【付録】テスラ「Cybercab」量産ラインにおける「アンボックスド・プロセス」とOptimus統合・究極の車両側DFA生産技術解剖

テスラ（Tesla, Inc.）が米国テキサス州オースティン工場（Giga Texas）で量産立ち上げを推進している完全自動運転（SAE Level 4）専用2シーター車両「Cybercab（サイバーキャブ）」は、塗装済みホワイトボディ（閉じた箱）を直列コンベヤ上で順次艤装する従来の自動車製造方式を廃し、車両を複数の独立モジュールに分割して並列組付けした後に最終工程で一括結合する「アンボックスド・プロセス（Unboxed Process）」を初めて本格実装した量産車である[1]。2026年11月時点の一次公開資料によれば、Cybercabは2026年2月の初号機ラインオフおよび同年4月の量産開始を経て、同年9月3日にオースティン市内での有償ロボタクシー営業運行を開始した[6]。2026年第3四半期決算報告書（同年10月21日発表）ではGiga Texasにおける設備年産能力が「125,000台超（稼働ステータス：Production）」と公式記載され、同年11月中旬には一般顧客向けの初期受注（車両価格29,990米ドル、2026年12月納車開始予定）へと移行している[7]。

アンボックスド・プロセスの本質は、単なるコンベヤの分割や無人搬送車（AGV／AMR）の導入ではなく、「なぜ塗装ラインが必要なのか」「なぜ狭いドア開口部から車内に潜り込んで柔軟なワイヤーハーネスや油圧配管を引き回すのか」という生産技術上の制約条件を、車両設計（DFA：Design for Assembly）側から根絶した点にある[5]。ステアリングとペダルの完全廃止、反応射出成形（RIM）着色ポリウレタン外板による塗装工場の全廃、油圧配管を断つ完全ドライ・ブレーキ・バイ・ワイヤ（EMB）、48V＋Etherloopによる配線削減、および床下ワイヤレス受電パッドによる充電ポート廃止が一体となることで、最終組立ラインをわずか約25ステーション（フレーミング工程自動化率100%・全体自動化率約78%）へ圧縮する生産体系が成立した[4]。

他方で、テスラが目標に掲げる「タクトタイム5〜10秒級」や二足歩行ヒューマノイド「Optimus」の工場投入に関しては、公開事実と工学的限界を厳密に切り分ける必要がある[14]。2026年11月時点でCybercabラインの定常サイクルタイム秒数は公式非公開であり、製造速度が外部のフリート配備・規制認可ペースを上回っているため毎日稼働させない間欠運転（バースト検証）にとどまっている[5]。また、オープン空間化された主ラインの組付け・合装を担う主役は高剛性な固定式多関節ロボットであり、Optimusの実稼働は4680電池セルの仕分けや部品キッティング等の周辺物流・非定型作業に限られる[5]。本報告書では、公式IR・国際特許公報（WO2024182432A1等）・行政提出文書・製造技術報道に基づく「一次確定事実（および報道出典の明示）」と、機械工学・生産システム工学に基づく「定量試算・工学的推論」の境界を明確に区分し、日本の製造業5層ステークホルダーに向けた実務指針を提示する[3]。

エグゼクティブ・サマリー

本調査報告書の核心となる技術的結論は以下の5点に総括される。

1. 「閉じた箱への潜り込み艤装」の廃止と工場床面積**40〜50%**削減（確定事実・製造報道）：従来の自動車製造が「プレス→ホワイトボディ溶接→全車体塗装→150〜250工程の直列最終組立」を経るのに対し、アンボックスド・プロセスは車体をフロント・リア・センター（構造用バッテリー兼フロア）・左右サイド・外板の独立モジュールに分割し、並列サブラインでオープン空間

から内装・電装・熱管理系を組付けた後に最終合装する[2]。着色ポリウレタンRIM成形外板の採用により数億米ドル規模の塗装工場を完全撤廃した結果、テスラの製造公開映像およびラース・モラヴィ（Lars Moravy）車両担当副社長の解説によれば、車両あたりの製造床面積は約40〜50%削減され、最終組立ラインはModel Y比で1/5〜1/10となる約25自動ステーションへ短縮された[5]。

2. 生産コスト半減目標の現在地と部品点数**50%**削減（決算確定事実・業界試算）：テスラが掲げてきた次世代車の「生産コスト半減目標」に対し、Cybercabはテスラ従来車比で総部品点数**50%**削減を達成し（2026年第3四半期決算説明会でのモラヴィ副社長証言）、労務費約30%削減（業界試算）および塗装設備投資の消去とあわせて大幅な固定費・変動費圧縮を実現した[5]。その結果、2026年11月の初期市販価格は29,990米ドルに設定された一方、ロボタクシー事業としての有償1マイルあたり30セントの運行コスト目標については「道筋は見えたが未到達（path seen, not achieved）」の段階にある[8]。
3. 「タクトタイム**5〜10**秒級」の数理構造と真のボトルネック（確定事実＋定量試算）：業界報道によればテスラはCybercabラインの近未来実用目標を「10秒未満／台」、長期理論目標を「5秒／台」と設定しているが、2026年11月時点の実稼働タクト秒数は公式非公開である[5]。生産技術的検算によれば、最終ラインの10秒タクトはロボット単体の極限高速化ではなく、Giga Press鋳造（約85秒）やRIM成形（約120秒）、合装締結（約50秒）、EOL検査（約90秒）といった物理的律速工程をサブライン側で5〜14並列（5秒タクト時は10〜28並列）に分岐・バッファ分離することで数理的に成立する[20]。現在の生産制約は工場内設備ではなく、4680電池セル供給の配分および都市別の運行認可・充電デポ整備という工場外要因にある[7]。
4. モジュール分割を成立させた車両側**DFA**と合装品質リスク（特許確定事実＋工学的推論）：車体を分割生産して最後に1回で結合するため、Cybercabはステアリング・ペダル廃止に加え、油圧配管を全廃する完全ドライEMB、総配線を大幅に削減する48V＋Etherloopと電池内ワイヤレスBMS、および床下25 kW誘導式ワイヤレス受電システム（公称効率90%超）を同時実装した[5]。公開特許WO2024182432A1が示す車外視線（Line-of-Sight）からの段付きフランジ千鳥ボルト締結とウレタン構造接着シールによりサブミリ公差（RSS試算値で+/-0.41 mm）は制御可能とみられるが、異種材料間の熱膨張差や50万マイル耐久目標下でのきしみ音（NVH）、重度衝突時の骨格リペア性には構造的課題が残る[3]。
5. アンボックスド工場における**Optimus**の限定的な立ち位置（決算確定事実）：オープン空間化されたサブラインおよびフレーミング局（自動化率100%）では、高剛性・高トルク耐性・高精度を持つ固定式多関節ロボットが圧倒的優位性を持つ[5]。OptimusはFremont工場で量産ライン（年産100万台規模構想）の初期立ち上げ段階にあるものの、AI5チップ統合は2027年4月頃、社外企業への出荷は2027年末頃と見込まれており、工場内での確認済み実務は4680セルの仕分けや部品キッティング等の周辺工程にとどまる[7]。テスラの本質的脅威は「人型ロボットによる組立代替」ではなく、「人型ロボットすら不要になるほど車両構造を単純化したDFA設計力」にある。

第**1**章：なぜヘンリー・フォード以来**110**年の「直列ベルトコンベヤ」を解体するのか（アンボックスド・プロセスの工程解剖）

1.1 従来型最終組立（艤装ライン）の物理的ボトルネック

1913年にヘンリー・フォードがハイランドパーク工場で移動組立ラインを確立して以来110年以上にわ

たり、自動車工場の主要4工程（プレス、車体溶接、塗装、最終組立／艤装）の基本順序は不変であった。プレスと車体溶接（Body-in-White：BIW）の自動化率が90%以上に達した今日においても、最終組立（General Assembly：GA）工程の自動化率が業界平均で低迷し続けてきた根本原因は、「先に6面体の箱を閉じて塗装してから、後で中身を詰め込む」という工程順序の幾何学的矛盾にある[3]。従来方式では、車体骨格をスポット溶接して閉じた箱を形成し、電着塗装・中塗り・上塗り・クリア塗装と160〜180 degCの乾燥炉を通過させた後、いったんドアを外した「塗装済みの閉じた箱」を全長1 km超・150〜250ステーションの直列コンベヤに流す[3]。この方式には以下3つの物理的・数理的ボトルネックが存在する（以下、生産技術的定量試算を含む）。

第一に、空間アクセス制約と作業密度（**Work Density**）の物理的上限である。全長約4.6〜4.8 m、全幅約1.85〜1.95 mの一般的な乗用車に対し、閉じた車室内部へアクセスできる経路は左右のドア開口部（有効開口寸法は概ね0.85 m x 1.10 m程度）および前後ガラス開口部に限られる。しかも外板はすでにAクラス塗装が完了しているため、治具やロボットアームのわずかな擦過も許されない。その結果、1ステーション（コンベヤピッチ約5.5〜6.5 m）あたり同時に車室内部へ進入できる作業員は最大2〜4名、長尺リーチ型6軸多関節ロボットでも干渉回避制約から2〜3台が上限となる。上方（-Z方向）や床下（+Z方向）からの直線組付けがルーフとフロアパンに阻まれるため、インパネやシートの投入には巨大な片持ち（カンチレバー）アシスト装置と複雑な姿勢変更軌道を強いられ、サイクル短縮が頭打ちとなる。

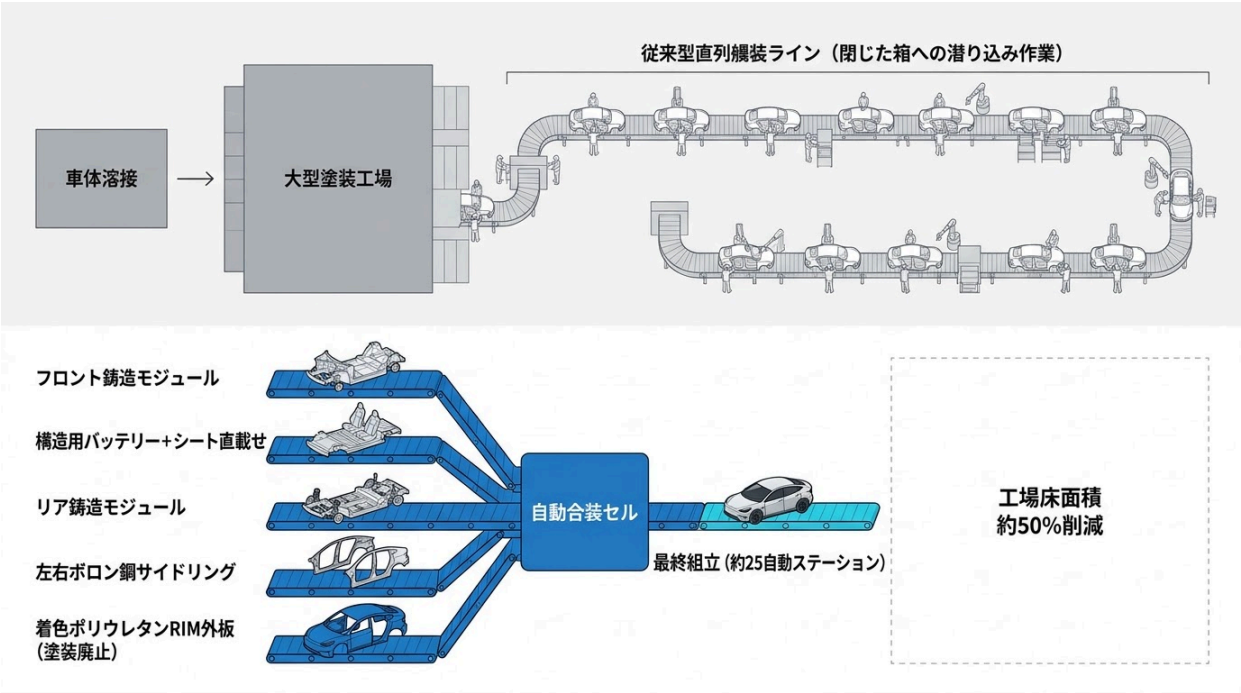
第二に、非剛体・長尺ワイヤーハーネスによる自動化の壁である。従来の12V電源・中央集中型E/Eアーキテクチャでは、中央ジャンクションボックスやボディ制御モジュールから車両各端へ向けて長さ10〜15フィート（約3.0〜4.5 m）に及ぶ柔軟な幹線ワイヤーハーネスを引き回す必要がある[11]。曲げ剛性EIが極めて低く無限の変形自由度を持つ柔軟束線を、塗装済みピラー内部やバルクヘッド穴へ挿通・クリップ固定する作業は、視覚・触覚を駆使する人間作業員に依存せざるを得ず、剛体把持を基本とする産業用ロボットにとって最大の障壁であり続けた。

第三に、長大な直列コンベヤにおける設備総合効率（**OEE**）の乗算的劣化と搬送エネルギーのムダである[3]。バッファを持たない直列同期コンベヤにおいて、各ステーションの独立稼働率をr_s、直列ステーション数をNと置くと、ライン全体の理論連結稼働率A_serialはA_serial = (r_s) ^ Nで表される。仮に1ステーションあたりの稼働率がr_s = 0.9985（停止率わずか0.15%）であっても、N = 200工程の直列ラインではA_serial = 0.9985 ^ 200 = 0.7407（74.1%）まで稼働率が低下する[21]。対して、上流を並列バッファ付きサブラインへ分離し、最終合流ラインをCybercabのようにN = 25工程へ圧縮した場合、同一の単体信頼度でも直列部稼働率はA_unboxed = 0.9985 ^ 25 = 0.9632（96.3%）へと劇的に改善する[5]。さらにテスラの国際特許公報WO2024182432A1が指摘する通り、従来ラインは数百グラムのヘッドランプや小型部品を取り付けるためだけに、車体全体の巨大な質量と占有面積を何百メートルも搬送し続ける非効率を内包していた[3]。

1.2 6分割モジュール並列生産と「塗装工場全廃（RIM着色外板）」フロー

テスラは2024年2月27日にモジュール組立アーキテクチャの国際特許（WIPO公開番号WO2024182432A1、出願番号PCT/US2024/017537、発明の名称："Modular vehicle architecture for assembling vehicles"）を出願し、2026年4月よりGiga TexasのCybercab量産ラインで実稼働させた[1]。（※注：一部で例示されるUS20230311994A1等の番号に対し、テスラ名義でアンボックスド6面モジュール組立の全容を規定している検証済み一次公開特許公報はWO2024182432A1である[3]。）同特許によれば、従来の閉じた箱（6面体フレーム：前面・後面・上面・底面・左側面・右側面）は組付け完了まで閉じられず、並列サブラインで個別に艤装・塗装（または着色成形）・検査された後に

最終フレーミング局で一括結合される[2]。



特許WO2024182432A1および2026年9月～11月に公開されたGiga Texasの製造映像・モラヴィ副社長の証言・分解調査報道を総合すると、Cybercabの並列生産と一括合装は以下の4段階で構成されている[2]。

1. フロント・リアのメガキャスティング（**Giga Press**一体鋳造）サブライン：Cybercabのフロントアンダーボディ（特許内FUB：符号516）およびリアアンダーボディ（RUB：符号514、大型下部ギガキャストと上部C字型鋳造フレームで構成）は、Giga Texasの大型高圧ダイカスト機（Giga Press）で一体鋳造される[3]。冶金面では熱処理不要（Heat-treatment-free）かつ経年酸化による強度低下を起こさない非酸化性アルミ合金を採用しており、モラヴィ副社長の説明によればアルミ鋳造骨格に対する電着塗装・防錆コーティング工程を完全に省略している[5]。開放されたフロント鋳造骨格には、単体1分未満で自動組付けされるフロントドライブユニット（EPA認証書類記載出力219 hp、減速比11:1）、サーマルシステム（熱管理バー）、ステア・バイ・ワイヤ機構、コックピット／空調モジュールが上方・側方から搭載され、単体機能試験まで完了する[3]。
2. 構造用バッテリーパック上へのシート・フロア内装のオープン直接搭載サブライン：車両底面（符号518）を構成するバッテリーパックは、テスラの構造用パックとして初めて鋼製エンクロージャ（Steel Enclosure）を採用した88S6P構成（NC05ドライカソード世代の4680セル計528本、EPA推定容量約48 kWh）である[5]。分解調査報道によれば、従来のModel Y構造用パックが社内保守性評価で「D」（Cybertruckが「Bマイナス」）とされていたのに対し、Cybercabではモジュール単位の個別ポッティング封止により不良モジュールの単独交換を可能とし、社内評価「Aマイナス」を獲得した[5]。この平坦なバッテリー兼フロア上面には、ルーフもサイドピラーも存在しない完全オープン空間（上方-Z方向および全周360度アクセス）で、2脚のシート、センターコンソール、カーペットがロボットにより垂直降下・直接締結される[2]。
3. 左右ボロン鋼サイドリングと「塗装工場を消滅させたポリウレタン**RIM**外板」サブライン：左右サ

イドモジュール（符号308/310）はホットスタンプ成形されたボロン鋼（**Boron-steel**）製ドアリングを骨格とし、車両構造体の中で唯一このサイドモジュールのみが防錆ディップコーティングを受ける[3]。Bピラー外装アプライケにはカメラ、外部マイク、ドア開閉ボタン、緊急時電源遮断（First Responder Loop）切断経路が統合される[4]。さらに外装パネルにおいて、モラヴィ副社長は「なぜ塗装が必要なのかという要件自体を疑え」という第一原理から、数億米ドルの設備投資と100万工数を要する従来の塗装工場（**Paint Shop**）を**Cybercab**ラインから完全削除したと明言した[5]。外板パネルはプラスチック成形ショップでの反応射出成形（RIM：Reaction Injection Molding）で製造され、金型注入直前のミキシングヘッド内でポリウレタン樹脂に顔料を直接混合して射出する[5]。これにより数時間を要した塗装・乾燥サイクルが「数分」に短縮され、VOC排出やオレンジピール（ゆず肌）・色滲みが根絶された上、ロボットがバリを自動トリミングするだけでAクラス表面品質の着色パネルが完成する[5]。

4. **3**次元空間合装（**Marriage**）の**1**回完結シーケンスと短尺**25**ステーション：個別検査を終えた各モジュールは、自動化率100%のフレーミング（Marriage）ステーションへ集結する[5]。特許WO2024182432A1（図4・図12A～13）に示された結合シーケンスでは、中央のセンター／バッテリーフロア（符号404）に対し、前後垂直面（X-Z平面）に沿ってフロントモジュール（符号402）とリアモジュール（符号406）が前後から結合し、続いて横断面（Y-Z平面）に沿って左右サイドモジュール（符号408/410）が外側から内側へ移動して箱型骨格を形成する[3]。その後、ルーフ、RIM外板フェイシア、バタフライドア、ホイールの装着がわずか約**25**ステーションの自動最終組立ラインで完了する[3]。

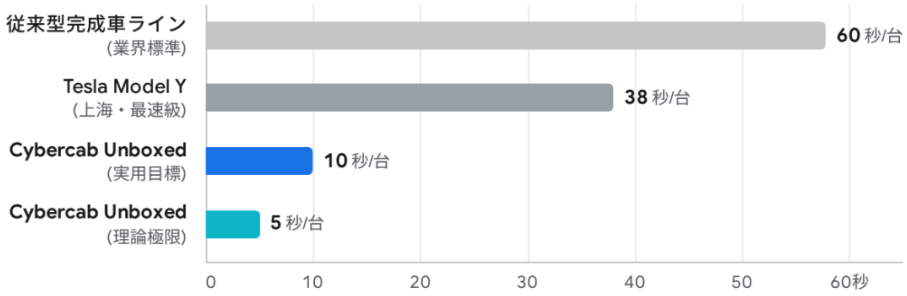
1.3 タクトタイム「5～10秒級」構想の生産技術的検算

製造技術報道によれば、テスラはCybercabラインにおいて近未来の実用目標として「10秒以下に1台（T_takt <= 10.0 sec）」、長期的な理論極限として「5秒に1台（T_takt = 5.0 sec）」という超高速タクトを掲げている[5]。2026年11月時点では、Giga Texasの公式設備能力表記は「年産125,000台超」であり、モラヴィ副社長は「実際のライン能力は公表値を大幅に上回るが、現在はロボタクシーの配備ペースが律速となっているため毎日稼働させておらず、バースト運転でどこまで速く回せるかを検証している」と述べている（定常稼働時の実測サイクルタイム秒数は公式非公開）[5]。

アンボックスド工程におけるタクト短縮と並列サブライン分岐数の数理構造

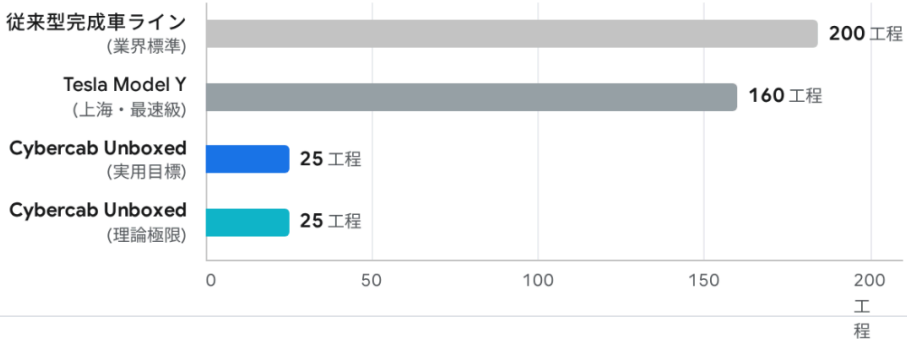
目標・実績タクトタイム比較（単位：秒／台）

年間実稼働6,000時間・OEE（設備総合効率）85〜90%前提でのライン生産速度比較



最終組立（GA）直列ステーション数比較（単位：工程）

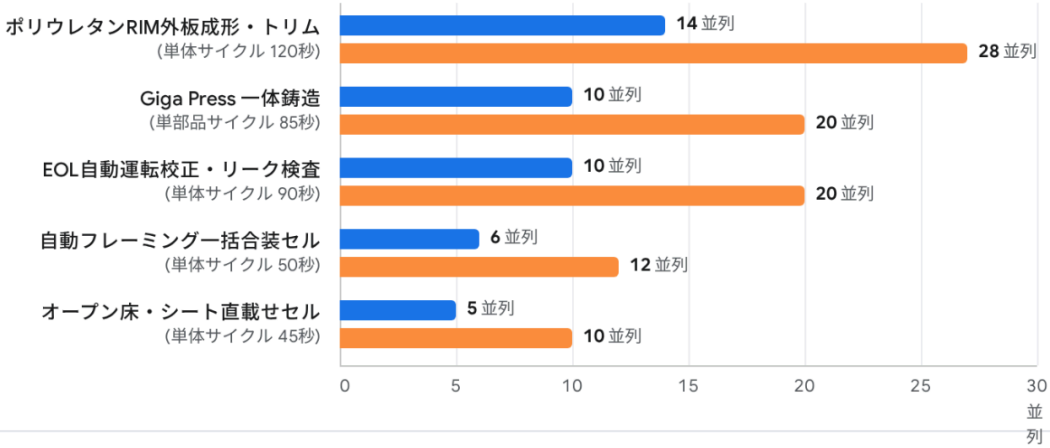
塗装レス化と6分割モジュールの事前並列組付けにより、最終直列ラインを1/6〜1/8へ短縮



超高速タクト成立に必要な上流・検査工程の並列セル分岐数（試算値・単位：並列セル数）

10秒タクト稼働時　5秒タクト理論極限時

算出式：必要並列セル数 M = ceil(単体サイクル時間 ÷ [最終タクト × セルOEE])　※セルOEE 85〜92%設定



最終組立ラインを約25ステーションへ短縮し**10秒タクト（理論目標5秒）**を実現するためには、物理的な凝固・硬化・検査時間を要する上流工程をサブライン側で並列分岐（10秒タクト時で5〜14並列、5秒タクト時で10〜28並列）させ、バッファを介して最終ラインへ同期供給する設計が不可欠となる。

Data sources: Wikipedia (Giga Press), WheelFront, Basenor, Teslarati

ここで完成車メーカーの生産技術視点から、「5〜10秒タクト」が並列サブライン分岐数と最終結合ステーションのサイクルタイムのいかなる数理関係で成立するのかを検算する（以下、生産システム工学的定量試算）。最終メインラインの要求タクトタイムをT_takt（秒）、ある上流モジュール工程または検査工程iの1セルあたり正味サイクルタイムをT_cell_i（秒）、当該セルの設備総合効率をOEE_iとするとき、メインラインを欠品させずに同期供給するための必要並列セル分岐数M_iは次式で決定される[21]。

M_i = ceil(T_cell_i / (T_takt * OEE_i)) （ただしceilは小数点以下切り上げ）

また、年間の実質稼働時間をH_net = 6,000時間（21,600,000秒／年）、最終ラインの総合効率をOEE_spine、最終直列ステーション数をN_spineとした場合の年間実効生産能力Q_annualおよび最終ライン通過リードタイムL_GA（分）はQ_annual = (21,600,000 / T_takt) * OEE_spineおよびL_GA = (N_spine * T_takt) / 60となる[21]。

物理的な熱移動や化学反応を伴う工程は単機で10秒に短縮できない。例えばGiga Pressによるアルミ溶湯射出・凝固・取り出しサイクルはT_cell = 80〜90秒（代表値85秒）を要するため[20]、T_takt = 10.0秒（OEE_i = 0.85）を維持するには単一部品あたりM_cast = ceil(85 / (10.0 * 0.85)) = 10並列セル（5.0秒タクト時は20並列セル）の稼働が計算上要求される[21]。同様に、数分を要するポリウレタンRIM外板成形・トリム工程（代表値T_cell = 120秒、OEE_i = 0.88）ではM_rim = 14並列セル（5秒時は28並列）、オープンフロアへのシート・内装搭載セル（T_cell = 45秒、OEE_i = 0.92）ではM_floor = 5並列セル（5秒時は10並列）が必要となる[21]。さらに決定的な点として、3Dレーザー位置決め・千鳥ボルト締結・ウレタン塗布を行う自動フレーミング合装局自体も1セルではT_cell = 50秒程度を要するため、合装局自体をM_marriage = 6並列セル（5秒時は12並列）に並列配置し、各セルから位相をずらして10秒おきに完成骨格を25ステーションのメインラインへ払い出す構造（および最終端EOL自動運転校正・リーク検査T_cell = 90秒での10並列ブース分岐）を採ることで初めて超高速タクトが数理的に整合する[21]。すなわちアンボックスドの本質は、全工程を単一速度に縛る直列コンベヤを廃し、物理的律速時間を並列セル数M_iへと空間変換した点にある[15]。

評価項目・生産技術指標	従来型完成車ライン（**ICE/**既存**BEV**）	テスラ **Model Y** 最速級ライン（上海・テキサス）	**Cybercab** 第**1**期公称値／近未来実用目標（**10**秒）	**Cybercab** 長期理論極限（**5**秒）と構造的根拠
ライン基本構造・塗装方式	直列コンベヤ＋大型塗装工場（閉じた箱への潜り込み艤装）[15]	直列コンベヤ＋前後Giga Press＋従来型塗装工場[15]	6分割並列サブライン＋塗装工場全廃（**RIM**外板）[5]	同左＋全サブライン完全自動化・超並列セル化[5]
目標／実績タクトタイム	約30〜60秒以上／台（代表試算60.0秒）[15]	約35〜40秒／台（代表試算38.0秒）[15]	第1期実績：公式非公開／実用目標：**10.0**秒以下[5]	**5.0**秒／台（合装12並列・鋳造20並列級が前提）[15]

最終組立ステーション数	約150～250ステーション（低自動化率）	約130～160ステーション	約**25**ステーション（合装100%・全体約78%自動化）[5]	約25ステーション（全体100%自動化目標）[5]
年間生産能力（**1**ライン系）	6,000h試算：約30.6**万台**[21]	6,000h試算：約50.0**万台**[21]	2026年Q3公称：**12.5**万台超／10秒試算：約**190**万～**300**万台[7]	6,000h試算：約**389**万台（高稼働時最大500万台構想）[15]
工場床面積・**GA**通過時間	基準（100%）・最終組立通過約200分[15]	床面積 約20%減・最終組立通過 約101分[21]	床面積 約**40**～**50%**削減・最終25工程通過 約**4.2**分[5]	床面積 約50%削減（並列セル増で微増）・通過 約**2.1**分[21]

第2章：Cybercab固有の「究極のDFA（組付け容易性設計）」：ステアリングレス・48V・硬質バスバー・無線充電

アンボックスド・プロセスを既存の車両設計のまま強行すれば、最終合装局で無数のワイヤーハーネス、油圧ブレーキ管、ステアリングシャフト、高圧充電ケーブルを手作業で接続・エア抜きする事態に陥り、短尺自動化ラインは即座に破綻する。Cybercabのシャシー空間を3次元的に解剖すると、中央の鋼製ケース構造用バッテリーフロアに対しては上方（-Z軸）からシートとコンソールが垂直自動搭載され、床下後方からは平板状のワイヤレス受電パッドが下方（+Z軸）から直付けされ、前後（X軸）から駆動・熱管理統合済みのフロント鋳造体と油圧レス電動ブレーキを備えたリア鋳造体が48V＋Etherloopゾーン配線を介して結合するという、全方向直交アクセスに最適化された車両側DFAの全体像が浮かび上がる[3]。

2.1 2シーター・ステアリング＆ペダル完全廃止がもたらすインパネ・空調・安全装備の簡素化

テキサス州公安局（Texas DPS）に提出された『Cybercab 2026+ Emergency Response Guide』および2026年第3四半期決算説明会でのモラヴィ副社長の発言により、量産仕様（SAE Level 4）のCybercabはステアリングホイール、ステアリングコラム、アクセルペダル、ブレーキペダル、運転席メータークラスター、ドアミラー、リアウィンドウ、車外ドアハンドルを完全に廃止していることが確定している（なおSAE Level 2で走行する開発・試験車両のみ物理的なステアリングとブレーキペダルを装備する場合がある）[4]。この人間運転操作系の全面撤去を軸として、Cybercabは「テスラがこれまで製造したどの車両よりも部品点数を50%削減（50% less parts）」という極限の部品統合を実現した[14]。

生産技術上、この操作系廃止はフロントアンダーボディとキャビン間の機械的リンク機構（インターミディエイトシャフトの挿通・位相合わせ・トルク締結）を完全に消滅させた。複雑巨大なコックピットモジュールは不要となり、中央の大型ランドスケープ・タッチスクリーン（Grok音声制御および緊急サポート双方向通信対応）とシンプルなエアバッグ・空調ダクトのみを備えた軽量構造へと簡素化されている[4]。

さらにアンボックスド組立にとって決定的なブレークスルーとなったのが、分解・工場調査報道で確認されたテスラ初の完全ドライ・ブレーキ・バイ・ワイヤ（EMB：Electro-Mechanical Brake）の採用である[5]。車体を前後・中央の独立モジュールに分割する場合、従来の油圧ブレーキではマスターシリンダーから4輪キャリパーへ金属ブレーキ配管をモジュール境界越しに接続し、合装後にブレーキフルードの真空充填・エア抜き（Bleeding）工程を実施せねばならない。Cybercabはブレーキフルードと油圧配管を全廃し、48V低圧電源と電気信号のみで4輪の電動キャリパーをミリ秒応答で独立制御するドライEMBを導入することで、「モジュール境界を流体ブレーキ管が跨がない」完全ドライ合装を成立させた[5]。

一方、部品単価の上昇を招くにもかかわらず採用されたバタフライドア（斜め上方開閉式大型ドア）についても、生技・運用の両面から明確な合理性が読み取れる[35]。2シーター車体で乗客が大荷物を持って自動乗降する際の頭上・足元開口面積を最大化できるだけでなく、車外ドアハンドルを全廃しBピラー外装ボタンまたは乗客接近検知による自動開閉としたことで、RIM外板ドアパネルへのハンドル穴加工や機械式ラッチリンク組付けが不要となった[4]。またヒンジ支持荷重をAピラー下部の高剛性結合ノードへ集中させ、最終25ステーションの下流で車外からボルトオン装着できる構造となっている[3]。

2.2 第2世代48Vアーキテクチャ・Etherloop・硬質バスバー／FPCによる「柔軟ハーネス排除」

電装・通信DFAの核を成すのが、Cybertruckで初導入されCybercabで完成度を高めた**48V**低電圧アーキテクチャ、電力・データ重畳伝送網**Etherloop**（イーサループ）、および100%自社設計の分散ゾーンコントローラ（Zonal ECU）と単一基板統合設計である[11]。

まず導体物理に基づく削減効果を定量試算する。システム電圧を12 Vから4倍の48 Vへ昇圧すると、同一電力P_loadに対する電流I = P_load / Vは1/4に減少する[11]。例えばドライEMBやステア・バイ・ワイヤ、電動空調ブロワ等の高負荷機器がピークP_load = 2,400 Wを消費する際、12 V系ではI_12V = 200.0 Aに達するが、48 V系ではI_48V = 50.0 Aへ低下する[21]。電流密度一定（導体断面積A_48V = 0.25 * A_12V）で設計した場合、必要銅線質量は**75%**削減され、配線抵抗が4倍（R_48V = 4 * R_12V）になってもジュール熱損失P_loss = (I ^ 2) * Rは75%減少し、システム電圧に対する相対電圧降下率も1/4に改善される[11]。

さらにEtherloopは、従来独立していた電源線と通信線（CAN/LIN）を単一ケーブルへ統合し、各アクチュエータの直近に配置された小型ゾーンECU間を高速イーサネット・バックボーンで結ぶことで、車体を横断する10〜15フィートの長尺ハーネスを廃絶した[11]。Cybertruckの時点で総配線量を従来比**77%**削減しており、操作系やリアドアを持たないCybercabではさらに簡素化が進んでいる[11]。加えて分解報道によれば、Cybercabの88S6P電池パック内部ではセル監視ワイヤーハーネスをワイヤレス**BMS**基板へ置換して単一基板統合を進め、高速コンタクタの採用によってパイロヒューズ（火工品遮断器）まで削除している[5]。

この電装簡素化をロボット自動組付けへ直結させる技術が、柔軟束線から「硬質導体（成形バスバー）・フラットケーブル（FFC/FPC）・モジュール間ブラインドメイトコネクタ」への移行である。テスラはワイヤーハーネスとCANバスの排除を意図したモジュラー配線特許や、スプリング荷重式バスバー継手、基板ピン直結バスバー積層構造（US11979047B2、WO2024072853A1等）を取得・公開している[39]。（※注：Cybercab実車内部でのFFC配索比率およびモジュール境界ブラインドメイトコネクタの具体的型番は公式非公開であり、以下は特許群と業界実装動向に基づく工学的推論を含む[11]。）樹脂絶縁成形された硬質アルミ／銅バスバーやクリップ一体型ラミネートFFC/FPCは確定した3次

元剛体形状を持つため、6軸ロボットが吸着パッドやグリッパで高精度にチャックし、オープンモジュール上へ上からスナップ嵌合・自動ボルト締結できる。さらにモジュール合装界面にラジアル方向+/-1.5〜2.0 mm程度のフローティング機構とテーパーガイドピンを備えたブラインドメイト（自動ドッキング）コネクタを配することで、6大モジュールの機械的押し合わせと同時に48V電源とEtherloop通信を無手作業で一括嵌合できる設計が成立する[43]。

2.3 充電ポート廃止と誘導式（ワイヤレス）充電ユニットのモジュール組付け

Cybercabは車体側面のNACS充電ポート（充電フラップ、開閉モータ、ロック機構、および外板裏からバッテリーまで車体骨格内を引き回す極太の高圧DCケーブル）を全廃し、床下誘導式（インダクティブ／ワイヤレス）充電システムへ一本化した[44]。テスラは2023年6月に独Wiferionを買収して中核技術陣を社内へ統合しており、公式Xアカウントを通じてワイヤレス充電効率が「90%を優に超える（well above 90%）」と明言している[23]。実演および2026年8月提出のオースティン充電デポ設計資料（ワイヤレス約80ストール＋V4充電器48基併設）では25 kWの誘導充電出力が示されている[24]。2026年8月に公開されたテスラの関連国際特許2件（EVwire報道）からは、量産DFAと安全設計の核心が確認できる[31]。第一の特許WO2024182422A2では、同一のトランジスタ・コイル・共振コンデンサ基板を用いながら、工場製造時のジャンパ／コネクタ結線切り替えのみで400Vパック車（Cybercab）向けの「Hブリッジ構成」と800Vパック車向けの「スタックド・ハーフブリッジ構成」を共用化する回路トポロジーと、電磁干渉（EMI）低減・高効率化をもたらす受電側双方向短絡スイッチが開示されている[31]。第二の特許WO2024182405A1では、地上送電パッド上の金属異物渦電流発熱を防ぐ異物検知（FOD）として、共振周波数シフト監視に加えてパッド基板表面に**500**個以上の微小温度センサを埋め込み、50 mm角クラスの金属片の異常昇温を検知して即座に送電を遮断する保護機構が規定されている[31]。車両組立生技の観点では、外板の充電リッド開口加工やチリ合わせが消滅し、平板状の受電コイル・整流ユニットをサブライン上で車体床下（+Z方向）からロボットが直付け・最短バスバー締結するだけで充電系組付けが完結するメリットは極めて大きい[31]。

車両システム領域	従来型**EV**の標準構造	**Cybercab**の実装仕様（確定事実・報道・推論区分）	削除された主要部品・製造工程	生技・アンボックスド自動化への直接効果
運転操作・コックピット系	ステアリングコラム、ペダル箱、メーター、ミラー、外ハンドル[4]	操作系完全廃止（SAE L4量産車）・中央画面のみ（行政文書確定事実）[4]	コラム軸、ペダル群、ミラー、外ハンドル、複雑CCB（全車部品**50%**減）[14]	前部モジュールとキャビン間の機械的シャフト連結・調整工程が完全消滅
制動システム（ブレーキ）	マスターシリンダー＋前後4輪への金属／ゴム油圧配管	完全ドライ**EMB**（48V電動キャリパー独立制御：分解・技術報道）[5]	ブレーキフルード、マスターシリンダー、モジュール間油圧管、真空充填・	ブレーキ流体管がモジュール境界を跨がないためドライ環境での一発合装が

			エア抜き工程[5]	成立[5]
低圧電源・通信ハーネス	12V電源＋長尺柔軟ワイヤーハーネス＋個別CAN通信線[11]	**48V**＋**Etherloop**＋自社ゾーンECU＋電池内無線**BMS**（報道確定）＋硬質導体／自動嵌合（特許・推論）[5]	10〜15 ftの車体横断柔軟ハーネス（77%超削減）、セル監視線、パイロヒューズ[5]	銅量・熱損失75%減（試算）[21]；剛体化と局所完結によりロボット自動配索が可能化
外装ボディ・塗装系	鋼板／アルミプレス溶接＋大型電着・スプレー塗装・乾燥炉[5]	着色ポリウレタン**RIM**外板＋非酸化アルミ鋳造＋ボロン鋼防錆（副社長証言確定）[5]	従来型塗装工場（**Paint Shop**）全廃、乾燥炉、VOC処理設備、上塗り工程[5]	設備投資数億米ドル削減・着色工程を数時間から数分へ短縮・浅傷の下地露出防止[5]
充電システム	外装充電リッド＋NACSポート＋車内横断極太DCケーブル[44]	床下**25 kW**誘導式受電パッド（効率90%超、400V Hブリッジ構成：特許・公式発言）[23]	充電フラップ開口、開閉アクチュエータ、外板〜電池間の長尺HVケーブル[44]	床下サブラインでの平板ユニット上方直付けのみで完結し、無人自動充電を実現[24]

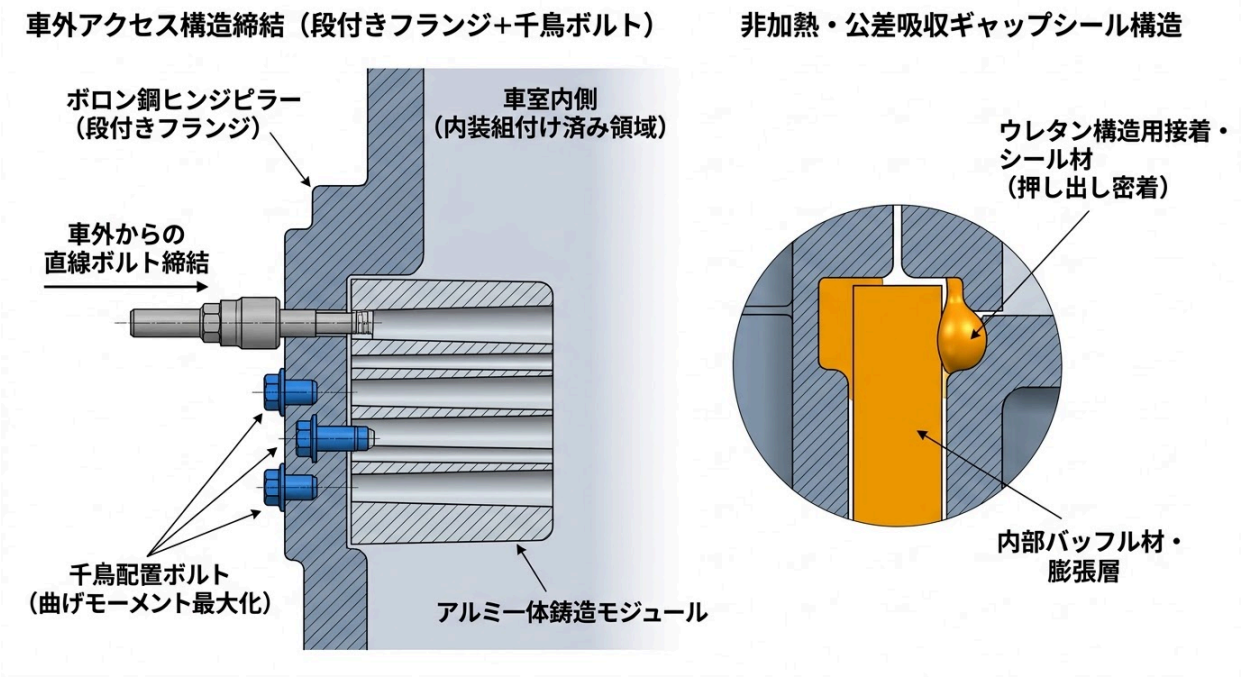
第3章：6大モジュール合装（Marriage）における「サブミリ公差・セルフアライメント治具・NVH品質保証」の難所と解決策

完成車メーカーの車体生技部門がアンボックスド・プロセスに対して抱く最大の技術的疑問は、「別々のサブラインで製造された床・前後鋳造体・左右サイド・ルーフ外装を最終工程で1回だけ非溶接結合して、ドア建付け精度（Gap & Flush）、車体剛性、水密性、および50万マイル走行時のNVH品質をいかに担保するのか」という点にある[3]。

3.1 車体骨格を後から結合する際の「寸法公差積み上げ（Tolerance Stack-up）」問題

従来のホワイトボディ溶接では、個々のプレス部品にスプリングバック誤差があっても溶接ジオメトリ治具で強制クランプし、フランジのスリップ継手で誤差を吸収した上で数千点のスポット溶接により一体箱構造へ固定していた。対してアンボックスド方式では、①センターバッテリーフロア、②フロント鋳造体、③リア鋳造体、④左ボロン鋼サイドリング、⑤右ボロン鋼サイドリング、⑥ルーフ／RIM外板の6要素が内装搭載済みの状態で合装される[3]。仮に閉ループを成す6箇所の結合界面に鋳造収縮や治具誤差としてt_i = [+/-0.5, +/-0.6, +/-0.5, +/-0.5, +/-0.6, +/-0.4] mmの未補正公差が残存したまま単純結合すると、ワーストケース累積公差Tol_WC = sum(t_i)は+/-3.10 mm、二乗和平方根（RSS）公差Tol_RSS = sqrt(sum(t_i ^ 2))でも+/-1.28 mmに達し、バタフライドアのシール水密性や外観チリ

精度が破綻する（定量試算）[21]。テスラは特許WO2024182432A1およびGiga Texasの100%自動フレーミング局において、以下の3段階の機構設計でこの公差積み上げを克服している[3]。



1. 車外視線（**Exterior Line-of-Sight**）治具とインライン**3D**レーザー動的補正：特許WO2024182432A1（図12A～13）によれば、合装時にはすでに車室内にシートや内装が組付けられているため、すべての位置決め治具および締結ロボットは車外からの直線視線アクセス（外側から内側へ向かう方向）に配置される[3]。Giga Texasの合装局ではロボット群とレーザー計測システムが連動して稼働しており[15]、アルミ鋳造体のCNC機械加工データム穴・テーパーロケートピン（キネマティックマウント）と3Dレーザー計測による6自由度動的姿勢補正を組み合わせることで、シム調整レスで各界面の実効誤差をt_i = +/-0.15～0.20 mm水準へ圧縮可能と推論される。このとき閉ループ6界面の累積公差はワーストケースでTol_WC = +/-1.00 mm、統計的RSS値でTol_RSS = +/-0.41 mmに収束し、Aクラス外観品質とドア建付け精度が成立する計算となる[21]。
2. 段付きフランジ（**Jogged Flange**）と千鳥配置ボルト締結（特許図**9A～9C**：確定事実）：防錆・着色済みモジュールを熱歪みの出る溶融溶接で接合する代わりに、ボルト締結、リベット（SPR等）、または摩擦攪拌接合（FSW）といった非溶融機械接合が採用される[3]。特に荷重が集中するヒンジピラー接合部（図9A～9C）では、ボロン鋼プレス部品側に車内方向へオフセットした「段付きフランジ（Jogged inboard mounting flange）」を設けることで、相手側のアルミ大型鋳造品に深い凹形状を鋳造する必要をなくしている[3]。さらに車外から横方向（Y軸）へ締結するボルト群を前後（X軸）・上下（Z軸）に互い違いに配した千鳥ボルトパターン（Staggered bolt pattern：図9B）とすることで、上下曲げモーメント耐力を最大化している[3]。
3. 過膨張バッフル材と押し出し密着（**Squeeze-out**）ポリウレタンシール（特許図**11A～11B**：確定事実）：塗装乾燥炉を持たないアンボックスド工程では、180 degC加熱硬化型シーラーが使えない。そこで特許図11A～11Bでは、接合空洞部にバッフル（1102）と膨張調整材（1104）を配してピンホールなく隙間を架橋し、さらにポンプ塗布式のウレタン系構造用シーラント（1106～

1112）を未硬化ビードとして塗布した上で相手モジュールをクランプ圧着する構造が開示されている[3]。圧着時に接合端からシーラントを意図的にはみ出させる（Squeeze-out）ことで、手作業のヘラならし（Skiving）を行わずに個体差ギャップを吸収しつつ水密・気密層を形成する（なお実ライン報道では接着剤使用量を最小限に抑え、精密機械締結とレーザー位置決めを主軸としているとされる）[3]。

3.2 モジュール間インターフェースの「一括自動結合」と残存リスクの冷徹な評価

最終合装の瞬間に人手を介さず（フレーミング自動化率100%）機能結合を完了させるため、モジュール境界を跨ぐ物理インターフェースは極限まで絞り込まれている[5]。油圧ブレーキ管と機械式ステアリング軸、外板充電ケーブルが排除された結果、合装時に接続を要するのは、①88S6P電池パック前端とフロント駆動インバータ／DC-DCコンバータを結ぶ400V高電圧DCバスバー接続、②各モジュール間の48V電源＋Etherloop少芯ゾーン幹線コネクタ、および③フロントアンダーボディ（FUB）に事前搭載されたサーマルシステム（冷却水・空調冷媒）と電池・キャビン空調を結ぶ流体インターフェースの3系統のみとなる（個別カプラの型式は公式非公開）[3]。電気系はフローティング・ブラインドメイトコネクタにより機械合装と同期嵌合でき、冷却水・冷媒系は液だれ防止ドライ・ブレーク・カプラの一括ドッキングまたは合装直後の床下自動フランジ締結＋EOL自動リーク検査で対応可能と推論される[3]。

しかしながら、この非溶接合装ボディには従来のモノコック溶接車体にはない3つの残存リスクが存在する。第一は、**50**万マイル（約**80**万 **km**）の設計耐久寿命下における異種材料間の熱膨張差と**NVH**（きしみ音）リスクである[5]。アルミ鋳造体（線膨張係数 約23 * 10^-6 /K）、ボロン鋼サイドリング・鋼製電池ケース（約12 * 10^-6 /K）、ポリウレタンRIM外板（約60〜100 * 10^-6 /K）の間には最大5〜8倍の線膨張差があり、長期の熱サイクルと路面振動入力によってボルト締結＋ウレタン接着界面に微小すべりや軸力低下が生じれば、きしみ音（Squeak & Rattle）や外板クリアランス変動を招く恐れがある。

第二は、衝突安全荷重経路（**Crash Load Path**）の局所応力集中である。連続スポット溶接フランジに代わり離散的な千鳥ボルト締結部へ衝突荷重が集中するため、非熱処理アルミ鋳造側のボス周辺で脆性破断を起こさぬよう、Giga Press鋳造後のX線内部欠陥検査と厳格なポロシティ管理が生命線となる[3]。

第三は、重度衝突時の骨格リペア性と一般顧客販売後の保険・整備課題である。英国Thatcham Researchの調査（Industry Arsenal報道）ではギガキャスト単体の部品価格（Model Yリアで約969米ドル）が低く軽〜中損時の修理費は従来鋼板構造と同等以下と評価されており、Cybercabも無塗装RIM外板や単一モジュール交換式電池パック（社内評価Aマイナス）により日常補修性は極めて高い[5]。しかし、大事故でボロン鋼リングとアルミ鋳造体のウレタン接着・千鳥ボルト合装界面自体が変形した場合、一般整備工場では硬化ウレタンの剥離や3Dレーザー基準の再アライメントが困難であり、2026年12月以降の一般個人オーナー向け納車拡大に伴い、指定重整備拠点への輸送コストや保険料率の推移が注視される[8]。

結合対象・物理領域	適用される結合・位置決め技術	目標公差・タクト要件（試算含む）	想定される経年・品質リスク	生産技術的対策・保守性評価

主骨格結合（鋳造体×ボロン鋼×鋼製電池箱）	車外視線アクセス・段付きフランジ＋千鳥ボルト締結／SPR＋最小限接着剤[3]	単界面+/-0.15～0.20 mm・閉ループRSS **+/-0.41 mm**（試算）[21]	50万マイル走行時のボルト軸力緩和・異材熱膨張差によるきしみ音（NVH）[5]	千鳥配置で曲げモーメント耐力確保・非酸化アルミと防錆ボロン鋼の組合せ[3]
気密・水密ギャップシール界面	内部バッフル＋膨張調整材＋ポンプ塗布ウレタンの押し出し密着[3]	1セル合装サイクル約50秒（6並列分岐で10秒タクト対応：試算）[21]	ビード欠損時のピンホール水漏れ・重度衝突修理時の接着層剥離難度[3]	ヘラ仕上げ不要の押し出し断面設計・インライン3D光学ビード検査[3]
外装パネル（ポリウレタン**RIM**×骨格）	顔料混合RIM一体成形パネルの後付け機械締結[5]	樹脂の線膨張差を見込んだ取付クリアランス設計	高低温環境下でのパネル伸縮・面段差（Flush）変動	塗装剥離ゼロ・浅傷で下地が出ず外板パネル単体の迅速交換が可能[5]
高圧**400V**・低圧**48V**／**Etherloop**結合	フローティング・ブラインドメイト（自動嵌合）コネクタ・バスバー締結[11]	ラジアル誤差+/-1.5～2.0 mm吸収・無手作業ドッキング（推論）	長期振動による接点微動摩耗・高圧インターロック接触不良	48V化で電流1/4化・ゾーン統合によりモジュール間極数を大幅削減[11]
熱管理（冷却水・冷媒）モジュール結合	FUB事前搭載サーマルバー＋クイックカプラ／自動フランジ締結（特許・推論）[3]	合装後の自動リーク検査（EOL並列ブース90秒級：試算）[21]	接合シール噛み込み・長期振動下の冷媒スローリーク	油圧ブレーキ管はドライEMBで全廃済みのため冷却系のみに集中管理可能[5]

第4章：Giga Texas等における「多関節ロボット×大型AMR×Optimus」の役割分担と全14巻モデルとの横断比較

4.1 アンボックスド・ラインにおけるロボット適材適所配置

Giga TexasのCybercabラインをロボット工学と生産システム設計の観点から精査すると、アンボックスド・プロセスが洗練されるほど、主組立ラインにおける二足歩行ヒューマノイドの必要性は低下し、固定式多関節ロボットと重量搬送**AMR**の優位性が決定的になるという構図が鮮明になる。
そもそも工場に二足歩行ロボットを導入する最大の動機は、「閉じたホワイトボディの狭いドア開口部や人間用通路といった既存設備（ブラウンフィールド）を改造せずに自動化したい」という制約にある。しかしアンボックスド・プロセスは、最初から車両の天井と側壁を排除し、上方（-Z）と車外全周か

らの直線視線アクセス（Line-of-Sight）を確保したグリーンフィールド設計である[3]。数十kgのシートの高速垂直搭載や、100 Nm超の高反力トルクを伴う千鳥構造ボルトの同時締結、アルミ鋳造体のサブミリ精度ハンドリングを24時間連続・10秒タクト目標で反復する工程において、床面に剛体固定され常時給電される6軸多関節ロボットやガントリー機に対し、バッテリー駆動で可搬重量が小さく二足バランス制御のコンプライアンス誤差を抱えるヒューマノイドを選択する工学的合理性はない。実際、Cybercabのフレーミングライン（自動化率100%）および最終25ステーション（全体自動化率約78%）を担っているのは固定式の産業用ロボットとレーザー位置決め・自動締結セル群であり、並列サブライン間の非同期バッファ搬送には大型モジュール搬送AMR／コンベヤ系が用いられる（AMRの具体的ベンダー・台数は公式非公開）[3]。

これに対し、二足歩行ヒューマノイド「Optimus（Gen 2 / Gen 3）」のテスラ工場内（**Fremont**および**Giga Texas**）における検証済み実稼働タスクは、力覚フィードバック把持制御を用いた4680バッテリーセルの仕分け・樹脂トレイ整列、および通い箱からの部品ピッキング・キッティング・ステーション間移載・外観検査補助といった周辺物流・前工程作業に明確に切り分けられている[17]。

2026年第2・第3四半期決算報告書および同年10月21日の決算説明会でのイーロン・マスクCEOの発言によれば、テスラはFremont工場の旧Model S／Xライン跡地に年産100万台規模を構想するOptimus高量産ラインを導入して初期生産（Early Ramp）を開始し、Giga Texasでも専用製造施設の建設を進めている[7]。しかしマスク氏自身が「ロボット量産には10,000個の要素が正しく機能する必要があり、最も遅い要素に律速されるためS字カーブの立ち上がりは緩やかで険しい」と認めており、週産20,000台ペースへの到達および社外企業への納入開始には少なくともあと1年（2027年末頃）を要する見通しを示した[14]。さらに多自由度の手先制御には現行AI4の約10倍の演算性能を持つ次世代**AI5**チップ（2026年9月にSamsungテキサス工場で試作開始、Optimus統合は**2027**年**4**月頃予定）が不可欠とされており、Cybercabラインに残る約22%の非自動化作業への本格適用も今後の世代進化に委ねられている[5]。

作業領域・工程区分	主担当自動化システム	要求される物理・制御スペック	テスラ工場での公開稼働事実（**2026**年**11**月時点）	技術的限界と今後の展望
主骨格合装（**Marriage**）・大物部品搭載	固定式**6**軸多関節ロボット＋3Dレーザー計測治具[3]	可搬50〜300 kg・反復精度 +/-0.05 mm級・高締結反力耐性	Cybercabフレーミング工程で自動化率100%を達成済み[5]	設備固定のため車種大幅変更時は治具・プログラム改修が必要
オープンモジュール組付け・**RIM**トリム	中小型高速多関節ロボット・自動塗布／締結機[3]	上方-Z直線アクセス・高速サイクル（1動作数秒級）	RIM外板トリム、駆動ユニット（1分未満組立）、全体約**78%**自動化[5]	残存約22%の微細・柔軟部品組付けを100%自動化へ引き上げ中[5]

並列サブライン間搬送・バッファ結合	重量可搬**AMR**／**AGV**・同期モジュールコンベヤ[3]	可搬500～1,500 kg級・高精度停止・フリート同期管制	並列サブラインから25工程最終ラインへの合流（詳細機種は公式非公開）[3]	10秒タクト稼働時は高密度AMR群の交通管制と人間安全分離が課題
電池セル仕分け・部品キッティング・軽物流	二足歩行ヒューマノイド「**Optimus**」[17]	可搬約20 kg級・多指力覚把持・視覚エンドツーエンドAI[25]	Fremont/Texasで**4680**セル整列・部品移載を実施；Fremont初期量産中[7]	高トルク・超高速タクト工程には不適；**2027**年**4**月**AI5**搭載・同年末外販目標[14]

4.2 Global 5大フィジカルAIモデルとの最終対比表

本調査シリーズ全14巻で分析してきた世界の主要OEM4陣営のフィジカルAI戦略と本第15巻のテスラ「Unboxed × Cybercab」モデルを対比すると、世界の自動車生技は「既存の直列箱型ラインを維持したままロボット側の身体性・AIを適応させるアプローチ（①～④）」と、「直列コンベヤと車両構造そのものを解体して作業難易度を消去するアプローチ（⑤）」という鮮烈な対立軸を描いている。

日本の①トヨタ「**ELEY**」モデルは、平坦な既存工場床面での転倒リスクとバランス電力を排するため全方向車輪ベース（自重50 kg、設置面積478 mm x 450 mm、高さ939～1,619 mm）を採用し、全関節に減速比10:1以下の準ダイレクトドライブ（QDD）と肩甲骨関節を備えた「柔らかい腕」を実装した[52]。TRI開発のDiffusion Policyにより作業員の数十回の直接教示から柔軟ワイヤーハーネスやゴムシールの組付けを学ぶが、長時間信頼性・反復精度・データ基盤の課題から量産配備時期は公式非公開としている[52]。これに対し②米国**BMW×Figure**モデルは、スパータンバーグ工場の既存溶接セルへ二足歩行のFigure 02をドロップイン投入して2025年に累計30,000台の車両生産（板金部品ローディング精度99%目標）に貢献させた後、2026年6月から手掌カメラを備えた次世代機Figure 03へ移行して部品仕分け等へ領域を広げている[55]。

③欧州メルセデス**×Apollo**／**BMW OpenUSD**＋**VDA5050**モデルは、メルセデス2工場でGoogle DeepMindのGemini Robotics 2.5を搭載したApptronik Apollo 2が部品仕分け成功率96%を記録する一方、工場全体ではNVIDIA Omniverse（OpenUSD）デジタルツインと移動ロボ標準通信規格VDA 5050によってマルチベンダーのAMR・人型ロボを統合管制する標準化戦略を採る[59]。また④中国・極氪（**Zeekr**）**×UBTECH**モデルは、ギガキャストや重量級多腕空中治具（本シリーズ既出の280 kg級4腕空中治具等）による重装備自動化と並行して、寧波の5Gインテリジェント工場へ数十台のUBTECH Walker S1（41自由度）を投入し、LLMベースの群知能（Swarm Intelligence）による協調搬送・品質検査の実地学習を国家スピードで推進している[63]。これら4モデルに対し、⑤テスラ**Unboxed**モデルは「そもそも柔軟ハーネスや閉じた車室への潜り込み作業を車両設計側から無くす」ことで、既存の固定多関節ロボットのみで高次元の自動化と面積半減を即時達成した点で一線を画している[5]。

実装モデル・代	ライン前提・車体側**DFA**アプ	主役ロボット構成・アクチュ	**AI**学習・デジタル基盤・通信規	**2026**年**11**月時点の実稼働実

表拠点	ローチ	エータ仕様	格	績と構造的限界
① トヨタ「**ELEY**」モデル（日本・既存工場環境検証）	狭小既存ライン維持（柔軟ハーネス・ゴムシール等の既存部品にロボ側が適応）[52]	車輪型双腕**ELEY**（自重50 kg・肩甲骨関節・減速比<=10:1の**QDD**柔軟腕）[52]	TRI **Diffusion Policy**（作業員の数十回直接教示＋ルールベース安全制約）[52]	準生産環境で訓練中・量産配備時期は公式非公開（長時間信頼性・反復精度が課題）[52]
② 米国**BMW×Figure**モデル（米スパータンバーグ工場）	既存車体セル維持（人間用溶接・物流ステーションへの二足ドロップイン置換）[69]	二足歩行**Figure 02 → Figure 03**（手掌カメラ・高出力電動関節・5指ハンド）[55]	エンドツーエンドVLAモデル・実機データ収集＆自律仕分け学習[55]	Figure 02で**3**万台生産貢献後、2026年6月より**Figure 03**を実戦投入中[55]
③ 欧州メルセデス／**BMW**標準化モデル（独・欧州工場群）	既存～混流ライン維持（イントラロジスティクス・部品仕分け領域を優先自動化）[59]	**Apptronik Apollo 2**（最大71 DoF系）＋異種ベンダーAMR／AGV群[59]	**Gemini Robotics 2.5**＋**NVIDIA Omniverse (OpenUSD)**＋**VDA 5050**標準管制[59]	メルセデス2工場で仕分け成功率96%達成；狭小車室内への直接艤装は限定的[59]
④ 中国**Zeekr×UBTECH**モデル（中国・寧波5G工場）	ギガキャスト＋重量級空中治具（280 kg4腕等）と人型群の剛柔ハイブリッド[65]	二足歩行**UBTECH Walker S1 / S2**（41 DoF）数十台同時配備[65]	LLMベース群知能（**Swarm Intelligence**）・5G工場横断タスク協調[63]	複数台協調での箱搬送・品質検査を実稼働訓練；単体タクト速度は固定ロボに劣後[64]
⑤ テスラ**Unboxed×Cybercab**モデル（米Giga Texas / Fremont）	直列コンベヤ解体・塗装全廃・部品**50%**減（車両側DFA極限化・6分割並列生産）[2]	主ライン：固定**6**軸ロボ群＋AMR／周辺：**Optimus**（セル整列・キッティング）[12]	自社統合E2E AI（Cortex超大型計算基盤・2027年4月**AI5**統合予定）[7]	Cybercab 年産**12.5**万台超ライン稼働（合装**100%**自動）；Optimus外販は2027年末目標[7]

第5章：日本の製造業5層ステークホルダー（生技・FA・部材・

標準部品・安全）への戦略的示唆

アンボックスド・プロセスは自動運転ロボタクシー特有の特殊解にとどまらず、通常のステアリング付き次世代BEVや小型商用モビリティにもそのまま波及する汎用性を備えている（現にトヨタも2026年以降のEV向けにフロント・リアのメガキャスティング採用と3分割車体構想へ踏み出している[67]）。既存のティア1モジュール納入形態（単体部品納入から機能検査済み大型サブアセンブリ納入への移行）やFA設備・部材サプライチェーンに及ぶ破壊的インパクトを踏まえ、日本の5層ステークホルダーが取るべき戦略を以下に提言する。

A. 完成車・二輪メーカーの生産技術・車両設計部門においては、車体・電装・塗装・組立の縦割り組織を横断する「コンカレントDFA改革」が最優先課題となる。既存の閉じたホワイトボディと12Vハーネスを温存したまま組立自動化のみを追求しても投資対効果は限定的である。短期的には構造用バッテリー兼フロア単体へのシート・カーペット垂直自動搭載を切り出す「部分アンボックスド（セミ・アンボックスド）」と48Vゾーン配線・ドライEMBの次期プラットフォーム採用に着手し、中長期的には小型EVや二輪外装での顔料混合RIM成形による塗装レス工場および車外アクセス非溶接合装の実用化へ進むべきである[3]。

B. 産業用ロボット・FAシステムインテグレーター（SIer）においては、長大な直列コンベヤ向け単体ロボット案件が縮小する一方、オープンモジュールを複数台の高速多関節ロボットで囲んで高密度組付けを行う並列セルや、最終合装セルへの統合投資が急増する[3]。日本のロボット・FA各社は、インライン3Dレーザー計測・6自由度動的アライメント補正・車外向き千鳥ボルト自動締結・2液ウレタン定量塗布を一体化した「標準フレーミング合装パッケージセル」を製品化するとともに、並列サブラインのバッファから最終ラインへ順序同期投入を行うVDA 5050準拠の群制御スケジューラを外販の中核に据えるべきである[3]。

C. 自動車部品・機能性材料・ハーネス・センサ**R&D**企業にとって、部品50%削減・ハーネス77%削減・塗装廃止・ブレーキフルード廃止は既存汎用品の需要蒸発を意味するが、同時にアンボックスドを支える高機能部材の創出機会でもある[5]。電線・コネクタ各社は手巻き束線から脱却し、ロボット把持対応の48V成形硬質バスバー／ラミネートFFC、無線BMSモジュール、+/-2 mmの合装公差を吸収する大電流・高速通信複合フローティング・ブラインドメイトコネクタ、および500点温度センサFOD基板内蔵ワイヤレス給電コイルへ開発資源を集中すべきである[5]。また化学・素材各社は、耐候Aクラス表面を実現する着色ポリウレタンRIM樹脂、非加熱でギャップ充填と異材熱膨張差吸収を両立する速硬化ウレタン構造用接着剤・過膨張バッフル材、および非酸化性・非熱処理ギガキャスト用アルミ合金の提案でグローバル標準を握る好機にある[3]。

D. FA標準部品・治具プラットフォーマーにおいては、大型ホワイトボディ溶接治具から「数百台のモジュール搬送AMRパレット用ゼロポイント位置決め機構」へと主戦場が移る。合装公差Tol_RSS <= +/-0.41 mmを支える高精度テーパーロケートピン、セルフアライメント・キネマティックマウント、自動クランプユニットを標準モジュール化し、さらにOpenUSD／NVIDIA Omniverse上でそのまま物理挙動・公差シミュレーションが可能な「SimReady 3Dデジタルカタログ」として提供することが、欧米中OEMのデジタルツイン設計段階で採用を獲得する鍵となる[21]。

E. 機械安全・労働安全衛生研究機関においては、重量モジュール自律搬送と100%無人合装エリアが人間・人型ロボと隣接する新形態の安全規格整備が急務である。定量試算を行うと、自重650 kgのAMRに重量480 kgの電池・シート搭載済みフロアを積載した総質量m_total = 1,130 kgの搬送体が速度v_amr = 1.5 m/sで走行する際、運動エネルギーE_kin = 0.5 * m_total * (v_amr ^ 2)は1,271.2 Jに達する[21]。減速度a_brake = 1.2 m/s^2、応答時間t_react = 0.25 secでの停止距離はd_stop =

1.31 m（停止時間1.50 sec）となり、ISO 3691-4:2023およびISO 13855の人間接近速度（1.6 m/s）と不確かさマージン（0.20 m）を加味した必要動的保護分離距離S_sepは3.91 mに及ぶ[21]。10秒タクトの高密度搬送下で4 m近い減速停止ゾーンを人間混在で運用すればライン停止が頻発するため、重量AMR幹線レーンと無人合装局の物理的完全分離ゾーニング、ならびに2025年改訂の産業用ロボット安全規格ISO 10218-1:2025 / ISO 10218-2:2025に準拠した保守介入インターロック基準を確立せねばならない[75]。あわせて常時活電状態（Energized at all times）の構造用高圧電池パック上での組付け感電・熱暴走対策（大量注水消火動線）およびポリウレタンRIM成形・ウレタンシーラント塗布工程でのイソシアネート系化学物質局所排気基準の策定が不可欠である[3]。

対象ステークホルダー層	アンボックスドがもたらす既存事業への脅威	新たに創出される高付加価値機会	短期アクション（**2026～2027**年）	中長期アクション（**2028～2030**年以降）
A. 完成車・二輪**OEM**（生技・車両設計）	200工程直列工場・大型塗装設備の投資効率劣後（床面積・工程数で大幅不利）[5]	省面積投資での新モビリティ高速立ち上げ・部品半減による製造原価圧縮[5]	電池兼フロアへのシート垂直搭載「部分アンボックスド」実証；48V・ドライEMB設計着手[11]	車外アクセス非溶接合装プラットフォーム確立；小型EV・二輪でのRIM塗装レス化[3]
B. ロボットメーカー・**FA SIer**	従来型直列コンベヤ向け単純単体ロボット納入案件の縮小	高密度並列組付けセル・レーザー動的補正合装局・AMR群同期管制の統合受注[3]	3Dレーザー計測＋外向き千鳥ボルト締結＋接着塗布一体型パッケージセルの開発[3]	VDA 5050＋OpenUSD対応の並列バッファ順序制御MES／群管理基盤の外販展開[61]
C. 自動車部品・材料・ハーネス・センサ企業	12V柔軟ハーネス、油圧ブレーキ管、充電リッド、従来型自動車上塗り塗料の需要減少[5]	48V硬質バスバー／FFC、自動嵌合コネクタ、常温速硬化ウレタン接着剤、耐候RIM樹脂[3]	フローティング・ブラインドメイト複合コネクタと異材熱膨張吸収ウレタン接着剤の試作提案[3]	ドライEMBモジュール、無線BMS、FOD温度センサ内蔵ワイヤレス受電パッドの量産供給[5]
D. FA標準部品・治具プラットフォーマー	大型一体ホワイトボディ用溶接ジオメトリ治具需要の減少	多数のAMR搭載モジュールパレット向けゼロポイント位置決め・セルフアライメント部品需要	サブミリ再現性を保証するテーパーロケートピン・自動クランプ標準ユニットの拡充	全標準治具部品のSimReady(OpenUSD)物理モデル化によるデジタルツイン標準獲得[61]

E. 機械安全・労働安全衛生研究機関	人間・人型ロボ・1トン超AMR・無人合装局が隣接する複合災害リスクの顕在化[21]	次世代モジュール工場向け国際安全規格（ISO 10218:2025 / ISO 3691-4）主導権[77]	重量モジュールAMRの動的分離距離（約3.9 m試算）に基づく完全分離ゾーニング指針策定[21]	活電構造用電池パック上での組付け電気安全基準とRIM／ウレタン塗布局所排気基準の整備[3]

巻末付録：プレゼンテーション用インフォグラフィック画像生成プロンプト集

本報告書の第1章～第5章の核心を16:9の横長スライド図解として外部画像生成AIで再現できるよう、純白背景のクリーンな産業エンジニアリング図解プロンプト（日本語テキストラベル厳密指定、数式・ギリシャ文字不使用）を4点収録する。

図版1：従来型直列ベルトコンベヤ（閉じた箱への潜り込み）vs アンボックスド・プロセス（6分割並列組付け＋最終合装）のフロー・設置面積比較図

アスペクト比16:9の横長プレゼンテーションスライド用インフォグラフィック図解。純白の背景（ソリッドホワイト）に、精密なアイソメトリックCADスタイルの産業エンジニアリング図面を描く。画面を上下2段に分割して比較する。上段は落ち着いたグレー調で左端から右端まで画面幅いっぱいに広がる従来型自動車工場を描き、左から順に「車体溶接」「大型塗装工場」「従来型直列コンベヤ組立（閉じた箱への潜り込み・約200工程）」の日本語ラベルのみをクリーンなゴシック体で配置し、塗装済みボディの狭いドアから作業者が身を乗り入れる様子を精密に描く。下段は鮮やかなプロフェッショナルブルーとシアンを基調とし、画面左半分だけのコンパクトな面積に収まるテスラCybercabのアンボックスド工場を描く。左側に5本の並列サブラインを並べ、「フロント一体鋳造」「構造用電池＋シート直載せ」「リア一体鋳造」「左右ボロン鋼サイド骨格」「着色RIM外板（塗装廃止）」が並行して進み、中央の「自動一括合装セル」で1つに結合され、短い直線ライン「最終組立（約25自動ステーション）」へ抜ける構造を描く。下段右半分の空白エリアには破線枠で「工場床面積 約50%削減」と明記する。アイコンや数式、ギリシャ文字、余計な装飾や英数字の羅列は一切入れず、指定した日本語ラベルのみを正確に印字したモダンで権威ある技術図解スタイル。

図版2：Cybercabのオープンフロア・モジュールに対する全方向ロボットアクセスと48Vバスバー／ブラインドメイト結合の断面概念図

アスペクト比16:9の横長プレゼンテーションスライド用テクニカルイラストレーション。純白の背景の中央に、ルーフもサイドパネルもまだ存在しないテスラCybercabのオープンフロア・シャシー構造の精密な分解斜視図（アイソメトリック・カットアウェイ図）を描く。中央のフラットな鋼製構造用バッテリーパックの上方から、固定式6軸多関節ロボットのアームが垂直下向きに2脚のシートをダイレクトに降ろしている様子を描き、「上方オープン垂直組付け」と日本語ラベルを付ける。前方のアルミ一体鋳造モジュールには「フロント一体鋳造・熱管理統合」、後方のアルミ一体鋳造モジュールの車輪部には油圧ホースのないブレーキキャリパーを描き「完全ドライEMB（油圧配管廃止）」とラベルを付ける。フロア内部から前後モジュールへ向かって鮮やかなブルーの直線的な硬質バスバー幹線と小型コントローラを描き、「48V＋Etherloopゾーン配線」

「自動嵌合ブラインドメイトコネクタ」とラベルを付ける。さらに車体後部床下からは平板状のコイルユニットが下から上へ装着される様子をアンバーオレンジのアクセントで描き、「床下ワイヤレス受電パッド（充電ポート廃止）」と明記する。影やグラデーション背景を排し、クリーンな引き出し線と指定日本語ラベルのみで構成された高精度自動車設計図スタイル。数式やギリシャ文字は一切使用しない。

図版3：6大モジュール合装時の公差吸収・セルフアライメント機構と機械・電気・流体一括ドッキング構造図

アスペクト比16:9の横長プレゼンテーションスライド用機械工学断面図。純白の背景を左右2つの詳細断面パネルに分割する。左パネルの見出しは「車外アクセス構造締結（段付きフランジ＋千鳥ボルト）」とし、右側の「車室内側（内装搭載済み）」領域に一切工具を入れず、左側の車外空間からロボットのナットランナーが水平にアプローチして、スレートブルーで描かれた「ボロン鋼ピラー（段付きフランジ）」とライトグレーの「アルミ一体鋳造骨格」をテーパーピンで位置決めしつつ鮮やかなブルーの「千鳥配置ボルト」で締結する精密な金属断面ハッチング図を描く。右パネルの見出しは「公差吸収ギャップシール＆一括ドッキング断面」とし、2つのモジュール結合フランジ間のわずかな隙間を、内部の「過膨張バッフル材」と接合端から均一に押し出されたアンバーオレンジ色の「ウレタン構造用接着シール材」が隙間なく充填する拡大断面と、隣り合う「電気・冷却系フローティング一括結合カプラ」のテーパーガイド噛み合い構造を並べて描く。数式・ギリシャ文字・細かな寸法数値は一切含めず、指定した日本語テキストラベルと精緻なCAD断面線のみで表現する。

図版4：アンボックスド工場における「固定高速多関節ロボ × 重量搬送AMR × Optimus」の適材適所配置とタクトタイム構造図

アスペクト比16:9の横長プレゼンテーションスライド用スマートファクトリー俯瞰ゾーニング図解。純白の背景上に、アンボックスド工場のフロアを左から右へ流れる3つの明確な色分けゾーンでアイソメトリック俯瞰図として描く。左側ゾーン（落ち着いたライトグレー枠）は「前工程・周辺キッティングエリア（有人・人型ロボ協働）」とし、二足歩行ヒューマノイドが円筒形バッテリーセルのトレイ整列と部品箱のピッキングを行う様子を描き、「Optimus（電池セル整列・部品キッティング）」とラベルを付ける。中央ゾーン（鮮やかなアンバー枠の専用走行レーン）は「並列サブライン＆自律搬送バッファ（完全分離レーン）」とし、複数の並列セルからシート搭載済みバッテリーフロアを積載した大型低床搬送車群が合流する様子を描き、「重量可搬AMR（並列セルからの非同期バッファ供給）」とラベルを付ける。右側ゾーン（鮮やかなプロフェッショナルブルー枠の安全柵内）は「100%無人合装＆最終組立25ステーション（10秒タクト目標）」とし、3Dレーザースキャナと大型固定式6軸多関節ロボット群が車外からモジュール群を一括結合して短い直線ラインへ送り出す様子を描き、「固定式高速多関節ロボット群（高剛性合装・主組立）」とラベルを付ける。背景は純白、数式やギリシャ文字は一切使わず、精密な産業機械ディテールと指定日本語ラベルのみで構成されたクリーンなエンジニアリング図解。

参照一次公開資料・特許公報・専門報道出典リスト

1. Tesla, Inc., "TSLA Q3 2026 Update" (October 21, 2026): https://assets-ir.tesla.com/tesla-contents/IR/TSLA-Q3-2026-Update.pdf
2. Tesla, Inc., "TSLA Q2 2026 Update" (July 2026): https://assets-ir.tesla.com/tesla-contents/IR/TSLA-Q2-2026-Update.pdf
3. Tesla, Inc., "Tesla Third Quarter 2026 Production, Deliveries & Deployments" (October 2,

2026): https://ir.tesla.com/press-release/tesla-third-quarter-2026-production-deliveries-and-deployments
4. Stock Analysis, "Tesla (TSLA) Q3 2026 Earnings Call Transcript" (October 21, 2026): https://stockanalysis.com/stocks/tsla/transcripts/712902-q3-2026/
5. Gloom, "Tesla Q3 2026 Earnings Call Summary and Transcript": https://gloom.sh/stocks/tsla/transcripts/q3-2026
6. WIPO Patent Publication WO2024182432A1 (PCT/US2024/017537), Tesla, Inc., "Modular vehicle architecture for assembling vehicles" (Filed February 27, 2024): https://patents.google.com/patent/WO2024182432A1/en
7. US Patent US11979047B2, "Switching module for a charger / busbar assembly": https://patents.google.com/patent/US11979047B2
8. WIPO Patent Publication WO2024072853A1, "Computing tile power and ground busbar layer connectors": https://patents.google.com/patent/WO2024072853A1/en
9. Texas Department of Public Safety (DPS), "Tesla Cybercab 2026+ Emergency Response Guide / CAV Plan": https://www.dps.texas.gov/sites/default/files/documents/highwaypatrol/cav/plans/tesla_cybercab_robotaxi.pdf
10. EVwire, "Tesla reveals first Cybercab unboxed manufacturing video" (September 9, 2026): https://evwire.com/p/tesla-cybercab-unboxed-manufacturing-video
11. Basenor, "Tesla's Unboxed Cybercab Line Targets One Vehicle Every 10 Seconds" (September 7, 2026): https://www.basenor.com/blogs/news/teslas-unboxed-cybercab-line-targets-one-vehicle-every-10-seconds
12. Basenor, "Tesla Cybercab Production Begins at Giga Texas: Inside the April 21 Milestone": https://www.basenor.com/blogs/news/tesla-cybercab-production-begins-at-giga-texas-inside-the-april-21-milestone
13. Basenor, "Tesla Cybercab at 25,000 USD: The Unboxed Strategy Explained": https://www.basenor.com/blogs/news/tesla-cybercab-at-25-000-the-unboxed-strategy-explained
14. GreenDrive, "Tesla Cybercab Production Milestones (February & April 2026)": https://www.greendrive-accessories.com/blog/language/en/tesla-cybercab-production-avril-2026/
15. Cybercab News, "Half the Line: Tesla Shows Unboxed Cybercab Factory": https://www.cybercab.news/article/half-the-line-tesla-shows-unboxed-cybercab-factory
16. Teslarati, "Tesla Cybercab's unorthodox paint process explained" (October 27, 2026): https://www.teslarati.com/tesla-cybercab-unorthodox-paint-process-explained/
17. Teslarati, "Tesla has a Cybercab problem nobody saw coming" (November 12, 2026): https://www.teslarati.com/tesla-has-a-cybercab-problem-nobody-saw-coming/
18. WheelFront, "Tesla's Cybercab Factory Is Too Fast for Its Own Good" (October 27, 2026): https://wheelfront.com/teslas-cybercab-factory-is-too-fast-for-its-own-good-2/
19. TorqueNews, "Tesla Confirms Cybercab Will Feature Plastic Body Panels, Color Injected

While Molding Polyurethane Panels": https://www.torquenews.com/11826/tesla-confirms-cyber-cab-will-feature-plastic-body-panels-will-not-require-painting-instead
20. InsideEVs, "Watch Tesla's Wild 'Unboxed' Manufacturing For The Cybercab In Action": https://insideevs.com/news/807603/tesla-cybercab-unboxed-production-video/
21. FrunkLab, "Tesla's September 8, 2026 video shows the Cybercab built as modules on parallel lines": https://www.frunklab.com/news/cybercab-unboxed-manufacturing-video
22. Assembly Magazine, "Tesla Details 'Unboxed' Assembly Process in Patent": https://www.assemblymag.com/articles/98770-tesla-details-unboxed-assembly-process-in-patent
23. Electrek, "Tesla reveals modular 'unboxed' EV manufacturing process patent": https://electrek.co/2024/09/11/tesla-reveals-modular-unboxed-ev-manufacturing-process-patent/
24. ElectronMotion, "Munro Cybercab Factory Deep Dive" (October 26, 2026): https://electronmotion.com/2026/10/26/munro-cybercab-factory-deep-dive/
25. Gate News, "Tesla Cybercab Teardown Details Modular Battery and New Inverter": https://www.gate.com/news/detail/TSLA/tesla-cybercab-teardown-details-modular-battery-and-new-inverter-25403018
26. Teslarati, "Tesla Cybercab goes on sale for 29,990 USD, slated for December deliveries" (November 2026): https://www.teslarati.com/tesla-cybercab-29990-december-deliveries/
27. MLQ.ai, "Tesla Opens Cybercab Orders at 29,990 USD With a Required 299-a-Month Subscription and December Deliveries" (November 14, 2026): https://mlq.ai/news/tesla-opens-cybercab-orders-at-29990-with-a-required-299-a-month-subscription-and-december-deliveries/
28. Not a Tesla App, "Tesla Q3 2026 Earnings Call Recap: Everything You Need to Know": https://www.notateslaapp.com/news/4867/tesla-q3-2026-earnings-call-recap-everything-you-need-to-know
29. Basenor, "Tesla Cybercab Electrical Architecture: Your Questions Answered" (August 18, 2026): https://www.basenor.com/blogs/news/tesla-cybercab-electrical-architecture-your-questions-answered
30. Assembly Magazine, "Tesla's New Cybertruck Features Modular Wiring": https://www.assemblymag.com/articles/98504-teslas-new-cybertruck-features-modular-wiring
31. Aichie, "Tesla patented a modular wiring system intended to eliminate wiring harnesses and CAN buses": https://www.aichie.com/tesla-patented-a-modular-wiring-system-intended-to-eliminate-wiring-harnesses-and-can-buses_n67
32. Dataintelo, "Automotive Blind Mate Connector Market Report": https://dataintelo.com/report/automotive-blind-mate-connector-market
33. Lowcarb Style, "テスラCybercabが採用した完全ドライ・ブレーキ・バイ・ワイヤ（EMB）を技術分解" (September 6, 2026):

https://lowcarb.style/2026/09/06/tesla-cybercab-dry-brake-by-wire-emb-four-wheel-independent-control/
34. EVwire, "Tesla patents reveal key tech behind the Cybercab's wireless charging pad (WO2024182422A2 & WO2024182405A1)" (August 17, 2026): https://evwire.com/p/tesla-wireless-charging-patents-cybercab-pad
35. Basenor, "Tesla's Wireless Charging Patent: How Foreign Object Detection Works": https://www.basenor.com/blogs/news/teslas-wireless-charging-patent-how-foreign-object-detection-works
36. Teslarati, "Tesla says its Cybercab wireless charging efficiency is 'well above 90%'": https://www.teslarati.com/tesla-wireless-charging-efficiency-above-90/
37. Wins Parking, "Cybercab Charging Depot Design: Layout, Wireless Charging Pads, Power, and Throughput": https://winsparking.com/cybercab-charging-depot-design
38. Industry Arsenal, "Weekly Gigacasting News 41 (Cybercab Castings & Thatcham Repair Study)": https://www.industryarsenal.com/p/weekly-gigacasting-news-41
39. Industry Arsenal, "Weekly Gigacasting News 50 (Tesla Cybercab Rear Castings Update)": https://www.industryarsenal.com/p/weekly-gigacasting-news-50
40. AICircle, "Giga-Casting: The aluminium shot - How Tesla's aluminium revolution turned 70 parts into one shot": https://www.alcircle.com/news/giga-casting-the-aluminium-shot-how-tesla-s-aluminum-revolution-turned-70-parts-into-one-shot-and-rewired-the-global-foundry-industry-118654
41. Asharq Al-Awsat, "Tesla Plans Four New 4680 Batteries in 2026 Including NC05 for Robotaxi": https://english.aawsat.com/technology/5067436-tesla-plans-four-new-batteries-2026-including-robotaxi
42. Wikipedia, "Giga Press": https://en.wikipedia.org/wiki/Giga_Press
43. Wikipedia, "Tesla Cybercab": https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Cybercab
44. IIoT World, "Tesla Optimus in Manufacturing 2026": https://www.iiot-world.com/smart-manufacturing/tesla-optimus-manufacturing-2026/
45. Inside Deep Tech, "Tesla Optimus Humanoid Robot Fremont Production Full Guide": https://www.insidedeeptech.com/tesla-optimus-humanoid-robot-fremont-production-full-guide/
46. The Auto Wire, "Toyota's ELEY Factory Robot: Wheels, Shoulder Blades, and Soft Arms" (September 23, 2026): https://theautowire.com/2026/09/23/toyotas-eley-factory-robot-wheels-shoulder-blades-and-soft-arms/
47. BMW Group PressClub, "BMW Group advances the use of Physical AI in production with Figure 03 project in Spartanburg" (June 2026): https://newsroom.bmwgroup.com/global/bmw-group-advances-the-use-of-physical-ai-in-production-with-figure-03-project-in-spartanburg/
48. Figure AI, "Figure 03 at BMW": https://www.figure.ai/news/f-03-at-bmw
49. Assembly Magazine, "Humanoid Robots Complete Trial Project at BMW Assembly Plant": https://www.assemblymag.com/articles/99678-humanoid-robots-complete-trial-project-

at-bmw-assembly-plant
50. Humanoid Press, "Apptronik Apollo完全ガイド｜71 DOF業界最多・Mercedes/GXO実績" (April 16, 2026): https://humanoidpress.jp/apptronik-apollo/
51. Pasquale Pillitteri, "Gemini Robotics 2.5・Apollo 2・Mercedes工場仕分け実績": https://pasqualepillitteri.it/ja/news/33660/gemini-robotics-2-5-apollo-2-mercedes-kojo
52. iFactoryApp, "Manufacturing Digital Twin Robot Fleet Omniverse MES (OpenUSD & VDA 5050)": https://ifactoryapp.com/industries/manufacturing-plant/manufacturing-digital-twin-robot-fleet-omniverse-mes
53. Ledge.ai, "UBTECH Swarm Intelligence: Walker S1 Factory Training 2.0 at Zeekr": https://ledge.ai/articles/ubtech_walker_s1_zeekr_factory_ai
54. Humanoid Robotics Technology, "UBTECH Launches World's First Multi-Humanoid Robot Training at ZEEKR": https://humanoidroboticstechnology.com/news/ubtech-launches-worlds-first-multi-humanoid-robot-training-at-zeekr/
55. Physical AI Guide, "Robot Safety Standards Working Near People (ISO 10218-1:2025 / ISO 10218-2:2025 / ISO 3691-4:2023)": https://physicalaiguide.com/guides/robot-safety-standards-working-near-people/
56. Harvard Edge CS249r, "Safety Enforcement: ISO 10218-2:2025 & ISO 3691-4": https://harvard-edge.github.io/cs249r_book_dev/vol4/12_enforcement/12_enforcement.html

引用文献

1. Tesla Cybercab Production Begins at Giga Texas: Inside the April 21, https://www.basenor.com/blogs/news/tesla-cybercab-production-begins-at-giga-texas-inside-the-april-21-milestone
2. https://evwire.com/p/tesla-cybercab-unboxed-manufacturing-video
3. Modular vehicle architecture for assembling vehicles - Google Patents, https://patents.google.com/patent/WO2024182432A1/en
4. https://www.dps.texas.gov/sites/default/files/documents/highwaypatrol/cav/plans/tesla_cybercab_robotaxi.pdf
5. Tesla Cybercab's unorthodox paint process explained - Teslarati, https://www.teslarati.com/tesla-cybercab-unorthodox-paint-process-explained/
6. Tesla Cybercab production 2026 : Guide Essentiel - Green Drive, https://www.greendrive-accessories.com/blog/language/en/tesla-cybercab-production-avril-2026/
7. Q3 2026 Update | Tesla, https://assets-ir.tesla.com/tesla-contents/IR/TSLA-Q3-2026-Update.pdf
8. Tesla Cybercab goes on sale for $29,990, slated for ... - Teslarati, https://www.teslarati.com/tesla-cybercab-29990-december-deliveries/
9. Tesla opens Cybercab orders at $29,990 with a required ... - MLQ.ai, https://mlq.ai/news/tesla-opens-cybercab-orders-at-29990-with-a-required-299-a-month-subscription-and-december-deliveries/

10. Tesla Cybercab ownership will come with plenty of strings attached, https://www.teslarati.com/tesla-cybercab-arrives-steep-ownership-fine-print/
11. Tesla Cybercab Electrical Architecture: Your Questions Answered, https://www.basenor.com/blogs/news/tesla-cybercab-electrical-architecture-your-questions-answered
12. https://wheelfront.com/teslas-cybercab-factory-is-too-fast-for-its-own-good-2/
13. ブレーキフルードも配管も全廃。テスラCybercabが採用した「完全, https://lowcarb.style/2026/09/06/tesla-cybercab-dry-brake-by-wire-emb-four-wheel-independent-control/
14. Tesla (TSLA) Q3 2026 Earnings Call Transcript & Audio, https://stockanalysis.com/stocks/tsla/transcripts/712902-q3-2026/
15. https://www.basenor.com/blogs/news/teslas-unboxed-cybercab-line-targets-one-vehicle-every-10-seconds
16. Half the Line: Tesla Shows Unboxed Cybercab Factory, https://www.cybercab.news/article/half-the-line-tesla-shows-unboxed-cybercab-factory
17. Tesla Optimus in Manufacturing: 2026 Data | IIoT World, https://www.iiot-world.com/smart-manufacturing/tesla-optimus-manufacturing-2026/
18. Tesla Cybercab at $25,000: The Unboxed Strategy Explained, https://www.basenor.com/blogs/news/tesla-cybercab-at-25-000-the-unboxed-strategy-explained
19. Tesla (TSLA) Q3 2026 Earnings Call Transcript and Summary - Gloom, https://gloom.sh/stocks/tsla/transcripts/q3-2026
20. Giga Press - Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Giga_Press
21. unknown_url
22. Q2 2026 Update - Tesla, https://assets-ir.tesla.com/tesla-contents/IR/TSLA-Q2-2026-Update.pdf
23. Tesla says its Cybercab wireless charging efficiency is 'well above, https://www.teslarati.com/tesla-wireless-charging-efficiency-above-90/
24. Cybercab Charging Depot Design | Pads, Power & Layout, https://winsparking.com/cybercab-charging-depot-design
25. Tesla Q3 2026 Earnings Call Recap: Everything You Need to Know, https://www.notateslaapp.com/news/4867/tesla-q3-2026-earnings-call-recap-everything-you-need-to-know
26. Tesla Q3 2026 earnings call: replay and key takeaways - Reddit, https://www.reddit.com/r/teslamotors/comments/1xc65pe/tesla_q3_2026_earnings_call_replay_and_key/
27. WO2024182432A1 - Architecture de véhicule modulaire pour l, https://patents.google.com/patent/WO2024182432A1/fr
28. Tesla Cybercab Unboxed Process: 10-Second Cycle Time - FrunkLab, https://www.frunklab.com/news/cybercab-unboxed-manufacturing-video
29. Weekly Gigacasting News 50, https://www.industryarsenal.com/p/weekly-gigacasting-news-50
30. Weekly Gigacasting News 41,

https://www.industryarsenal.com/p/weekly-gigacasting-news-41
31. Tesla wireless charging patents reveal dual-voltage Cybercab pad, https://evwire.com/p/tesla-wireless-charging-patents-cybercab-pad
32. Tesla Cybercab Complete Guide 2026｜香川友志 - note, https://note.com/kagawatomo/n/n76246d404c1d?hl=en
33. Tesla Plans Four New Batteries in 2026, Including for Robotaxi, https://english.aawsat.com/technology/5067436-tesla-plans-four-new-batteries-2026-including-robotaxi
34. Tesla Confirms the Cyber Cab will Feature Plastic Body Panels, https://www.torquenews.com/11826/tesla-confirms-cyber-cab-will-feature-plastic-body-panels-will-not-require-painting-instead
35. Tesla Cybercab - Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Cybercab
36. Cybercab Factory Tour: 25 Stations and No Paint Shop, https://electronmotion.com/2026/10/26/munro-cybercab-factory-deep-dive/
37. Tesla's robotaxi fleet hits 970, versus Waymo - EV Select (EVSelect), https://evselect.com.au/articles/cybercab-1000-waymo-munro-robotaxi-outlook
38. Tesla's New Cybertruck Features Modular Wiring | ASSEMBLY, https://www.assemblymag.com/articles/98504-teslas-new-cybertruck-features-modular-wiring
39. Wiring Harness manufacturing,Custom car wiring harness, https://www.aichie.com/tesla-patented-a-modular-wiring-system-intended-to-eliminate-wiring-harnesses-and-can-buses_n67
40. Designing an integrated joint module for battery pack serviceability, https://eureka.patsnap.com/report/designing-an-integrated-joint-module-for-battery-pack-serviceability
41. US11979047B2 - Busbar contactor matrix module - Google Patents, https://patents.google.com/patent/US11979047B2
42. Structural busbar for power delivery in computing system, https://patents.google.com/patent/WO2024072853A1/en
43. Automotive Blind Mate Connector Market Size, Share & Forecast, https://dataintelo.com/report/automotive-blind-mate-connector-market
44. Inductive Wireless Charging System & Mat for Cybercab Robotaxi, https://www.cybercabrobotaxiforum.com/inductive-wireless-charging-system-mat-for-cybercab-robotaxi-first-look/
45. Tesla Files Patents for Wireless Charging the Robotaxi, https://www.notateslaapp.com/news/2247/tesla-files-patents-for-wireless-charging-the-robotaxi
46. Tesla Promises "Well Over 90%" Efficiency for the Cybercab's, https://www.autoevolution.com/news/tesla-promises-well-over-90-efficiency-for-the-cybercab-s-induction-charging-system-241591.html
47. Tesla's Wireless Charging Patent: How Foreign Object Detection, https://www.basenor.com/blogs/news/teslas-wireless-charging-patent-how-foreign-object-detection-works
48. "Our new reaction injection molding (RIM) process shrinks Cybercab, https://www.reddit.com/r/teslamotors/comments/1w6dhu8/tesla_our_new_reactio

n_injection_molding_rim/
49. Tesla Optimus Skills Packages (2026): What It Can Do - optimusk.blog, https://optimusk.blog/blog/tesla-optimus-skills-packages/
50. Tesla Optimus Production Timeline: 2025, 2026 & Beyond - Optimusk, https://optimusk.blog/blog/tesla-optimus-production-timeline/
51. Tesla Optimus: Full Guide to Production, Gen 3 and Limits, https://www.insidedeeptech.com/tesla-optimus-humanoid-robot-fremont-production-full-guide/
52. Toyota's ELEY Factory Robot: Wheels, Shoulder Blades and Soft Arms, https://theautowire.com/2026/09/23/toyotas-eley-factory-robot-wheels-shoulder-blades-and-soft-arms/
53. Toyota to Invest ¥1 Trillion Annually, Deploying ... - BigGo Finance, https://finance.biggo.com/news/95cced7a-a72e-4322-9589-1c3d00c82f65
54. Toyota Has Workers Train Humanoids for a 400000-Robot Upgrade, https://superpowerdaily.com/posts/toyota-has-workers-train-humanoids-for-a-400-000-robot-upgrade
55. F.03 Arrives at BMW - Figure AI, https://www.figure.ai/news/f-03-at-bmw
56. BMW GROUP ADVANCES THE USE OF PHYSICAL AI IN, https://newsroom.bmwgroup.com/global/bmw-group-advances-the-use-of-physical-ai-in-production-with-figure-03-project-in-spartanburg/
57. Many Workers Fear Robots Will Replace Them. But an AI Startup is, https://www.ibtimes.com/figure-ai-overnight-robot-coordinator-job-3809617
58. Humanoid Robots Complete Trial Project at BMW Assembly Plant, https://www.assemblymag.com/articles/99678-humanoid-robots-complete-trial-project-at-bmw-assembly-plant
59. グーグルがGemini Robotics 2.5を発表、人型ロボットがメルセデス, https://pasqualepillitteri.it/ja/news/33660/gemini-robotics-2-5-apollo-2-mercedes-kojo
60. Apptronik Apollo完全ガイド｜71 DOF業界最多・Mercedes/GXO実績, https://humanoidpress.jp/apptronik-apollo/
61. Manufacturing Plant Digital Twin with Robot Fleet - iFactory AI, https://ifactoryapp.com/industries/manufacturing-plant/manufacturing-digital-twin-robot-fleet-omniverse-mes
62. Manufacturing and Logistics Primer: Factory and Warehouse Robots, https://www.atomgigs.com/manufacturing
63. UBTECHのヒューマノイド「Walker S1」、EV工場で大規模協働, https://ledge.ai/articles/ubtech_walker_s1_zeekr_factory_ai
64. UBTech Humanoids Clock In: Walker S1 Robots Deployed at Zeekr, https://www.humanoidsdaily.com/news/ubtech-humanoids-clock-in-walker-s1-robots-deployed-at-zeekr-factory-for-collaborative-tasks
65. UBTECH Pioneers the World's First Multi-Humanoid Robot, https://ai-watch.jp/english/11136/
66. Walker S1 by UBTECH Robotics - RoboBoom, https://roboboom.com/robot/ubtech-robotics/walker-s1
67. Giga-Casting: The aluminium shot - How Tesla's ... - AL Circle,

https://www.alcircle.com/news/giga-casting-the-aluminium-shot-how-tesla-s-aluminum-revolution-turned-70-parts-into-one-shot-and-rewired-the-global-foundry-industry-118654
68. Toyota: Enterprise AI Deployment Profile | Imagine, https://imagine.ai/research/toyota
69. BMW Figure 03 Humanoid Robot Joins Spartanburg Plant - BMW Blog, https://www.bmwblog.com/2026/06/26/bmw-figure-03-humanoid-robot-spartanburg-plant/
70. BMW Puts Figure 03 to Work Sorting Parts on the Spartanburg, https://www.techeblog.com/bmw-figure-03-robot-spartanburg-factory/
71. BMW Deploys Humanoid Robot That Sees With Its Hands on the, https://www.autoevolution.com/news/bmw-deploys-humanoid-robot-that-sees-with-its-hands-on-the-floor-of-american-spartanburg-facility-272091.html
72. Humanoid Robot Will Sort Components at BMW in the Future, https://www.all-about-industries.com/humanoid-robot-sorts-components-at-bmw-in-the-future-a-5d9ecf881dc1a7d041d1728589a3a2ed/
73. 自律物理エージェント／ロボット+AI融合の完全ガイド2026年版, https://www.dri.co.jp/auto/report/ings/ings-Physical-AI-Playbook.html
74. UBTech Swam Intelligence - Zeekr Factory Automation with ... - Reddit, https://www.reddit.com/r/singularity/comments/1j2gbd4/ubtech_swam_intelligence_zeekr_factory_automation/
75. Robot Safety Standards for Working Near People - Physical AI Guide, https://physicalaiguide.com/guides/robot-safety-standards-working-near-people/
76. Physical AI - GitHub Pages, https://harvard-edge.github.io/cs249r_book_dev/vol4/12_enforcement/12_enforcement.html
77. RoboOps — The Ops Atlas | xOps School, https://www.xopsschool.com/roboops/