

ピコ秒IRレーザーのバーストモードによる リチウムイオン電池箔切断

リチウムイオン電池は、スマートフォンやスマートウォッチといった携帯端末から、電気自動車や家庭用蓄電システムの電池パックにいたるまでの多彩な用途において、蓄電媒体として選択されています。これらを含む様々な市場の拡大に伴って、リチウムイオン電池の需要も高まり続けており、より低コストで高速な製造方法の開発が求められています。

リチウムイオン電池は、負極箔、正極箔、セパレータ、電解液という複数の材料で構成された積層構造となっています。電極箔は金属基板でできており、通常は正極には銅、負極にはアルミニウムが使われていて、それらの金属基板に活物質が塗布されています。負極の活物質は黒鉛である場合が非常に多いですが、正極には、NMC (LiNiMnCoO_2)、LFP (LiFePO_4)、LNMO ($\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$) など、複数の活物質が採用されています。

電極箔は、リールtoリール方式で加工され、シングルパスでできるだけ高速に切断することが一般的に求められます。しかし、切断品質も特に重要な要素です。切断エッジの欠陥は、電極箔間の短絡とそれに続く熱暴走を引き起こし、壊滅的な故障につながる恐れがあるためです。高速かつ高品質な加工が求められる中、最小限の熱影響で様々な材料を加工することのできる超短パルスレーザーが、最適な選択肢ということになります。

ここでは、ピコ秒レーザー「IceFyre® IR50」による電極箔材の加工結果を紹介します。特に重要な点として、TimeShift™バーストモードを使用した切断の速度と品質上のメリットを、従来のシングルパルス加工と比較して示します。

まず、シングルパスの正味の切断速度とコーティングの剥離具合に着目していきます。材料を切断する場合の最大速度（ただし、無視できる量の切れ目は許容）と、金属箔の切断エッジからどれだけの幅で塗布コーティングが剥離したかを表す距離（これは、活物質のアブレーション閾値が金属箔基板よりも低いことに起因）を見ています。

ここでは、厚さ約 $16\mu\text{m}$ のアルミ箔の両面にNMCでコーティングして合計厚さが約 $100\mu\text{m}$ となる正極材を使用して、厚さ約 $11\mu\text{m}$ の銅箔の両面に黒鉛でコーティングして合計厚さが約 $98\mu\text{m}$ となるものを負極材として使用しました。

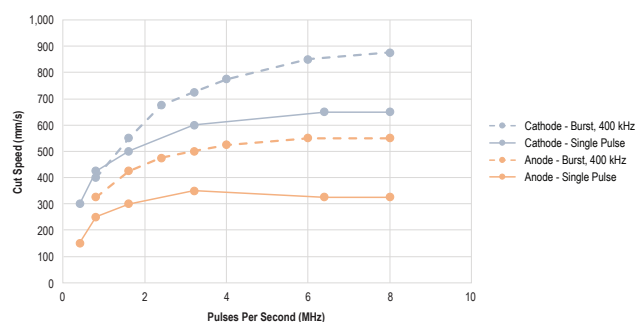


図1. バーストモードとシングルパルスの切断結果の比較。正極箔と負極箔の両方について、正味の切断速度を縦軸、1秒あたりのパルス数を横軸としてデータをプロットした。

電極箔サンプルをシングルパスで加工し、400kHz～8MHz範囲の繰返し周波数におけるシングルパルス加工と、複数のバースト数（バーストのサブパルス数は2～20個）による400kHzでのバーストモード加工の両方のデータを収集しました。結果を比較するために、バーストモードのデータでは、設定された繰返し周波数400kHzにバーストのサブパルス数

を掛け合わせた数値を繰返し周波数として示しています。例えば、10個のサブパルスで構成されるバーストが400kHzで動作する場合、1秒あたりのパルス数は $10 \times 400,000 = 4,000,000$ となるため、これに対応するデータ点は、水平軸（X軸）の4MHzのところにプロットされます。同様に、8MHzのところにプロットされたバーストモードのデータ点は、（400kHzでの）実際のレーザー出力は、 $8,000\text{kHz} / 400\text{kHz} = 20$ で、20個のバーストパルスだったということになります。このデータ表現方法により、シングルパルスとバーストモードの両方を、繰返し周波数を横軸とする同一のグラフ上へ示すことができます。

負極材と正極材の両方について、1秒あたりのパルス数を横軸として、正味の切断速度をプロットしました（図1）。どちらの材料についても、バーストのサブパルス数が多いほど明らかに速度上のメリットは高く、シングルパルスの切断速度を簡単に上回ることが、このグラフから確認できます。バーストモードはシングルパルスと比べて、正味の切断速度が正極の場合で約35%、負極の場合で約57%高くなりました。

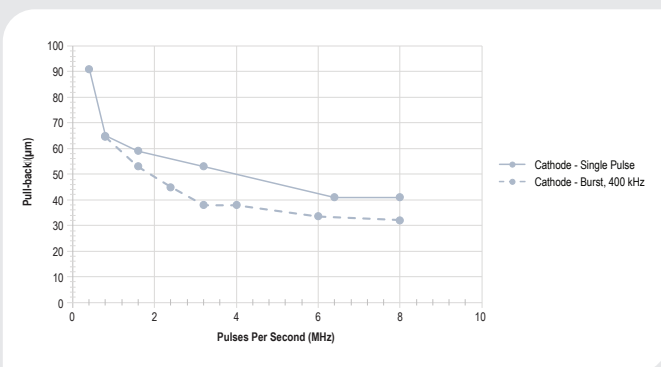


図2. バーストモードとシングルパルスの切断結果の比較。負極箔を対象に、コーティング剥離幅を縦軸、1秒あたりのパルス数を横軸としてデータをプロットした。

活物質コーティングの剥離具合についても、正極材を対象に剥離幅を縦軸、1秒あたりのパルス数を横軸とした類似のグラフを作成しました（図2）。シングルパルスとバーストモードの両方で、1秒あたりのパルス数の増加に伴って剥離幅は減少し、最も低い値で比較すると、バーストモードはシングルパルスよりも約22%剥離幅が小さいことが、このグラフからわかります。

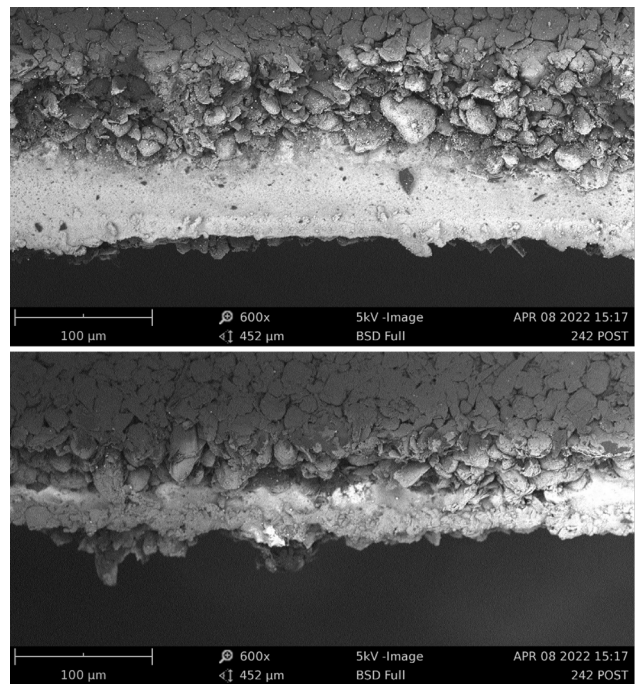


図3. 正極箔の切断エッジのSEM画像。上は、シングルパルスモードによる400 kHzでの加工結果。下は、20パルスのバーストモードによる400 kHzでの加工結果。コーティングが剥がれて金属箔が一部むき出しになっている様子が示されている。金属箔はその層内にとどまっており、バリや汚れは最小限となっている。

目視検査のために、切断面のエッジ品質を示す画像を撮影しました。図3は、正極箔の切断エッジを捉えた2枚のSEM（走査型電子顕微鏡）画像です。どちらも400kHzで加工されたもので、上下の画像はそれぞれ、シングルパルスと20パルスのバーストモードによる切断結果を示しています。どちらの画像にも、金属箔の切断エッジ周辺の活物質コーティングが剥離している様子が示されていますが、最適化されていないシングルパルス加工の方が、剥離幅ははるかに大きくなっています。バーストモードとシングルパルスの両方の場合で、品質は極めて高く、高性能電池セルの長期的信頼性に悪影響を及ぼす恐れのある、熔融やバリ形成などの痕跡はほとんど見当たらないことも、特筆すべき点です。

コーティングされた電極箔に加えて、コーティングされていない銅箔とアルミ箔についても、正味の切断速度を調査しました。バーストモードとシングルパルスの性能を比較したところ(図4)、コーティングされた電極箔の場合と同様に、バーストモードはシングルパルスよりもはるかに性能が高く、切断速度はアルミニウムの場合で約71%、銅の場合で約165%高くなることが示されました。

以上の結果に基づき、バーストモード加工がシングルパルス加工よりも優れており、全体的な品質を高めつつ、より高いスループットを実現することが明らかになりました。TimeShift 技術搭載のピコ秒レーザーIceFyre IR50を使用することで、バーストモードのパラメータを柔軟に調整して、リチウムイオン電池製造で必要となる多彩な切断加工プロセスの最適化を実現することができます。

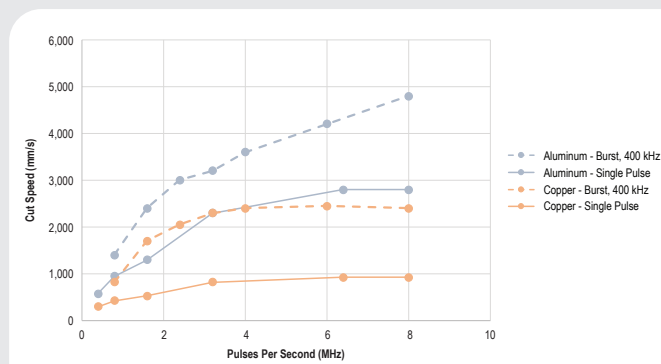


図4. バーストモードとシングルパルスの比較。コーティングなしのアルミ箔と銅箔について、切断速度を縦軸、1秒あたりのパルス数を横軸としてデータをプロットした。

製品

IceFyre® 産業用ピコ秒レーザー

IceFyre UV50は、市場で最も高性能なピコ秒UVレーザーでパルス幅は10psです。バーストモードにおいて数百μJのパルスエネルギー、1.25MHz (>40μJ) で50Wを超えるUV出力を提供します。IceFyre UV50は、その高出力とシングルショットから10MHzまでの繰返し周波数の新しいスタンダードを提供します。IceFyre UV30は、60μJを超えるパルスエネルギー（バーストモードではより大きなパルスエネルギー）で30Wを超えるUV出力を提供し、シングルショットから10MHzまでの優れた性能を提供します。IceFyre IR50は、400kHzシングルパルスで50Wを超えるIR出力を提供し、シングルショットから10MHzまでの優れた性能を提供します。

IceFyreのユニークなデザインは、ファイバーレーザーの柔軟性とSpectra-Physics独自のパワーアンプ機能を利用し、TimeShift ps プログラマブルバーストモード技術を実現しており、業界で最も高い汎用性を実現しています。各レーザーには標準の波形セットが用意されています。オプションのTimeShift ps GUIにより、カスタム波形の作成が可能です。

このレーザーデザインにより、ポリゴンスキャナーを使用している場合などで、既存のピコ秒レーザーの中で最も低いタイミングジッターで真のパルスオンデマンド（POD）および位置同期レーザー出力（PSO）を可能にし、高速走査速度での高品質処理を可能にします。

	IceFyre IR50
波長	1064 nm
出力	>50 W @ 400 kHz
最大パルスエネルギー (TimeShift psを使用した場合、1バースト当たりのパルスエネルギーがより大きくなる)	>200 μJ @ 200 kHz
繰返し周波数範囲	シングルショット - 10MHz
パルス幅 (FWHM)	<15ps (13ps 典型値)
TimeShift ps	搭載
パルスエネルギー安定性	<1.5%, 1 σ
出力安定性 (ウォームアップ後)	<1%, 1 σ, 8時間以上
空間モード	TEM ₀₀ (M ² <1.3)
ビーム径 (D4σ)	3.0 mm ±0.3 mm
ビーム拡がり角 (全角)	<0.75 mrad
偏光	>100:1 (垂直)