

高品質な車載用電池を実現する先端レーザー技術

Advanced laser technology for high quality automotive batteries

千國 達郎*、牛 増強**

*UW-JAPAN (株)

(〒141-0031 東京都品川区西五反田 7 丁目 22 番 17 号 TOC ビル 10F - 36 号)

**UW LASER (深圳市联赢激光股份有限公司)

深圳市南山区桃源街道留仙大道 3370 号南山智园崇文园区 2 号楼 1203

Tatsuro Chikuni*、Zengqiang Niu **

*UW-JAPAN Corporation、**UW LASER Corporation

141-0031, TOC building 10f-36 (22 17), nishigoranda, Shinagawa ward, Tokyo,

E-mail: tchikuni@uw-j.com

車載用には $Cpk > 1.67$ といった厳しい品質と安定性が要求されている。特にリチウム電池 (LIB) においては、スパッタ混入が発火事故の原因となりうることは周知である。UW は原理的にスパッタレスで、溶接欠陥も無くせる独自のハイブリッド技術により、厳しい品質要求をクリアしてきた。この技術に加え、新しく商品化した内製 1KW ブルーレーザーの活用により、車載品質を満足する銅のスパッタレス・ブローホールフリーも実現した。

For automobile, severe quality and stability such as $Cpk > 1.67$ are required. In particular, it is well known in the lithium battery (LIB) that the incorporation of sputter can cause the ignition accident. UW is essentially sputterless and its own hybrid technology, which eliminates welding defects, has made strict quality requirements clear. This technology is based on the new commercially available 1kW blue laser. This paper reports the sputter blister free of copper which satisfies in vehicle quality

Key words: automobile, Cpk, LIB, Hybrid, sputterless, Bluelaser, copper, vehicle quality, Motor, EV

1. 緒言

最新の情報⁽¹⁾によると、EV は中国を筆頭に既に 850 万台販売され、この普及率は日本の車メーカーの予想を遥かに超えた。EV 化計画を 5 年前倒しているメーカーもある。

普及急拡大の理由は、環境問題に対する補助金もあるが、EV の最大コストであった LIB の急激な価格ダウンも大きな要因である。

LIB 電池価格は 2010 年に 1160\$/KWh であったが、2018 年には 176\$/KWh まで低下し、更に 2025 年には 100\$/KWh 以下が予想され、価格面での問題は解消するとされている。更に、充電密度と寿命も大幅に向上し、車メーカーでは今後走行距離 500km を目指せるようになった。

UW は中国のほぼ全ての車載電池メーカーにレーザー装置を提供させて頂いており、価格、性能ばかりでなく、燃えない電池材料の普及と高品質なレーザー組み立て技術の進歩も普及の一因と考えている。

燃えない安心・安全な車載電池を実現した事も、EV の普及に貢献には重要と考え、リーズナブルに安全品質を確保するレーザー技術の要点を紹介する。

2 レーザ溶接の必然性

車載用電池は第 1 に尊い人命を守るために、溶接欠陥の無い極めて高品質・高安定生産が不可欠である。更に全世界的な EV 化の流れにより、コスト競争が益々激化し、単なる設備コストパフォーマンスだけでなく、レーザー組立化による電池自体の部品点数削減も競争力の要になっている。

UW では、世界じゅうの車・電池メーカーからの厳しい要求を真摯に受け、特に、中国にあるほぼ全ての電池メーカー (数年前は約 150 社あったが、現在は高品質電池メーカー約 30 社だけが生き残り) と共に、徹底的に電池製造原価削減に取り組んで来た。

レーザー溶接は母材そのものを活かす工法であり、螺子や O リング、端子等の部品を無くすことができる。部品自体は安価であっても、部品点数が多いと信頼性が低下するばかりでなく、部品装着の為の余分な設備も必要となるため、部品削減は大きな原価力となる。

従来は LIB 材料が電池性能・コスト差別化の要であったが、材料のグローバル供給化と、材料自体の改良の壁も見え始め、材料による差別化は難しくなっ

て来ている。こうした対応策として、UWは電池メーカーと協力して、レーザ組立による電池の部品点数削減とシンプル化も進めている。

3. 車載用品質 Cpk

Cpk とは工程能力を示す数値であり、バラツキ指標 Cp に安定性を追加して、量産品質を更に厳しく数値化したものである。研究分野ではあまり見慣れない言葉であるが、高品質かつ大量産の車載メーカーでは極めて重要な指標である。不良率との関係では、 3σ 管理の不良率 0.27% を $Cpk=1$ とし、 6σ 管理では $Cpk=2$ となる。車載要求は $Cpk \geq 1.67$ であり、不良率に換算すると 0.000057% 以下といった極めて厳しい品質と安定性が要求される。

4. 原理的に不良を発生させない深溶け込みレーザ

電池には高品質・高接合強度・低接合抵抗を満足させるために、原理的に不良を発生させない深い溶け込み工法が不可欠である。キーホール溶接と熱伝導溶接の Hybrid (重畳) が共通の基本原則となる。1言でいうと、キーホールで深く入り込み、熱伝導による予熱でキーホール開口部を広げてスムーズにガス排出し、徐冷で気泡が大気に放出されるまで凝固しないようにしている。

近年レーザ技術の進歩により、この基本原理を応用したダブルコア方式やマルチビーム方式、ワブリングやスイング工法によるスパッタレスレーザが普及しつつある。特にこれまで従来のレーザでは困難であった銅-アルミ等の異種金属や真鍮等も、こうしたレーザにより高品質で溶接できるようになった。

弊社は、お手軽用にガルバノを使わないスイング方式の超小型ハンドトーチも商品化し、図 1 に示すように、弊社 HP 動画にて隙間 0.3mm でも安定した溶接を紹介している。

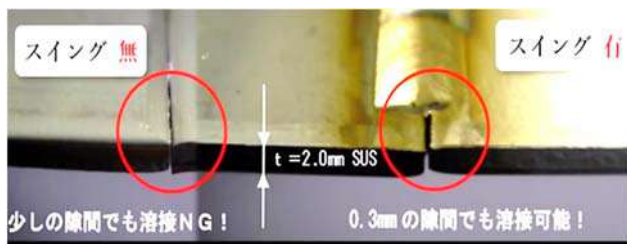


図 1 隙間溶接



図 2 ワブリング・スイング効果

また、図 2 に示す様にワブリングやスイング工法

は用途・目的に合わせて、種々の深さや接合面積を有する溶け込み形状を臨機応変に作れ、酸化も少なく非常に優れた品質が簡単に得られる。弊社の最新開発情報ではスイング方式の更なる改良により、アルミもステンレスも隙間 0.5mm でも安定して簡単に溶接できるようになった。容器シール性も抜群である。溶接速度が遅いので高速生産が要求される LIB 量産には不向きであるが、小ロット電池生産やハンドトーチ用には優れた方式である。

4.1 Hybrid 方式

Hybrid レーザは単なる 2 種のレーザの組み合わせと思われがちであるが、レーザが 2 種になることは制御因子が増えることを意味し、更に Hybrid トーチの条件も加算されるのでレーザ条件が 3 次元的に多くなる。よって、最適レーザ条件出しには、スーパードクター的な知見と技と処方が必要な場合もある。

しかし、制御因子が多い程、従来できなかった事が可能になる確率が急増する。UW では長年における多種多量の経験から最適な Hybrid 条件をシステムに組み込み、素早く最適条件を見つける知能レーザシステムと、工法部隊の多くの経験とノウハウ蓄積によりこれらの課題を解決している。

4.2 Double core 方式

キーホール溶接と熱伝導溶接をダブルコアで発生させる方法で、シンプルにスパッタレスを得ることができるが、コア径比率が固定されているため、最適条件が見つからない場合がある。また、銅では時折大きなスパッタや大きなブローホールを発生することがわかった。この原因について弊社が鋭意研究した結果、原理上ダブルコアはシングルモードが困難であることが根本原因であることがわかった。なお、キーホールサイズとスパッタとブローホールの関係についても、面白い知見を得たので 8 項で報告する。

5. 車載用電池の主なレーザ溶接部

車載用電池は大きく角型、円筒缶型、パウチの 3 種があり、アルミと銅が主な構成金属である。UW はあらゆる電池に対するレーザ設備とソリューションを提供しているが、図 4 では角型と円筒缶 LIB の主なレーザ溶接部を示す。

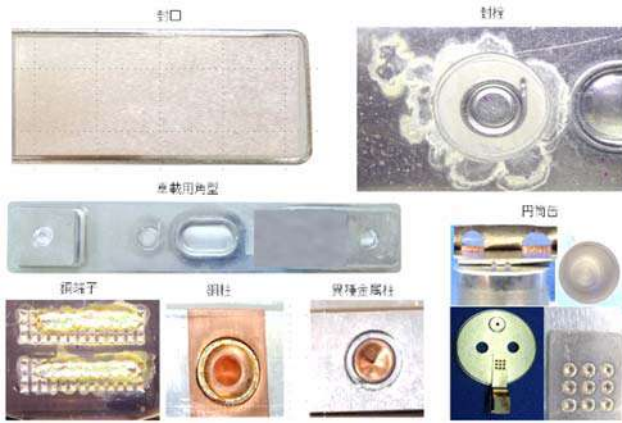


図3 LIBの主なレーザー溶接部

5.1 封口

車載用電池として最も難しく、厳しい溶接品質が要求され、主に下記の課題を解決しなくてはならない。

- ① 内部スパッタ混入フリー
- ② 深溶け込み 0.8mm ブローホールフリー (図4参照)
- ③ 高速 200mm/s 勘合ロバスト溶接

UWではコア径 0.4mmの内製2KwLD レーザとファイバレーザ (FL) の重量により、上記の課題を全て解決している。

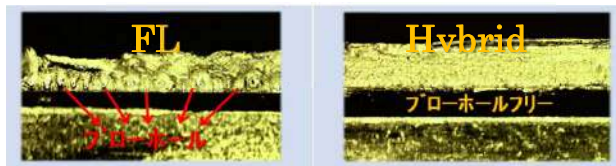


図4 FLとHybrid封口比較

特に、封口においては、③の勘合バラツキによる隙間や段差を、通常のレーザ溶接でカバーするのはとても難しい。外観検査や抜き取り断面検査、ヘリウムリークテスターで検出される1~3%の封口不良は仕方ないとあきらめている電池メーカーもある。しかしUWのHybrid工法は位置ロバスト性が高いので勘合不良も殆ど無くし、電池メーカーの不良ロスコスト削減に貢献している。

走査方法としては、ガルバノは高速動作が可能だが、ノイズや割込みによる瞬停を起し、どこにあるかわからない瞬停部にリークしない限界のキーホール孔が発生する可能性がある。市場に出てから、電池の膨張収縮を繰り返す呼吸疲労等で、液漏れ不良を起し、車が寒冷地で止まると生命に危険を及ぼす。

UWでは原理的に瞬停しないステージ駆動により、こうした不良を未然に防いでいる。またステージは安価でありながら、極めて安定で位置精度が高く、200mm/sと十分な溶接速度を得ているので、地道ながら電池メーカーの設備コスト削減に貢献している。

5.2 封栓

注液完了後に即レーザ溶接して封栓する必要があ

るが、注液の飛沫が溶接面に付着し、溶接不良を発生する問題があった。

一方、図5に示す様に、UWでは古くから100w級ナノ秒レーザ溶接により、パソコン用円筒電池(a)やパウチ(b)の電極接合において、抵抗溶接的の形状のナゲット(c)を実現した。原理的には電池内部にスパッタを発生させない、独自の渦巻状レーザ微小深杭打ち工法(d)を発明し、燃えないLIBの大量生産に貢献してきた。

抵抗溶接は安価であるが、1~3時間毎の溶接棒メンテが大変なばかりでなく、接触面形状変化により品質が大きくばらつく。不良検査に多くの検査人員をかける必要もあり、見逃しもある。実際にはレーザより遥かに生産コストがかかっている。本方式により不良をほぼ0にできたので抜き取り検査でよくなり、電池メーカーの品質・原価力強化に大きく貢献している。

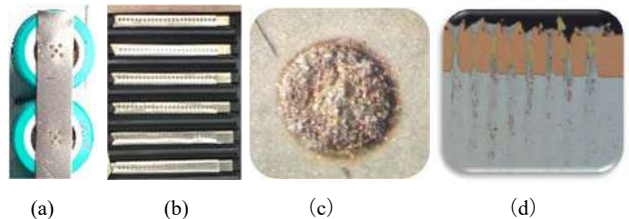


図5 100w級ナノ秒レーザ溶接

このレーザを活用し、図3の封栓写真に示す様に、予め封栓孔周辺の注液飛散部を瞬間的にレーザクリーニングした後、即座にHybrid溶接を行うことで、図6に示す様に、うろこ状ビードや溶接個所がわからない程の鏡面を得ることができ、外観特許を取得した。

なお、鏡面生成については、仮説であるがアルミは熱伝導率が高いので溶融アルミ内に微小な気泡があると、気泡が逃げる間もなく高速凝固するため鏡面とはならない。しかしUWのHybrid工法は、アルミの沸点2470℃と融点660℃の間に上手く制御できるため、溶融アルミ内部を沸騰させず、微小な気泡も発生していないので、完全ブローホールフリーを実現していると思われる。

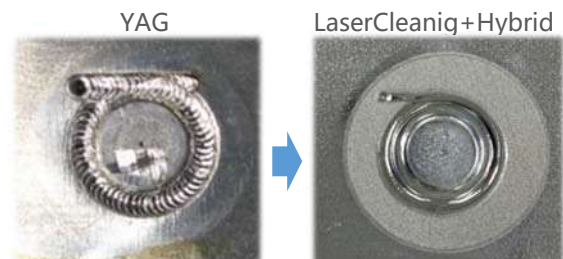


図6 封栓レーザ比較

また封栓では、溶接条件の最適化により、Cpk >

1.67 を遥かに超える数値も得られている。その数値は無数と感じる程の大量生産において、長期に封栓不良0が続いていることを意味する。なお、1.67 を遥かに超える Cpk は多数の知能型UWレーザ設備の検査・品質管理機能による長期ロギングのビックデータにより得られている。

5.3 電柱、電極、バスバー（異種金属接合）

異種金属接合ができると、高価なクラッド材が不要となり電池コスト削減に有効である。銅とアルミの化合物は脆いので、この化合物の連続体がクラックの原因となる。対策としては化合物を攪拌して分散させる必要があり、UWではガルバノ走査を工夫して化合物連続体を形成しない様になっている。図5(d)の銅とアルミ接合において、化合物が分散していることが観察される。

5.4 集電体（超音波+Hybrid）

超音波で 8~10 μ m、数 10 層の集電体を厚い電極に接合後、裏面から Hybrid レーザよりスパッタレスで深いアンカーを打ち、接合強度 UP と電気抵抗を減らしている。この工法は、超音波だけではホーンの摩耗により発生しかねない接合部剥離発生リスクをレーザ溶接で補償しているので、100%剥離しない絶対安心の工法である。（図7）

特に厚さ 3 mm を超える厚い銅電極に有効である



図7 超音波+Hybrid 集電体溶接（裏面）

なお、超音波だけで厚い銅板を接合しようとする、ホーンに大きな負荷がかかる。この超音波+レーザ Hybrid 工法における超音波の主な役割は、厚板と箔の接合に於いて、レーザが苦手とする隙間を埋め密着させることである。よって、熔融銅にする程の強い加圧は不要となるので、ホーンの寿命が桁違いに長くなり、ランニングコストも大きく削減できた。

この事例に代表されるように、UWには各ハードを敵対させるのではなく、長所を引き出し、利点を組み合わせることにより、共に活かす思想がある。

これはUW名の由来である UNITED WINNER（協力して勝利者となる）の基本思想でもある。

6. QCQ（Quick、低 Cost、高 Quality）

電池の生産数は無限と感じる程、超多量であり、更に電池の組み立て不良が僅かでも発生すると、車の

事故や巨大リコールを起こしかねないことから、電池製造設備の選定責任者の責任の重さと不安は測り知れない。UWは電池メーカーのこうした重圧を払拭し、スピーディに量産成功して頂くために、

①Hybrid 等、原理的に不良とならないレーザ工法の基本開発

②量産実績レーザ条件とノウハウを組み込んだ 100 種以上の LIB 標準レーザ設備・機器と全工程を準備

③数 10 種ブースあるUW実証ラボにて、機密保持された各電池メーカー様の構造・材料違いに対する最適レーザ条件の提供

の3つを、UWの強い原価力と豊富な技術蓄積により、リーズナブルに素早く提供をしている。

この提供により、電池メーカーは、数年かかる設備開発や工法開発にパワーを割かれることなく、レーザ経験少ない設計者が量産トラブルで苦しむことも無い。経営資源を本当に必要な電池商品競争力強化の為の、新電池開発、電池構造改良や電池材料改良開発に集中でき、僅か1年で新 LIB の量産を成功させた電池メーカーもある。

また、既に優れたレーザ設備・工法を有するメーカー様に対しては、UW標準レーザ工法設備・機器を安価に調達していただき、改良・アレンジしていただくことで、独自の高度な設備に進化させることができる。

7. 内製 1KW BlueLaser 応用

7.1 BlueLaser 単体応用

LIB 集電体は、現状多くのメーカーで超音波や抵抗溶接がなされているが、これらは加圧部確保のために多くの空間が必要で、電池小型化の大きな壁になっている。BlueLaser は箔集電体の端面を溶接して電極形成ができるので、圧着空間や電極が不要になり電池容量UPと部品点数削減が可能となる。

7.2 Wobbling BlueHybrid

EV 用電池の電極は大電流を流すために、溶接ビードを広くして接合面積を大きくする必要がある。そのため、電極部にはワブリングが良く用いられている。図8に示す様に BlueLaser を Hybrid トーチ内で重畳することで、更に面粗さが小さく、ニッケル鍍金層も均質に拡散された高品質なビードを得ることができた。ブローホールも無く、スパッタも殆ど観測されず、溶接品質が格段に向上した。

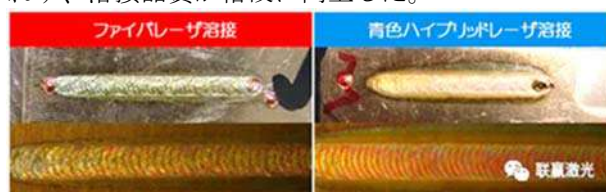


図8 Wobbling BlueHybrid 溶接

7.3 3+1BlueHybrid

3KW シングルモードファイバレーザにより細径深孔キーホールを開け 1KW BlueLaser による予熱と徐冷効果を活用した Hybrid レーザであり、図 9 に示す様に大型銅板の高品質なシールも実現している。



図 9 3+1BlueHybrid 事例

図 10 は高速ビードオンプレート溶接時のファイバレーザとの比較を示す。高速でもボイドの無い深い溶け込みを実現している。

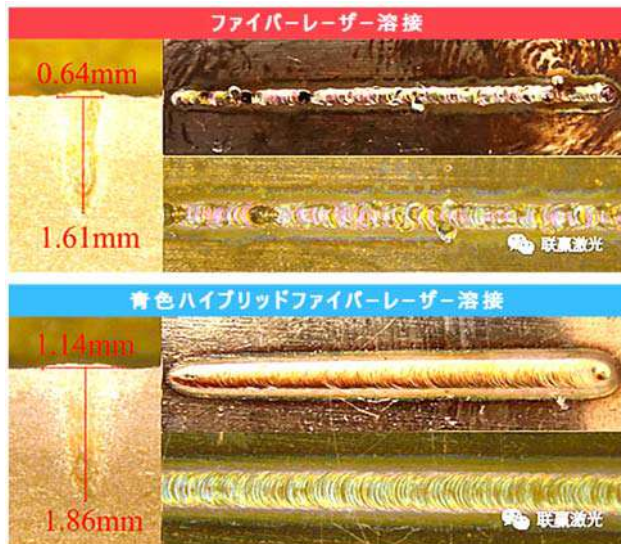


図 10 ファイバレーザ比較

8. EV モータ端子溶接

これまで、銅端子溶接において完全にブローホールを無くせるレーザ工法はなく、通電試験工程で時折発生するボイド爆発による不良ロスがあるため、安全とコスト上、まだメンテが必要な TIG 溶接を余儀なくされているメーカーは多い。

UWは図 11 に示す様に、3+1BlueHybrid レーザにて 3mm 銅角端子に対しても 0.1 秒以下で完全ボイドフリーの高速溶接を実現した。更に被覆部にレーザ光が当たらない様に改良するなど、多くの関連パテントも出願することができた。



図 11 車載モータ銅端子溶接

次にまだ仮説段階であるが、シングルモードとマルチモードのキーホール+BlueLASER Hybrid 比較実験にて、高速度カメラ解析により解明された完全ボイドフリー実現メカニズムを説明する。

定性的には、スパッタとほぼ同サイズのブローホールが発生することが観察されている。銅は反射率が非常に高いが、シングルモードであればミリ秒オーダーで微小なキーホールが発生し、一気に細く深い小径キーホールに成長する。微小なキーホール径はシングルモードスポット径の 20~30 μ m 同等であり、時折、僅かに発生するスパッタも、同程度の煤レベルのものなので問題にならない。小径キーホールの周辺には、高吸収率により高安定な BlueLASER 光吸収発熱と、銅の高速熱伝導放熱との熱バランスにより、融点 1085 $^{\circ}$ C~沸点 2562 $^{\circ}$ C内に上手く制御され、沸騰していない液体銅の状態が保持されている。即ち、沸騰しないため原理的に内部に大きな気泡は発生しない。

マルチモードの IR キーホールと BlueLASER 重畳の場合は、キーホールスポット径が大きいだけの差なので、時折キーホールから発生する僅かなスパッタも少し大きなものとなるが、50 μ m 程度なので許容範囲であった。しかし、IR 重畳の場合では一気に様相が激変する。

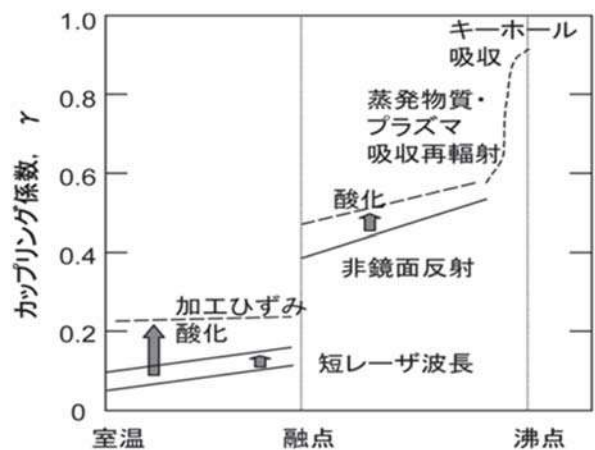


図 12 金属のレーザ吸収温度特性⁽²⁾

図12に示す様に、金属は熔融すると一気に吸収率が増加することが知られている。特に銅の場合、常温ではIRは2%程度の吸収しかないので、マルチモードでは5~6KWもの高いピークにしないとキーホールの発生に時間を要する。また、突然大口径のキーホールが発生し、キーホールを熱源として周辺の熱伝導型照射部も熔融を始めると、一気に約2→20%のIR吸収になるので、5~6KWもの高パワーにより、銅の高速熱伝導放熱が追い付かず一気に沸騰する。

沸騰状態では沸騰水同様に、液体銅内部に気泡が多く発生し、凝固の際に大気中に逃げ遅れた液体銅内部の銅蒸気が、大きなブローホールとして残ることがわかった。

また、液体銅の温度も重要である。銅も湯になれば温水同様に、沸点に近づくとつれ微小な気泡が増加することが高速度カメラで観察されている。3+1BlueHybridは湯温が沸点に近づかない様に湯温を低く制御できるので、微小なボイドも無くすことができた。

なお銅は表面張力が強く、また高速熱伝導放熱のため酸化進行間もなく凝固する。熔融状態で荒れていてブローホールがあっても、熱伝導性の低い鉄とは異なり、レーザー照射後は即時に冷えるので酸化進行の少ない丸く美しい表面状態に変身して凝固することがある。銅溶接は外観に惑わされないように特に注意する必要がある。

一方、3+1BlueHybridでは、IRでは5~6KW必要なパワーを、3~4KWと約2KW減らすことができた。これは銅の沸騰による無駄なエネルギー消費がされていないためであり、沸騰による煤も微小スパッタも殆ど出ないほどである。逆に約2KWもの大きな損失の副作用には注意が必要である。余剰なエネルギーは銅棒をスーパーヒートさせ、銅棒被覆の熱損傷量を多くするばかりでなく、時折大きなスパッタを発生させるような悪さをするなど100害あって1利無い。

なお、弊社HPビデオでは静かに熔融・凝固する状態をご覧いただくことができる。

9. 今後の展開

ファイバレーザーの急激な広がりにより、LIBレーザー生産コストは下がりつつあるが、まだまだEVは高級車指向である。しかし、原価削減と厳しい性能UP要請に真摯に応え続けることにより、今後EVも

普通車同様に手軽に入手できる様になれば、LIBリサイクル蓄電事業も大きく育ち、桁違いの市場が生まれると予想されている。

また今後、例えばドローンタクシーやドローン宅配の実用化、普及については更なるLIBの高密度容量化開発が必要である。UWは車載・電池メーカー様に対しレーザー組立による高密度容量化、原価低減のご提案や、リーズナブルで高品質なレーザー装置・新工法開発を続け、微力ながら世界のCO2削減にも貢献したいと考えている。

10. 結言

中国では「スピードは全てを駆逐する」とされ、遅いと誰からも相手にされなくなるため、日本の3~5倍速いと言われている。活用策として、たとえで恐縮だが、エベレストの頂上を目指すのに、8合目迄ポータを活用し、そこから頂上を目指せば早く到達できる。

我々の知能レーザー設備・機器・工法をポータとして活用して頂き、日本の優れた問題解決能力と高度なアイデアで、各分野におかれる頂上を素早く目指せる様に、陰ながら貢献できれば幸いである。

11. 謝辞

この度、日本初の発表の機会を頂いたことに感謝し、EV普及によるCO2削減貢献のためにも、車載用電池レーザー溶接の要点の一端を紹介させていただきました。中でもBlueLaserの車載応用は始まったばかりであり、UWは広東省から「KW級藍激光応用開発中心(センター)」を任せられ、牽引の責任を負うことになりました。

BlueLaserは今後も阪大を中心に、環境を含めての世界貢献が期待されており、UWも微力ながらそのお手伝いができる様に頑張る所存です。

参考文献

(1) DAIMLER「EV開発最前線」

TOYOTA「100年に一度の大変革に立ち向かう」
リードエグジビションジャパン名古屋技術展セミナー-2020.10.21

(2) 片山聖二 溶接学会誌 vol78-2(2009) P43