス社は国防総省、特にDLAと協働し、カルコゲナイドの製造技術成熟度に関する課題解決に取り組んだ。「歴史的に、カルコゲナイドは製造技術が未成熟なため、ガラスバッチの品質が一定せず、評判が悪かった」と、ルービン氏は言う。「そのため、バッチ間で屈折率が大きく異なるのではないかと懸念されていた」。

第三の課題は、均質性の実証だ。何百もの製造サンプルデータを示すことが目標である。数回の測定からではなく、様々な環境、温度、条件下における多数の製造バッチについて、何百回もの測定データから実証することだ。「DLAと協働する目的は、現実的な代替材料の認可を加速させることだ」と、ルービン氏は述べる。「まだ若干のばらつきは残るものの、現在、非常に安定したデータが得られており、製造技術成熟度レベル(MRL)9という最高レベルの材料製造能力を実証できている。これこそが光学設計者たちの求めているものだ」。

均質性の課題に対処することで、カルコゲナイドの普及への懸念は軽減さ

れるはずだ。20～30年前、カルコゲナイドレンズは、均一性を保証するために少量生産されるケース、あるいは均一性が著しく劣るケースが多々あった。しかし、技術は進化し、結果がそれを証明している。

ライトパス社はまた、米ロチェスター大(University of Rochester)の学術パートナーとも協働し、均質性の検証を行っている。現在、直径5インチの円板材に対する干渉測定では、波長にもよるが、0.0003以内の均質性が確認されている。「DLAには、この代替材料普及を加速させるビジョンと推進力があり、製造技術成熟度を確実にするよう取り組んでいる」と、ルービン氏は言う。「防衛業界には技術成熟度レベル(TRL)や製造技術成熟度レベル(MRL)に関する明確な基準があり、当社はそれに準拠できる」。

生産規模が不足しているのは、完成品としてレンズを加工する段階だ。ルービン氏は、現実的にゲルマニウムから新材料に移行するには、ライトパス社のレンズ製造能力をはるかに超える生産規模が必要だと認識している。同

社の米国内での成型レンズ製造能力は、年間400万個である。

ライトパス社は、新材料の普及を促進するため、すべての材料をコア材料そのものとして提供している。「また、当社はこのような材料をから経済的に事前成形ブランクも製造できる。これは、ガラスを直接ほぼ完成形に成形する独自の技術の特許を取得しているためだ」と、ルービン氏は述べる。「当技術は、製造過程で廃棄物を削減でき、非常にコスト効率の高いものだ」。

## 結論

世界的に、各国は自国の天然資源を、特に戦略的(防衛)用途がある場合には、さらに管理を強化するようになった。「当社も同様の対応が必要だ」とルービン氏は言う。「米国の生産能力が、自給自足に必要なレベルまで十分に高められた状態にしなければならない」。

カルコゲナイドのような材料の実現可能性に取り組むことは、変化をもたらす上で重要な役割を果たすことができる。