

自動車生産の変革： BMW i の生産

目次



1. BMW i の生産コンセプト: ライフドライブ・モジュール	2
2. 新たな時代の幕開け - CFRP を用いた自動車の生産	3
米国モーゼズレイクでの水力発電による炭素繊維製造	3
ヴァカースドルフでの炭素繊維積層板への加工	3
ランツフートおよびライプツィヒでの CFRP 製コンポーネントへの加工	4
CFRP 製ボディの製造における新しい精密プロセス	5
3. 軽量かつ頑丈: 熱可塑性プラスチック製外皮	6
4. ドライブ・モジュール: 基本構造体、高電圧バッテリー、および電気モーターをバイ エルンの工場で製造	7
高電圧バッテリー	7
エレクトリック・ドライブ・システム	8
5. コックピット	9
6. 並行した組立プロセス:	10
車両全体の組み立て	10
7. ライブツィヒでの持続可能な生産	12

1. BMW i の生産コンセプト: ライフドライブ・モジュール



BMW グループは、量産電気自動車の BMW i3 を市場に投入しようとしています。このクルマは、都市部における持続可能なモビリティ(移動手段)の新しい形を表しています。BMW i3 は、初のプレミアム電気自動車として、現代の社会的、環境的、および経済的な課題に対処します。画期的な車両アーキテクチャーを採用したコンセプトは、最新の軽量構造材料と革新的な生産プロセスを必要とします。この分野においても、サステイナビリティは BMW グループにとって極めて大きな役割を果たします。BMW i3 は、サステイナビリティに関する目標を満たし、それに続いてコスト、重量、および品質に関する目標も同じくらい精力的に追求した初めての車両プロジェクトでした。目標の中には生産が環境にもたらす影響をできる限り低く抑えることも含まれ、そのためにエネルギー供給や水の消費量、溶剤の排出、廃棄物処理などの面に焦点を当てています。これは BMW i の生産網に含まれる全拠点が取り組むべき目標です。その中には米ワシントン州のモーゼズレイク(炭素繊維の製造)とヴァカースドルフ(炭素繊維積層板への加工)も含まれます。両工場は BMW グループと SGL グループが設立した合弁企業の SGL Automotive Carbon Fibers (ACF) 社によって運営されています。これらに加えて、BMW グループ内のディングルフィング、ランツフート、およびライプツィヒの各工場があります。

BMW i3 の革新的なアーキテクチャーは、アルミニウム製ドライブ・モジュール(パワートレイン、シャシー、バッテリー、構造的機能、衝突安全機能)、および炭素繊維強化樹脂(CFRP)製ライフ・モジュール(パッセンジャー・セル)という 2 つの要素で構成されます。LifeDrive コンセプトと CFRP の使用により、従来の生産ラインで同等のクルマを作る場合と比べ、生産時間を半分に短縮することができます。従来のプレス施設と塗装施設に必要な高いコストがもはや問題ではなくなり、ライフ・モジュールとドライブ・モジュールを並行して製造する事が可能なため、生産プロセスへの投資額は低く抑えられます。CFRP を BMW i のモジュールに必要な規模で用いることは、世界の自動車産業において他に例がありません。BMW グループはこの分野においても主導的な役割を担います。

2. 新たな時代の幕開け - CFRP を用いた自動車の生産



軽量構造を徹底的に追求することは電気自動車において特に重要です。なぜなら、バッテリー容量に加えて車両重量も航続距離を制限する要素であるからです。クルマが軽くなるほど、航続距離は長くなります。電気コンポーネントによる重量の増加を相殺するために、BMW i の各車には軽量構造技術と革新的な材料が広範囲に採用されています。BMW i3 のライフ・モジュールは、主に炭素繊維強化樹脂(CFRP)で作られています。この革新的材料は合弁企業の SGL Automotive Carbon Fibers (SGL ACF) 社によって製造されています。

米国モーゼズレイクでの水力発電による炭素繊維製造

米国モーゼズレイクにある SGL ACF 社の工場は、ポリアクリロニトリル系熱可塑性樹脂繊維前駆体から炭素繊維を製造しています。複雑な何段階ものプロセスの中で、ガス化によって繊維のさまざまな構成成分が取り除かれます。こうして、安定したグラファイト構造のほぼ純粋な炭素繊維だけが残ります。この繊維の太さは、わずか 7 マイクロメートル(0.007 ミリメートル)です。ちなみに、人間の髪の毛の太さは約 50 マイクロメートルです。これらを自動車に使用できるように、約 5 万本のフィラメントを束ねて「ロービング(粗糸)」または「重トウ」を作り、次の加工に備えてリールに巻き付けます。

モーゼズレイクでの炭素繊維製造に使われるすべてのエネルギーは現地の水力発電による再生可能エネルギーであり、CO2 をまったく排出しません。ワシントン州にあるこの最先端の工場はエネルギー効率の面でも基準を打ち立てています。

モーゼズレイクはこの超軽量ハイテク繊維を 2011 年末から製造しています。あわせて年間 3,000 トンの生産能力を持つ 2 本の生産ラインが必要とされる量を供給します。親会社である BMW グループおよび SGL グループの両社は、これまでに約 7,200 万ユーロ(1 億米ドル)をモーゼズレイクの生産施設に投資し、80 人の新規雇用を生み出しました。

ヴァカースドルフでの炭素繊維積層板への加工

モーゼズレイクで製造されたロービングは合弁企業の第 2 の拠点であるヴァカースドルフ・イノベーション・パークへ送られ、軽量な炭素繊維積層板へと工業的に加工されます。

2,000 万ユーロを投資して約 150 人の新規雇用を生み出したことで、現在のヴァカースドルフ工場では年間数千トンの炭素繊維積層板を製造することができます。

繊維方向がそれぞれ異なる炭素繊維積層板が何枚か重ねて並べられて「スタック」になり、さまざまなラインを経て所定の形状に切り出されます。こうしてできたスタックは、ランツフートとライプツィヒの BMW 工場で CFRP 製のパーツやコンポーネントを製造するための基礎材料となります。廃棄された CFRP はヴァカースドルフでリサイクルされ、再利用に回されます。たとえば BMW i モデルにおいて、現在、BMW i3 に使われている炭素繊維の約 10% がリサイクルされた材料です。

ランツフートおよびライプツィヒでの CFRP 製コンポーネントへの加工

ヴァカースドルフから供給されるスタックは BMW のランツフート工場とライプツィヒ工場にある革新的な生産施設において、BMW i3 および BMW i8 のボディ・コンポーネントに変わります。両工場とも CFRP 製ボディ・コンポーネントを製造する 3 本の生産ラインを備えます。

BMW グループの専門家たちは、ランツフート工場における CFRP 製造プロセスを 10 年以上にわたって着実に改良し自動化してきました。そのおかげで、現在では、高品質な CFRP 製ボディ・コンポーネントを経済的かつ安定的に大量生産することが初めて可能になっています。その一方で、CFRP 製ボディ・コンポーネントの製造コストは、この期間中に約 50% 削減されました。

予備成形された炭素繊維のスタックは加熱することによって安定した立体的形状を与えられます。さらに、これらの予備成形された「ブランク」を組み合わせて、より大きなコンポーネントを作ることもできます。CFRP をこのように用いることで、たとえば、アルミニウムや鋼板では加工が困難であったり、コストが大幅に上昇するような広い面積のボディ・コンポーネントを製造することができます。ブランクを予備成形し、それらを組み合わせる作業に続いて、樹脂注入成形(RTM)法による高圧樹脂注入が行われます。ここでは予備成形されたブランクに液体の樹脂が高圧で注入されます。繊維と樹脂が結合し、次のプロセスで硬化することにより、この材料の傑出した特性の鍵となる高い剛性が得られます。

CFRP のプレス加工は、樹脂と硬化剤が完全に架橋して樹脂が硬化するまで、時間、圧力、および温度が厳密に定められた専用開発のパラメーターに従って行われます。手動の製造プロセスでは、通常、硬化炉での時間のかかる硬化プロセスが必要ですが、この自動化された製造プロセスでは必要ありません。

CFRP の製造プロセスは従来の鋼板製造とはまったく異なります。この工業化された CFRP 製造プロセスは極めて経済的であると同時に、自動車産業向けの大型の CFRP 製複合コンポーネントを初めて実現可能なものにします。

BMW i3 のライフ・モジュールのサイド・フレーム全体のように、小組みされた多くの構造要素からなる複雑なアセンブリーでさえも、高度に自動化された施設において製造されます。その後の加工段階としては、輪郭の精密な切断や、未開口部の開口などの仕上げ作業があります。この作業は専用のウォータージェット切断システムを用いて行われ、続いて接着面にサンドブラストがかけられて次の加工に備えます。もしサイド・フレームに従来の鋼板を用いていた場合、これとは対照的に内外のいくつものコンポーネントを次々に組み立てなくてはならなかつたはずです。

CFRP 製ボディの製造における新しい精密プロセス

CFRP 製複合コンポーネントは、ライツィヒの新しいボディ製造施設において接着剤で接合されます。ここで、ライフ・モジュールの基本構造体が形を現し始めます。CFRP 製の構造では、複雑な形状でも一体化できるため、使用するボディ・コンポーネントの数が従来の鋼板製ボディと比べてわずか 3 分の 1 で済みます。ライフ・モジュールの基本的な CFRP 製の構造は、合計約 150 個の CFRP 製パーツで構成されています。

CFRP 製ボディの製造プロセスでは、ボルト止めやリベット止めの騒音および溶接の火花が発生しません。それらの代わりに 100% 自動化された最新の接着技術のみが用いられます。この BMW が開発した独自の組立プロセスでは、個々のコンポーネント同士の接着面の隙間が正確に定められており、それに従って接合することで強度が最大限に高められます。BMW i3 の接着面の総延長は、1 台あたり 160 メートルにもおよびます。

BMW i3 を量産するには硬化時間を最小限に抑える必要があります。BMW はそのために硬化プロセスを大幅に速めました。接着剤を大きく進化させたことで現在ではコンポーネントに接着剤を塗付してから硬化が始まるまでの作業時間は、わずか 90 秒にすぎません。1 時間半後には完全に硬化し、完全な強度を発揮します。これは従来の接着剤と比べて硬化時間が 10 分の 1 になっていることを示しています。BMW は硬化時間をさらに 10 分以内にまで短縮するために、追加熱処理を開発しました。この中では、接着すべき CFRP 製パーツの特定箇所を加熱することにより硬化プロセスをさらに速めます。

3. 軽量かつ頑丈： 熱可塑性プラスチック製外皮



BMW i3 は、外皮全体が熱可塑性プラスチックで作られた初めての BMW です。唯一の例外はリサイクルされた CFRP 製のルーフです。プラスチック製パーツの重量は鋼板製パーツの約半分です。また、プラスチックは腐食保護効果を発揮し、製造に必要なエネルギーが少なくて済み、しかも軽度の衝撃に耐えることができます。熱可塑性プラスチック製外皮の 25%は、リサイクルされた材料または再生可能な材料を用いて作られます。

BMW i3 の外皮全体は BMW のライプツィヒ工場で製造されます。従来の BMW モデルにおけるフロント・エプロンやリヤ・エプロンと同じく BMW i3 のプラスチック製パーツは、それぞれの箇所に応じて 3 種類の熱可塑性プラスチック射出成型プロセスのいずれかを用いて製造されます。これら 3 種類の技術とは、標準プロセス、外皮と下部構造体が個別に順番に射出成型されてから接着される「ツイン」射出成型プロセス、そして 3 番目として、外皮と下部構造体が並行して射出成型され、ひとつの共通の自動化プロセスの中で張り合わされる「射出成型による接着」プロセスです。

最後の塗装プロセスは、外皮パーツに光沢を与えると同時に飛び石や直射日光などの外界の影響に対する保護効果ももたらします。ライプツィヒの新しい塗装施設では、過剰にスプレーされた塗料を乾式分離するので廃水がまったく発生しません。しかも、エネルギー消費量は従来の塗装施設のわずか 4 分の 1 です。同時に塗装プロセスには、従来のモデルのようなボディ全体の下塗り、塗装、および乾燥を含まないので水の消費量は 70% 削減されています。これに対して BMW i3 では、バンパー、フロント、リヤ、およびサイドのパーツを個別に塗装することが可能で、資源が節約されます。また、従来の電着塗装が省かれることで車両重量が 10kg 軽減されます。ライプツィヒ工場では、BMW i3 のプラスチック製外皮コンポーネントの製造に約 300 人の従業員が従事しています。

4. ドライブ・モジュール: 基本構造体、高電圧バッテリー、および電気モーターをバイエルンの工場で製造



BMW i3 のドライブ・モジュールの基本的な耐荷重構造体は、電着塗装されたアルミニウム製メンバーとアルミニウム鋳造合金で構成されており、BMW のディンゴルフィング工場で製造されます。ボディ・オン・フレーム・デザインは、バッテリーを理想的にパッケージングすることができます。しかも、重量配分が最適化され、重心も非常に低くなるため、ドライビング・ダイナミクスにメリットをもたらします。アルミニウムの使用は、軽量構造のメリットと優れた衝突安全性を両立させ、BMW i モデルの総合的な安全性に寄与します。

BMW i3 のドライブ・モジュールの基本構造体は、約 160 個のパーツで構成される複雑な溶接構造物です。パーツ同士を結合する溶接線の長さは 19 メートル以上におよびます。この構造体は、BMW のランツフート工場の軽合金鋳造技術によって金型鋳造されます。かなりの程度まで機能的に統合され、ほとんどそのまま装着できるように製造されています。ディンゴルフィング工場の完全自動化されたハイテク施設では、BMW i のドライブ・モジュールの基本構造体を製造するために、約 120 人の従業員が雇用されています。ディンゴルフィング工場の従業員は、長年にわたってアルミニウム製のフロント・アクスルとリヤ・アクスルを製造し、生産技術のノウハウとアルミニウム技術に関する豊富な専門知識を蓄積しています。この施設は、それらを生かすように設計されました。

高電圧バッテリー

ディンゴルフィング工場では、さらに重要な BMW i モジュールである高電圧バッテリーが製造されています。生産プロセスは「行頭」テストから始まります。このテストでは、外部から供給されるリチウム・イオン・セルの性能が初めてチェックされます。そして、バッテリー・セルがプラズマ清浄されます。これに続き、20 台以上のロボットを含む完全自動プロセスによって個々のセルがモジュールに固定され、接着、溶接されます。

バッテリーの特殊なパッケージングと組み立てには BMW の豊富な専門知識が注がれています。組立プロセスは全部で 400 の作業から構成されます。バッテリー筐体は、リチウム・イオン・セルを保護すると同時に、車両全体の剛性を向上させます。バッテリー・セルがモジュールに組み込まれると組立プロセスが始まります。モジュールがひとつずつ持ち上げられてアルミニウム製のトレイに乗せられ、通信ケーブル・ハーネスを用いて手作業で配線されます。最後に、バッテリーの上面と下面にカバーが装着され、完成したバッテリーは最終テストに臨みます。

バッテリーは、修理の際に個々のバッテリー・モジュールを簡単に交換できるように設計されています。

BMW i モデル向けの高電圧バッテリーを生産するために、敷地面積 2,000 平方メートル以上のまったく新しい高度に自動化されたハイテク生産施設が、ディングルフィング工場内に建設されました。同時に、このラインは、3、5、および 7 シリーズのハイブリッド・モデル向けの高電圧バッテリーも生産しています。ここでは約 100 人の熟練した従業員が働き、生産システムのパーツ投入、管理、および監視を行い、品質管理業務を実施しています。これらの従業員は高電圧バッテリーを取り扱うための専用のトレーニングを受けています。

エレクトリック・ドライブ・システム

BMWにおいて、パワートレインのデザインは常に最も重視すべき差別化要因です。それゆえ BMW グループは、BMW i3 の出力 125kW の電気モーターとドライブ・エレクトロニクスを、ランツフート工場において自社開発することに決めました。モーター内部のコンポーネントは内部ハウジング、ステーター、およびローターで構成されます。モーター内部のコアを形成するステーターは長さ約 2km の銅線を巻いて作られます。同等出力クラスの他の電気モーターとは異なり、BMW i3 のモーターは銅線の巻き方を工夫することで非常にコンパクトにまとめられており、重量と容積が低減されています。ローターは樹脂を薄く塗られてから内部ハウジングに装着されます。これで、ステーター、ローター、および内部ハウジングの組み合わせが行われますが、それに先立ち、内部ハウジングが約 150°C の温度で加熱されます。



5. コックピット

BMWのランツフート工場はBMW i3のダッシュボードも製造しています。最初の工程は、プラスチック・フィルムを加熱して立体的な構造にすることです。次の背面発泡成形では、まずダミーのシリコン・スキンを使用し、それを取り外してからプラスチックまたはレザーの表面トリム材料に置き換えます。この極めて経済的なソリューションには、ひとつのモデル・シリーズについて数種類のダッシュボード(ベーシック・モデルおよびオプション装備)を同一のツールで製造できるというメリットがあります。

BMWグループがダッシュボードの製造に用いているフライス盤は、世界でも例のないものです。ダッシュボードとトリム・パーツの製造部門は、すでにこの機械の特許を出願しています。「ほこりの出ない」フライス加工の間、切りくずとほこりの粒子は、機械に組み込まれた排出ユニットによってただちに取り除かれます。これにより空気と機械の汚れが98%も低減されます。排出された余分な材料はリサイクルされて製造プロセスに戻されます。



6. 並行した組立プロセス：

ボディとフレームが一体化した車両とは異なり、BMW i3 は水平に分割された 2 つの個別のモジュールで構成される LifeDrive アーキテクチャーを採用しています。その結果、ライプツィヒの組立施設には BMW 史上初めて 2 本の並行生産ラインが設けられており、1 本はライフ・モジュール用、もう 1 本はドライブ・モジュール用です。これにより、作業場の人間工学に関して大きなメリットがもたらされ、あらゆる組立作業においてアクセスが最適化されています。

ライプツィヒでは、ドライブ・モジュールの組み立ての中でアルミニウム製シャシーにバッテリーとモーター／トランスミッション・ユニットが取り付けられます。まず最初に重量 230kg の高電圧バッテリーがフロアパンに装着され、ドライブ・モジュールの基本構造体にボルトで固定されます。高電圧バッテリーをアルミニウム製シャシーのフロアと一体化したことで、重量配分が最適化され、優れたドライビング・ダイナミクスも実現します。続いてランツフート工場から供給されるモーター／トランスミッション・ユニットがドライブ・モジュールに装着され、同じくボルトで固定されます。また、航続距離を 300km(約 185 マイル)まで延長するレンジ・エクステンダー(2 気筒ガソリン・エンジン)が、オプションとして用意されています。ディンゴルフィングで小組みされたフロント・アクスル・サブフレームと、それ以外の構造部材が装着されると、BMW i3 のドライブ・モジュールを最終組み立て段階へ送り出す準備が整います。

車両全体の組み立て

これと並行して、CFRP 製パッセンジャー・セルがボディ製造施設から組立施設へと送られます。組立施設は「ライフ」・ラインと呼ばれ、顧客固有の装備が取り付けられます。これがアルミニウム製ドライブ・モジュールと結合される前の最終段階です。「結婚」と呼ばれるこの結合作業では、CFRP 製パッセンジャー・セルとアルミニウム製シャシーが接着されます。さらに 2 つのユニットは 4 箇所でボルトで固定されます。こうすることで剛性と強度が最適化されます。

2 台のロボットによってドライブ・モジュールに接着剤が塗付された後、ドライブ・モジュールは「結婚」の行われる場所へ運ばれ、持ち上げられて中央に置かれます。次に、ロボット・グリッパーがライフ・モジュールをドライブ・モジュールの上に下ろし、ボディ自体の重量によって結合プロセスが開始されます。

この段階になって初めて、BMW i3 にプラスチック製の外皮が装着されます。多数に分割されたこの塗装済みの外皮は、主に射出成型された熱可塑性プラスチックで構成されます。

ボディ製造施設と組立ラインでの所要時間は合計 20 時間で、従来の生産プロセスに要する時間のわずか半分です。これに寄与しているのが、並行組立プロセス、および従来よりも少ないパーツで構成される CFRP 製の構造です。

続いて BMW i3 は、ライプツィヒ工場で作られる他の BMW 車と一緒に仕上げ施設へ送られます。ここでは包括的な品質管理が行われ、BMW グループ初の量産電気自動車がグループの他の製品とまったく同等の高い品質基準を満たしていることが確認されます。それと同時に、価値ある相乗効果を利用することもできます。

ライプツィヒ工場には BMW i の生産のために総額 4 億ユーロが投資され、800 人の新規雇用が生み出されました。



7. ライプツィヒでの持続可能な生産

BMW i の生産は新たな基準を打ち立てると同時に、エネルギーと水の消費量を、すでに高い効率を誇る BMW グループの現在の平均値と比べて、それぞれ 50% と 70% 削減することになるでしょう。ライプツィヒ工場において、BMW i モデルの生産に使われる追加の電力は敷地内に設置された 4 基の風力発電機によってまかなわれます。

米国グリーンビルディング協議会 (US Green Building Council) は、ライプツィヒの新しい建物に対して、持続可能な設計であることを示す「LEED ゴールド認証」(Leadership in Energy and Environmental Design = エネルギーと環境設計におけるリーダーシップ) を与えました。

生産施設のエネルギー消費量を持続的に削減するために、さまざまな手段が講じられています。インテリジェントに制御されるベンチレーション・システムは、天井の上面と側面の天窓を通じて施設内の空気を 1 日に何回も完全に入れ替えます。自然換気により、ボディ製造施設と組立施設内の匂いやほこりが減少します。また、プレス機から生じる熱を弱めるため、必要に応じてプレス施設も自然換気によって冷却されます。ベンチレーション・システム全体は、追加のファンやエア・コンディショナーを必要としません。さらに、天井の細長い天窓に張られた白いプラスチック・フィルムは、日光を反射し、人工照明の必要性を減らします。ライプツィヒの新しい建物は、このように環境持続可能性に関する自動車産業に新たな基準を打ち立てます。