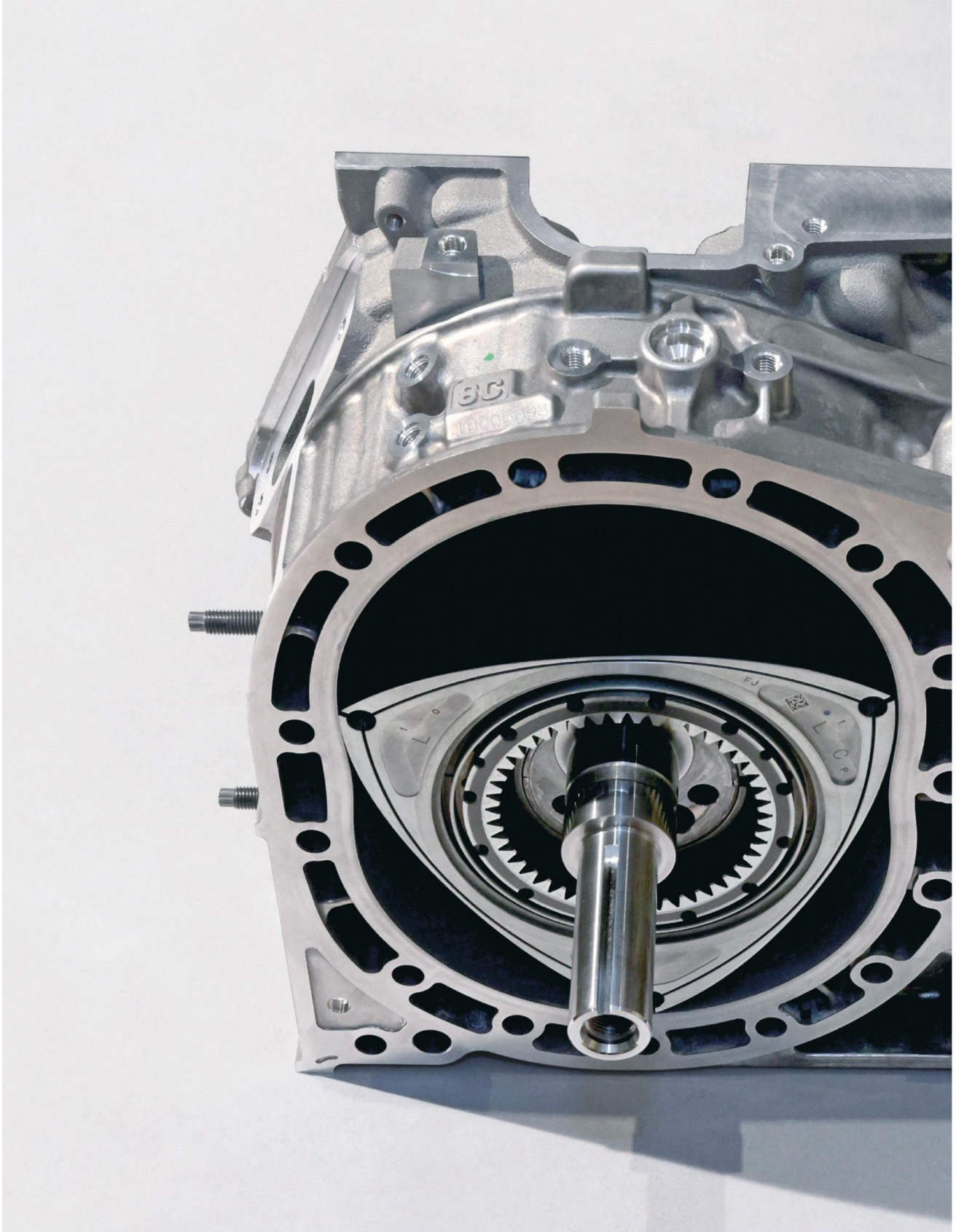


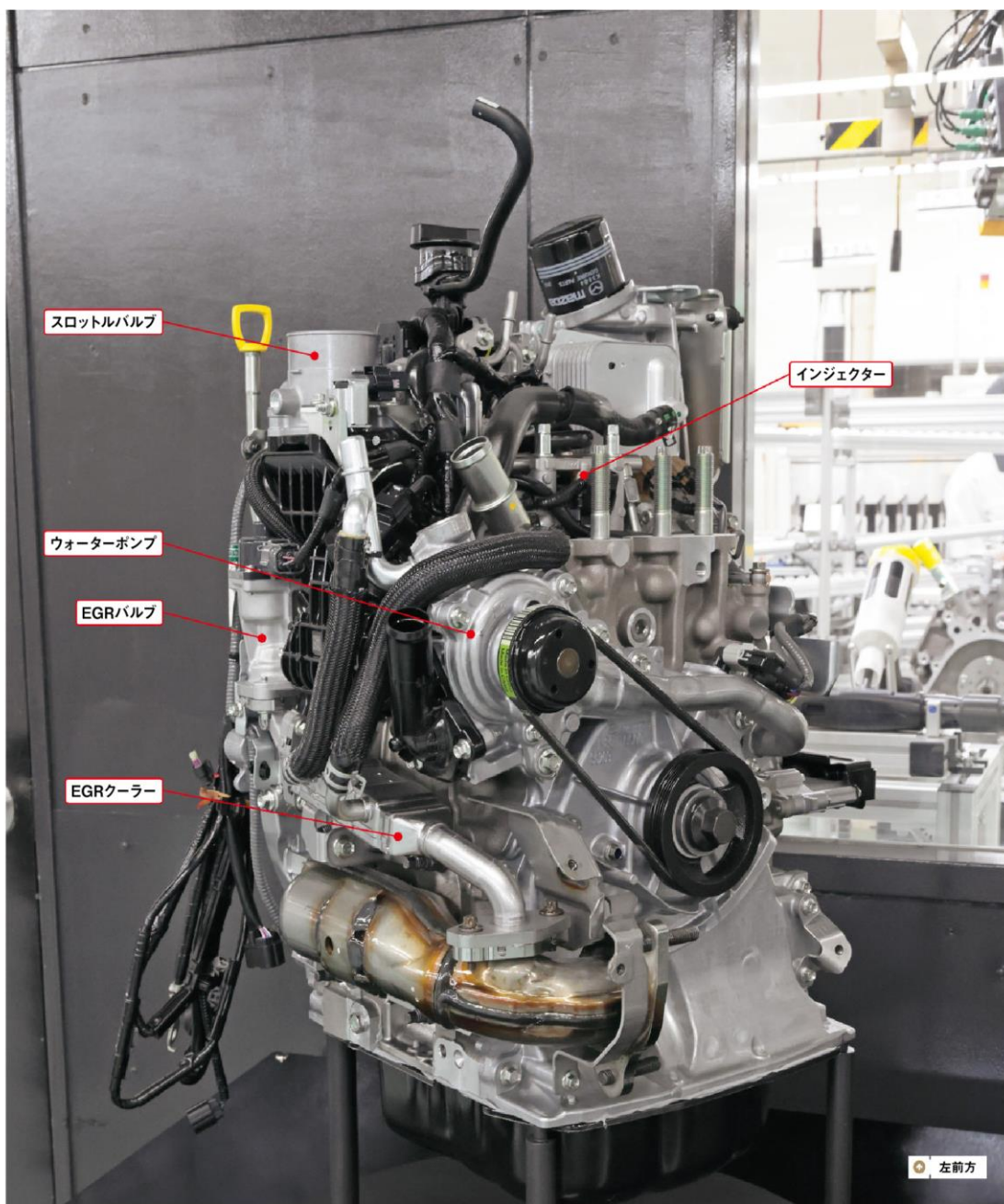
まさかのロータリーエンジン復活である。
2023年現在はエンジンそのものの存続すら危ぶまれているという状況で、
マツダは燃費性能や排出物規制に対応しきれず一度は市場から退場したREを再投入した。
しかも完全新設計の新型機種、もちろん冠はSKYACTIVである。
使い方はシリーズハイブリッドのための発電機駆動用原動機。
AVLもかつて、同様の方向性でREを仕立てたことがあったがあくまで試作、
マツダはシステムとしてこれを投入、市販車に載せてきた。
電動化の大きな波に乗った新しいRE。なぜこれを新たに採用したのか、
レシプロ機に対するメリットはどこにあるのか、
巨大な投資を伴う新型機であり回収は見込めるのか。興味は尽きない。
世界中の注目を浴びる8C型ロータリーエンジン。これを掘り下げてみる。

PHOTO:山上博也(Hiroya YAMAGAMI)

Wankel rotary engine comes back!

新世代ロータリー マツダ8C 完全解説

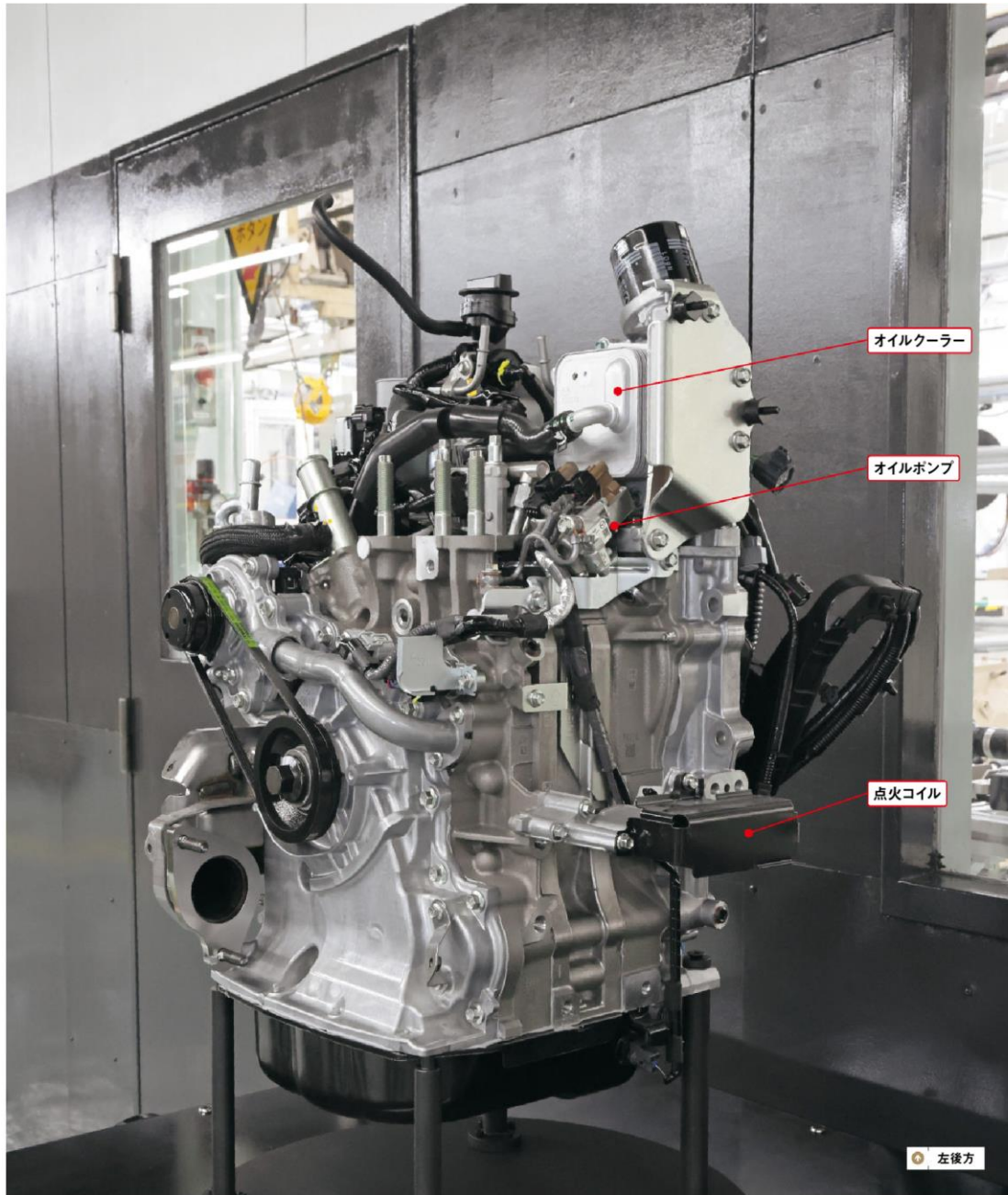




世界よ、これが8Cだ。

ハイブリッドユニットの展示は既になされていたe-SKYACTIV R-EVだったが、カットモデルということもあり、エンジンの詳しい様子はそこから伺えなかった。今回、初めて全容を眺めることができた。各方向からご紹介しよう。

TEXT:MFI PHOTO:山上博也(Hiroya YAMAGAMI)/MFI



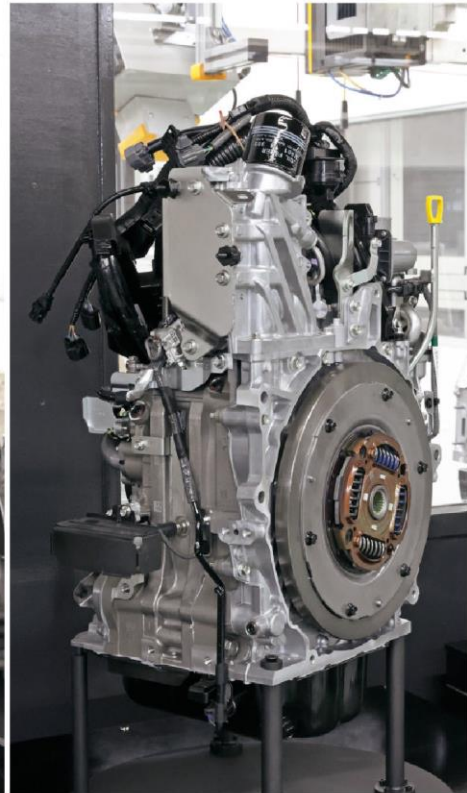
初めて目の当たりにした実機は思ったより大きかった。しかしよく眺めれば、補機類が上に載っているため、それを除くと立方体のようにコンパクトな体躯であることが見て取れた。

マツダにとって新しいロータリーエンジン、世代からすれば「2」になるだろうか。8Cと名付けられた新型機は、レシプロエンジンで世界の度肝を抜いたSKYACTIVコンセプトを多々盛り込み、熱効率を追求した意欲作である。ロータリーエンジンといえば巨大で扁平、しかも移動する燃焼室によって冷却損失に難があり、ど

うしても熱効率に劣りがち——というのがこれまでの見立てだったが、8Cはシリーズハイブリッド用の発電専用機（じつはDHE：市販車のハイブリッド専用エンジンとしては日産のHR14DDeと並んで世界初レベルだろう）とすることで、運転領域を高効率点に寄せることができているものと思われる。燃焼技術についてもマツダお得意のMBD：モデルベース開発を駆使、複雑なRE燃焼の振る舞いを高度に解析、直噴技術と合わせて高速燃焼を実現している。

初搭載モデルはMX-30。マツダ車の中でも先

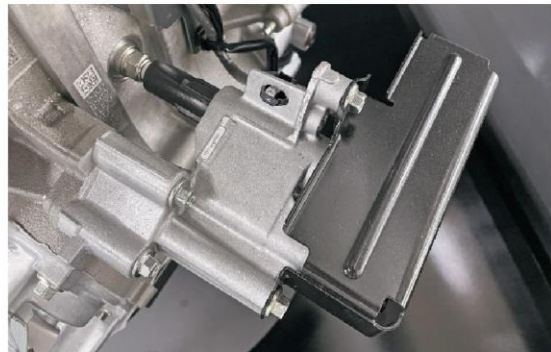
鋭的な役割を担う車種で、REを用いるシリーズHEV第一弾としてはいかにも適役。同車に載せるということからパワートレインは横置き式で、8Cはこれまでの13Bと異なり初めて横置きREになる。2室だった13Bに対して1室（シングルローター）の8Cは、相対的に大きく重たくなったひとつのローターが高速で回転するという点で、振動対策は難しそうな印象。通常の横置きパワートレインとは異なり、従来の変速機構（車両左方）にエンジンが載るというレイアウトもユニークだ。

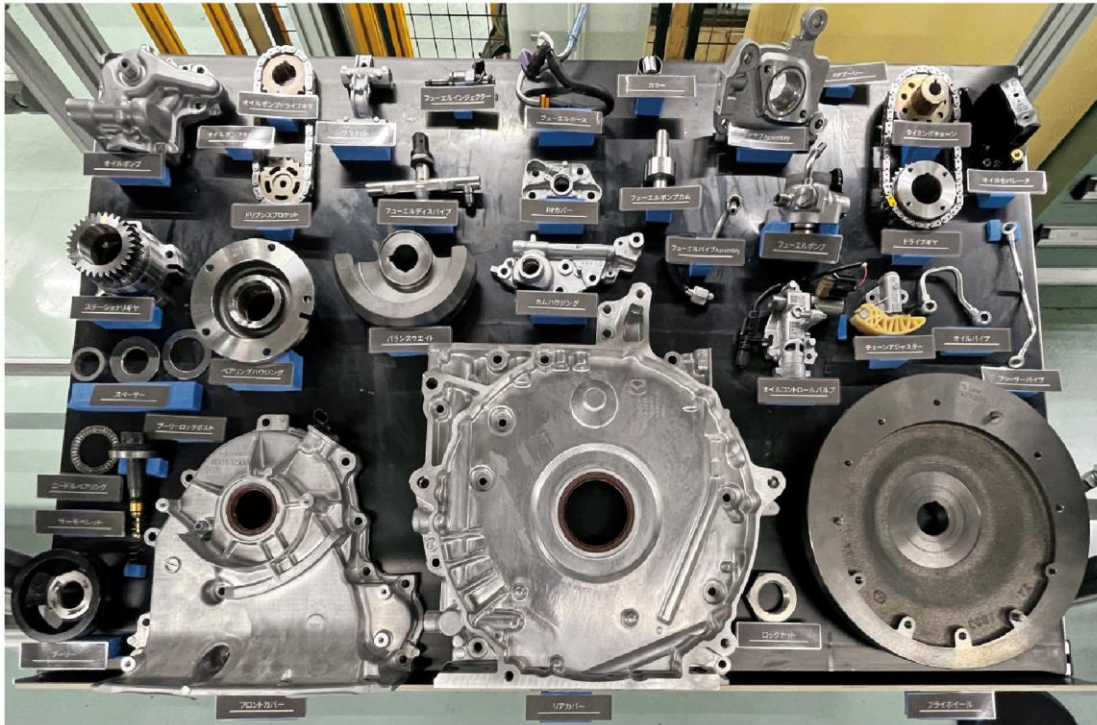


出力軸側

↑ 補機の搭載が少ない後方から眺めるとコンパクトさが伝わる。ハウジングの上に乗るのは本体後側がオイルポンプ関連、前方はスロットルバルブを含めた燃料吸気関連。直噴を採用したこともあり、作動室に直接オイルを送るREにとって潤滑には苦勞が伴ったようだ。排気は前下方から排出、90度折れて後方へ送る配管構成。触媒を含む排気管の実物は確かめることができなかった。発電機との結合には振動抑制のためのダンパーが設けられているのが見られる。

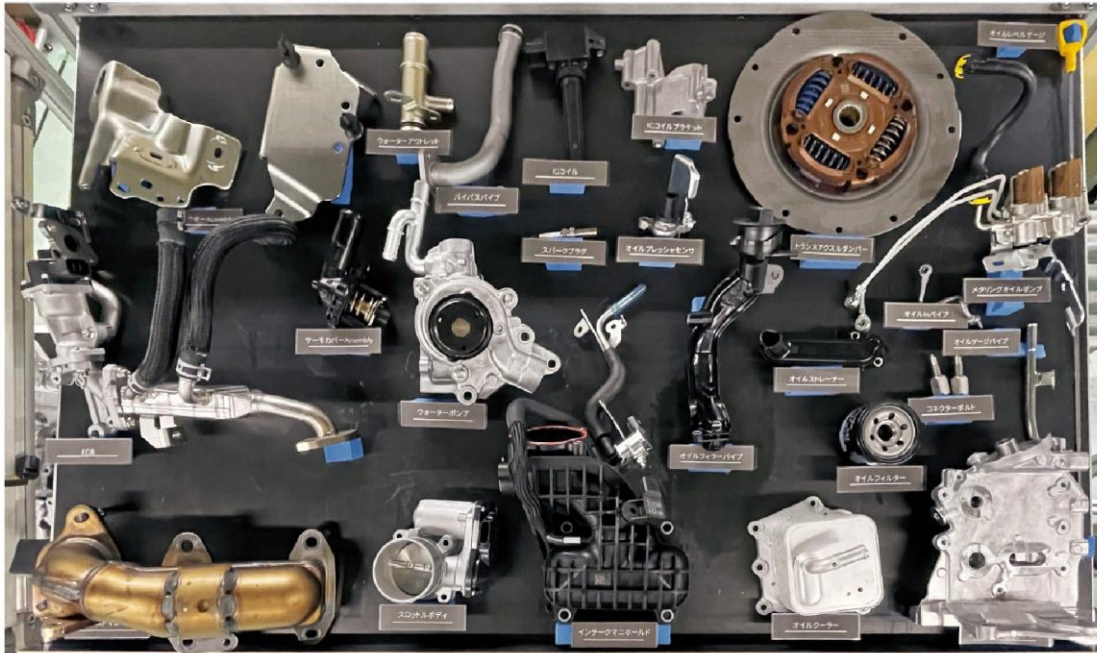
↓ (下) 排気マニフォールド。触媒との接合フランジ直前にはEGR分流管が備わっていた。EGRは水冷式のクーラーを介して吸気管に運流する。(右) 点火コイルと点火プラグ。13BまでのREはリーディング/トレーリングの2本の点火プラグを備えていたが、8Cは1本とした。RE用の特殊形状の点火プラグを用いるのだろうか。(右下) 直噴まわり。2本のボルトで留められているのが燃料レールで、その間の下にインジェクターが備わる。





↑ エンジン本体に装着する部品群。REの部品点数の少なさがここからも理解できる。フライホイールはボルトフランジを見てもおわかりのように偏心構造。バランスウェイトとの合わせ技でユニット振動を抑えるのだろう。直噴のための燃料ポンプは高圧を要することからギヤ+チェーン駆動に頼るのはレシプロ同様。オイルポンプも別軸でギヤ+チェーン駆動としている。

↓ こちらは補機類。レシプロエンジンではEGR流通によってポンピングロスの低減を図り高効率運転とするが、BCではEGRを混合気温度の低下に用いるのだろうか。具体的な説明はなかった。潤滑系統は水冷式のオイルクーラーを一体化したシステム。オイルポンプ本体から2本の供給管が伸びているのが見て取れる。これをハウジング上方、燃料インジェクター手前に接続する。



ロータリーエンジンの解説に必ず出てくる単語が、トロコイド (trochoid) 曲線だ。元々の意味は「ひとつの円が、任意の曲線上の軌道を滑らずに転がっていく際に、円に固定されたある1点が描く軌跡」であり、動きは複雑に見えるがこの曲線は幾何学的に計算することができる。この曲線に正確に沿うようにアウター/インナーのふたつのローターを組み合わせれば、シールしながら可変容積を作り出すことが可能であり、オイルポンプなどで採用事例は古くから多く見られる。

つまりトロコイド曲線とはロータリーエンジンだけに活用されるものではなく、あくまでも回転運動によって生成される軌跡のひとつ。円の中心から離れた1点が回転によってどのような位置を移動していくのかを表しているものだ。

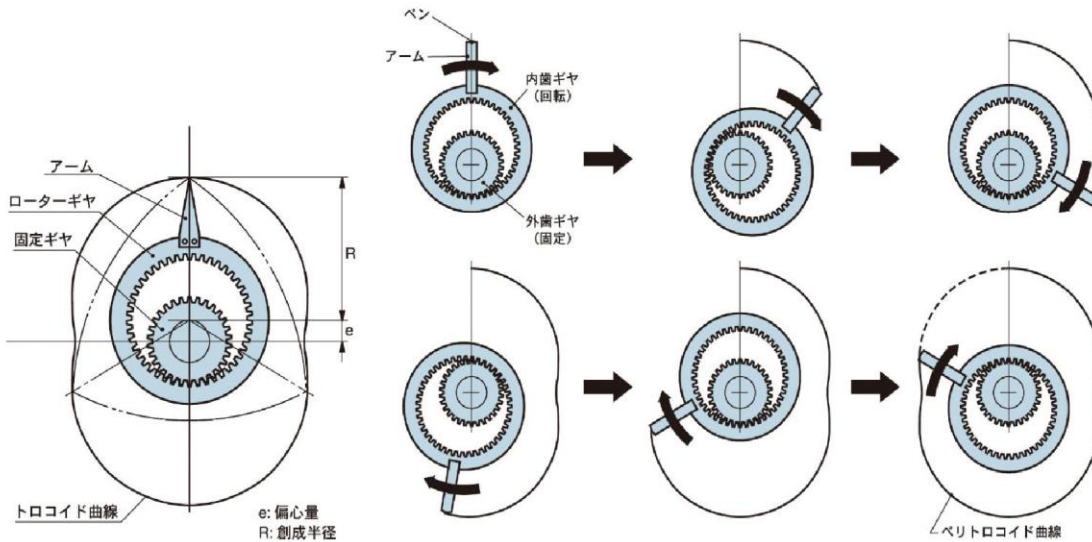
このトロコイド曲線を内燃機関に用いたのがロータリーエンジンである。ピストンを使った一般的な往復運動型の内燃機関と異なり、円運動をそのまま駆動力として取り出せる原動機として、16世紀後半にはすでにロータリーエンジ

ンの始祖ともいえるものが文献に登場し、数多くの研究者が様々なアイデアを競う時代があった。しかし1957年にドイツ人のフェリックス・バンケル博士が三角形のローターを用いたバンケル型エンジンを完成させるまで、実用化された例は皆無だった。

バンケル博士はさまざまなロータリーエンジンの検討案を研究、解析し、最適なトロコイド形状を誕生させた。もともとは航空機用エンジンの回転式バルブや過給機の気密シーリングの研

バンケル型ロータリーのふたつの節を持つペリトロコイド曲線

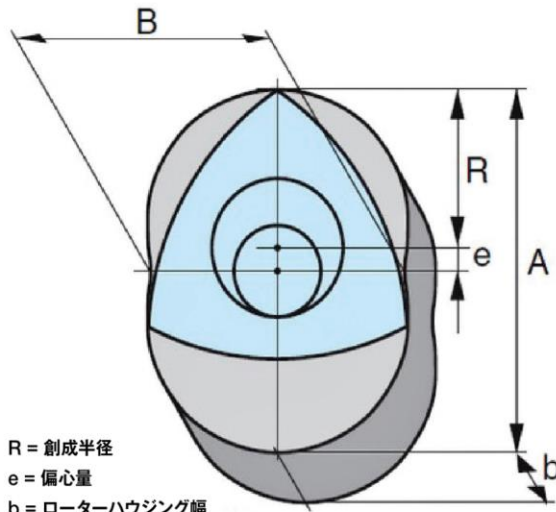
シミュレーションがまだ成熟していない時代にバンケル博士のチームが考案したトロコイド曲線の作り方を下の図版に示す。中央に外歯ギヤを固定し、これに内歯を持つローターギヤを噛み合わせる。ローター形状に合わせたサイズのアームにペンを組み合わせて回転させると、このペンがまゆ型のトロコイド曲線を描き出すという仕組みだ。ハウジングの内側にあるトロコイド室は常に3つの作動室にローターで仕切られており、この作動室が回転によってハウジング内を“移動”しながら容積を増減させていく。



トロコイド曲線とは何か

ハウジング内をローターが偏心回転運動することで出力を生み出すロータリーエンジン。この際にローターの頂点が移動する軌跡を結んだ、楕型のラインがトロコイド曲線だ。複雑な運動に見えるがこれらの作動はすべて、幾何学計算で導き出される必然のうえに成り立っている。

TEXT:MFI FIGURE:MAZDA/熊谷敏直 (Toshinao KUMAGAI)

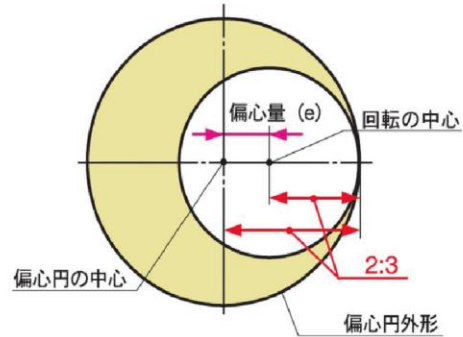
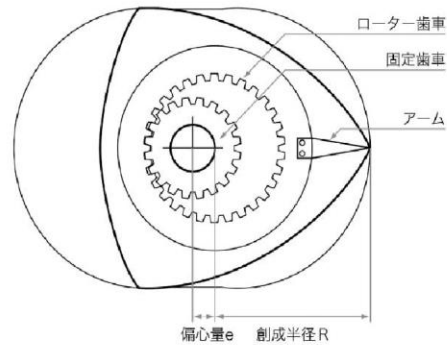


R = 創成半径
 e = 偏心率
 b = ローターハウジング幅
 A = トロコイド長軸長さ [$2(R+e)$]
 B = トロコイド短軸長さ [$2(R-e)$]
 VH = 行程容積

$$VH = 3\sqrt{3}R'e b$$

複雑な形状の作動室を持つロータリーエンジンの排気量の計算

前述したようにトロコイド曲線は幾何学的に導かれた定数に従ったものであり、上の図のように式は複雑になるが工程の容積は計算によって算出できる。この計算で導かれた最大容積から最小容積を引いたものがロータリーエンジンの排気量となる。創成半径とはローター中心と頂点を結んだ数値で、偏心率は偏心円の中心から回転の中心までの数値。8Cロータリーエンジンは創成半径も偏心率もマツダが長らく続けてきた過去のユニットから一新したオールニューの設計だ。偏心率は長くなっており、通常のレシプロエンジンでいうところのロングストローク化を図っている。



究を行ってきた豊富な経験を存分に発揮した成果ともいえるだろう。ハウジングと、おむすびに似た三角形のローターとの間で形成された作動室の中で混合気を燃焼させ、この膨張圧力がローターを回して回転力を発生させるわけだが、この行程にはハウジング内周がトロコイド形状となっていることが求められる。仮に真円形状のハウジングに三角形のローターを入れたとしよう。この場合、回転しても作動室の容積は変わらず、混合気に点火しても圧力はローター中心方向に働いただけで回転運動には繋がらない。

しかし、トロコイド形状のハウジングと偏心軸であるエキセントリックシャフトに取り付けられたローターを組み合わせることで、作動室には1回転あたり2回の容積変化が生まれ、吸入、圧縮、膨張、排気という内燃機関の行程が可能となる。三角形のローターがハウジング内で偏心回転運動を行ない、少ない部品点数でスムーズな運動を実現するバンケル型ロータリーエンジン、その作動を支えるのがトロコイド曲線だ。

8C型ローターのペリトロコイド曲線

Time = 240.01 [deg]

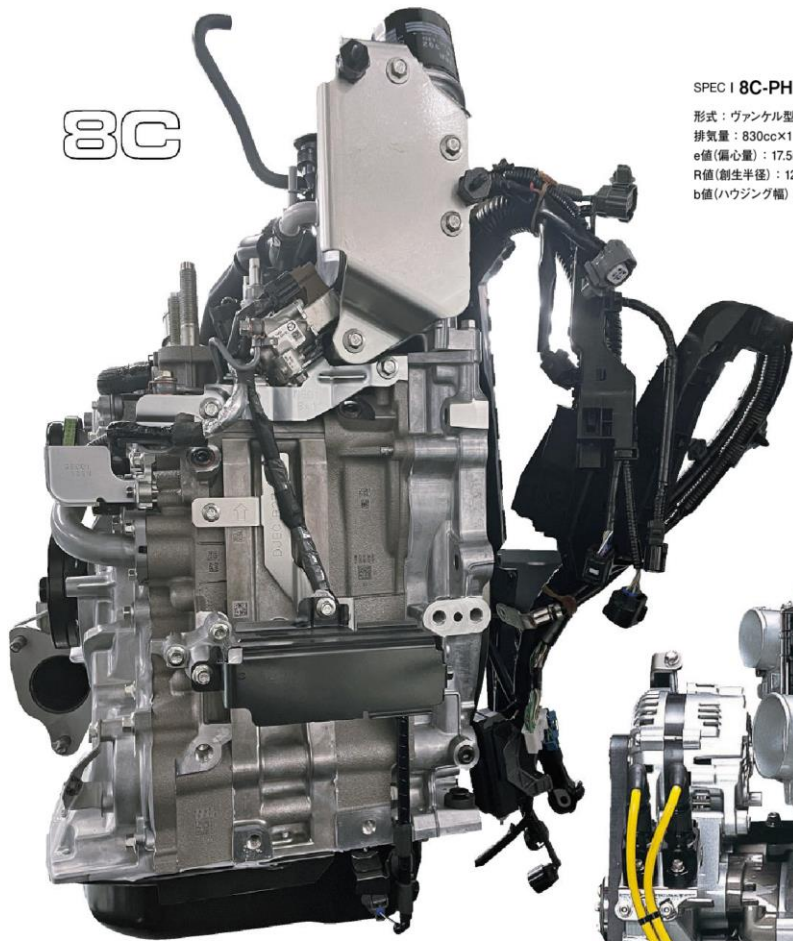
右の図版は8Cユニットのハウジングとローター形状。MX-30のBEVモデルと共通の車体フレームに搭載可能であること、求められる出力特性を考慮してRX-8に搭載されていたRENESIS 13Bエンジンから創成半径は15mm拡大された120mmに設定。偏心率は17.5mmで、これらはゼロベースで検討し決定した数値だが、13Aの数値ときわめて近かったのでトロコイド形状は13Aと同じ諸元を選び、迅速な開発につなげた。とはいえ、その他の技術要素は大幅に進化しているので[C]を名乗っている。排気量は13Bの654ccから830ccとなった(RX-8は2ローターだが)。



13Bと8C、新旧比較

先代13B型は、マツダ初のRE・10A型から基本設計を踏襲したベテランユニットだった。そこからすべてを刷新し登場を果たした8C型。両者をともに眺める機会に恵まれた。部品点数の少なく相似形に見えるふたつのRE、その違いを確かめてみる。

TEXT:世良耕太(Kota SERA) PHOTO:山上博也(Hiroya YAMAGAMI)



8C

SPEC | 8C-PH

形式：ファンケル型1ローター
 排気量：830cc×1
 e値(偏心量)：17.5mm
 R値(創生半径)：120.0mm
 b値(ハウジング幅)：76mm

圧縮比：11.9
 最高出力：53kW/4500rpm
 最大トルク：112Nm/4500rpm
 燃料供給装置：直接噴射
 吸気ポート形式/総数：サイドポート/2
 排気ポート形式/総数：サイドポート/2

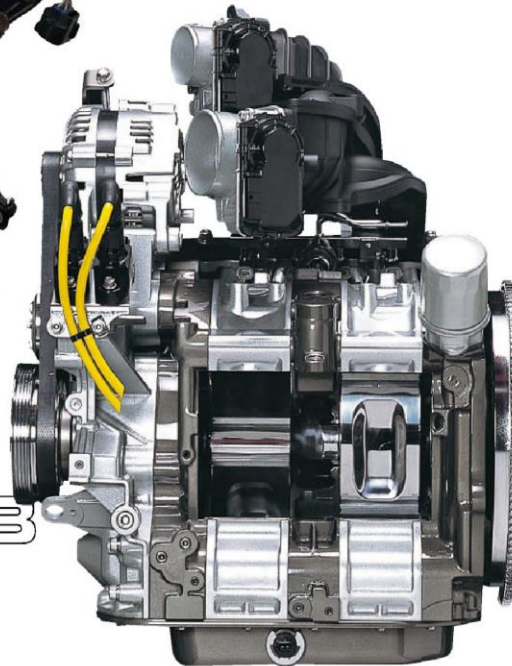
SPEC | 13B-MSP 高出力版

形式：ファンケル型2ローター
 排気量：654cc×2
 e値(偏心量)：15.0mm
 R値(創生半径)：105.0mm
 b値(ハウジング幅)：80mm
 圧縮比：10.0
 最高出力：184kW/8500rpm
 最大トルク：216Nm/5500rpm
 燃料供給装置：ポート噴射
 吸気ポート形式/総数：サイドポート/4
 排気ポート形式/総数：サイドポート/2

横置きシングルと縦置き2ローター

8Cはシングルローターの横置きで、写真は車載状態で後方から眺めたところ。左側上部に12Vバッテリーのためのスペースを空けている。幅方向に搭載制約があるなかでスリムに設計。向かって右側にジェネレーターが位置。EGRクーラー(前面に搭載)を適用しているのが13Bとの大きな違い。左側中段に覗いているのは水配管。吸排気系は前面に配置されており、排気管の出口が左側に覗いている。8Cの前身にあたる13Bは2ローターで縦置きレイアウト。向かって右側が車両後方。

13B



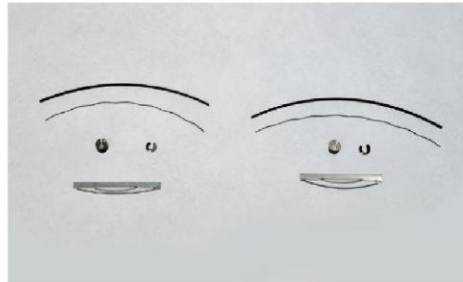
ローター

8Cで76mm厚、13Bで80mm厚のローターフランクには煤が付いても剥がれにくくするカーボンコーティングが施されている。シールに噛み込まないようにするため、13Bの時代はアベックスシール部までコーティングすることはできなかったが、技術進化により8Cはアベックスシールぎりぎりまでコーティングできるようになった。8Cのローターリセスはリーディング側に偏っているが、これは燃焼を早く立ち上げて終わらせるため、13Bは対称形のリセスが中央に位置している。

↓ 左が8Cのローター、右が13Bのローター。並べてみると、大きさの違いがよくわかり、回転バランスの影響がよりシビアになるのも理解できる。ローターの3つの頂点の側面にある凹みは回転バランスを取るために削った痕（詳細はP032）。



上からサイドシール、コーナーシール、アベックスシール。左が13B、右が8C用。8Cのコーナーシールの直径は13Bと同じだが、アベックスシール（13Bは2.0mm、8Cは2.6mm）をはめる溝の幅異なる。コーナーシールを留めるスプリングは同一だそう。



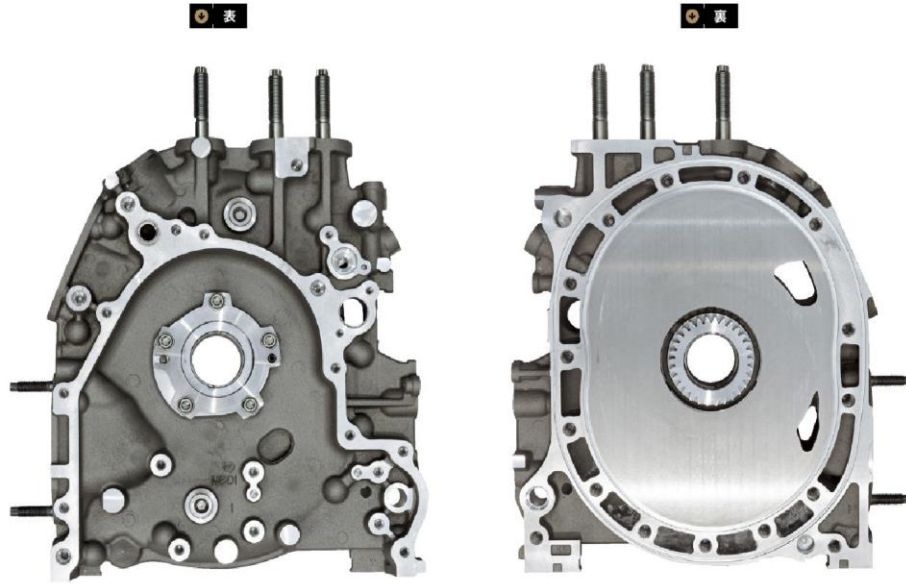
エキセントリックシャフト

レシプロエンジンのクランクシャフトにあたるエキセントリックシャフト（出力軸）の材質は同じ。上が8C、下が13Bで、ひときわ太い部分がロータージャーナル部。2ローター→シングルローター化にともない、ローターを冷却するためのオイルジェットの見直しをした。2ローターの場合はインターミディエイトハウジングがあるので孔位置の選定に比較的自由度があったが、8Cは位置取りが厳しく、なんとか角度をとった格好。



軸受部の潤滑やローター内部の潤滑のために、シャフト内部にオイル通路が設けられている。13Bはフロント側とリヤ側からオイルを流していたが、8Cはフロント側からしか流していない。ジャーナル側面の穴は肉抜き&バランス取り用。

8C

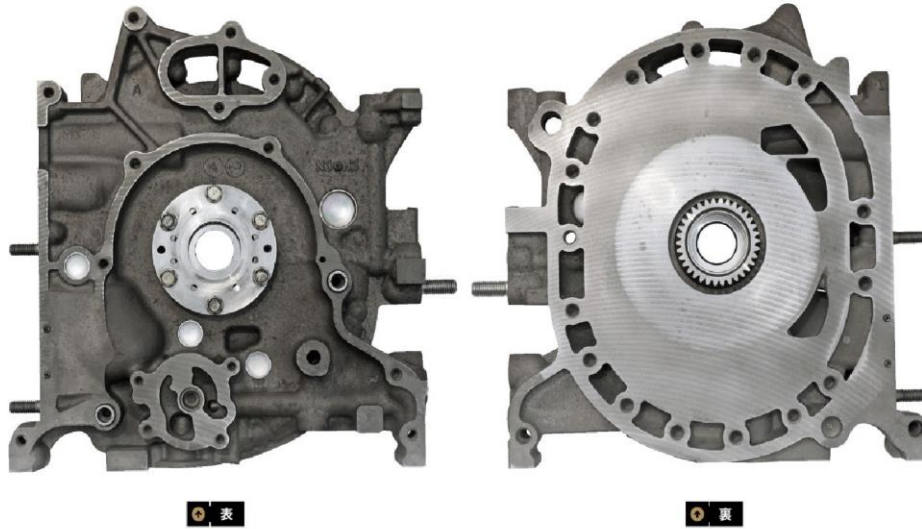


8Cのフロントサイドハウジングは車載状態で最も左側に位置。上部に見える3本のピンはSKYACTIVエンジンと同じ考えだとすれば、車体側への組み付け時にロケーターの役割を果たす。ピンが長いと早めに位置決めできるため、パワートレーンの周囲にあるコンポーネントの搭載をパワートレーン側に干渉させることなく寄せることができる。

Front housing
フロントハウジング

前ページのローターの比較写真から推察できるように、サイドハウジングのサイズもローターのサイズに比例。8Cのほうがだいぶ大きい。寸法以外の最大の違いは材質で、13Bが鋳鉄なのに対し、8Cはアルミ。材料の違いだけで大幅な軽量化を図っているし、狭いモータールームに収めるため薄く設計。ポート断面は縦長形状とし流路を確保。

13B



表

裏



13Bと相似形ではなく、冷却水路は見直している。13Bがポート噴射なのに対し8Cは直噴なので、インジェクターホールがハウジング中央部付近に位置する。圧縮行程でアベックスシールが通過するので、穴はあまり大きくしたくない。

サイドハウジングの真骨頂はローター摺動面に施したサーメット溶射(詳細はP033)。1991年のル・マン24時間レース優勝車、マツダ787BのR26Bにも適用されている。当時の技術と「つながっている」と担当技術者。レース用一品生産と量産では要求される耐久性や生産技術は異なる。「裏」の左上がカットされているのは、搭載に合わせて吸気流れをスムーズにするため。

Rotor housing

ローターハウジング

Rear housing

リヤハウジング

13Bの点火プラグは2本で、向かって右側側面のトレーリング側とリーディング側に配置。8Cは1本で、ほぼセンターに位置。プラグホールを小さくするため、プラグ取り付けねじ径は13BのM14に対し、8CはM12とした。

鋳鉄製サイドハウジングの中心部は耐久性を確保するためのガス軟窒化処理が施されている。吸気はメインポートに加え補助ポートが設けられているのも13Bの特徴(ローターは時計回りに回転)。13Bが狙ったのは高出力だったのに対し、8Cは高効率を狙っている。レシプロエンジンのバルブタイミングとリフトに相当する吸排気ポートの形状は狙いの違いを反映。



表

裏



Component Analysis

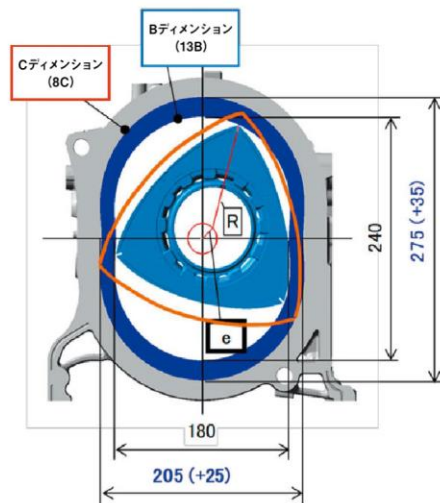
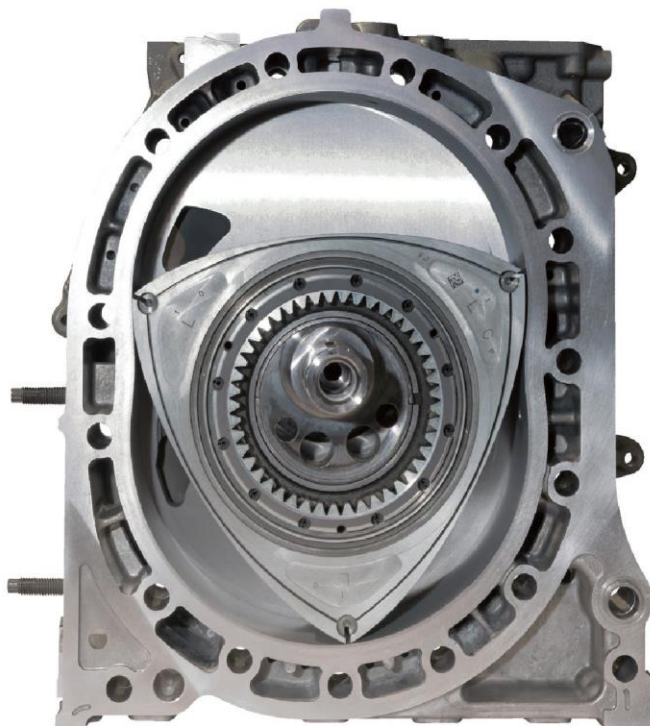
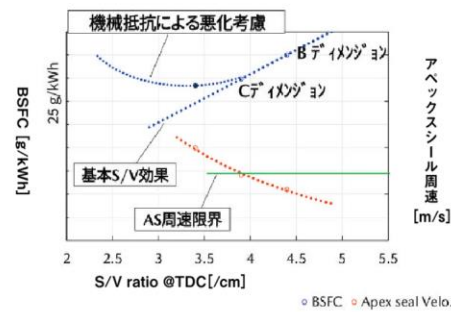
8C構造、徹底解剖

Dimension | ゼロベース設計

issue REの熱効率を高めたい

ピストンが上下するレシプロICEにはS/V比=ストローク/ボア比という諸元がある。ピストン行程長÷シリンダー直径であり、1を超えるとストロークのほうがボアより大きいロングストロークICEということになる。この数字はシリンダー内表面積にも影響し、表面積が小さいほうが冷却損失が少なくなるから、設計者は「その

ICE]に合ったS/V比を選ぶ。右のグラフにあるように、従来のBディメンションREよりもロングストローク側に振り、同時に機械抵抗による燃費悪化が起きないギリギリのところまで3.9弱というS/V比に設定した。REが誕生して以来初めてのディメンジョン変更。ねらいはBSFC(正味燃料比率)の改善、つまり燃費向上である。

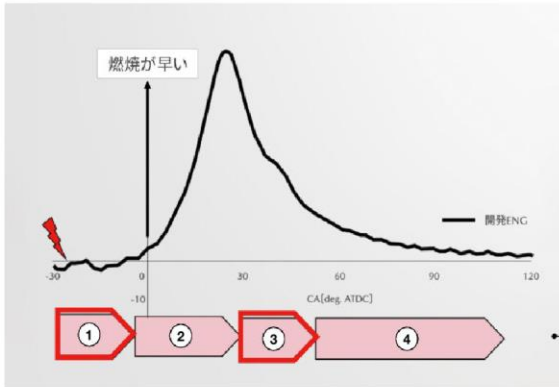


solution Cディメンジョンの選定

REの場合、ローター中心から3つの頂点までの距離(R)を出力軸中心とローター中心の差(偏心量と呼びeで表す)で割ったK値がS/V比に相当する。8CはK値を大きくし、そのS/V効果で燃料消費率を抑え、同時にアペックスシール部の周速が限界を超えないところでトロコイド曲線の形を決めた。

8は排気量が約800ccであることを表し、Cはトロコイド曲線のディメンジョン(形状)を表す。
 13Bは排気量1.3ℓでディメンジョンBタイプ、12Aは同1.2ℓでディメンジョンAタイプという意味だ。
 Cタイプのトロコイド曲線は今回が初採用であり、ボアとストロークを両方とも変更した新設計REである。
 TEXT:MFI PHOTO:牧野茂雄(Shigeo MAKINO)/MFI FIGURE:Mazda

DI : Fast combustion | 急速燃焼



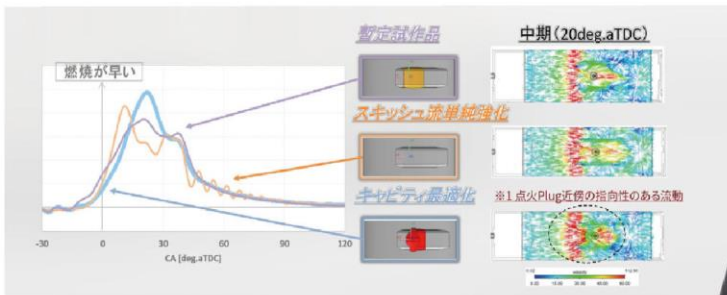
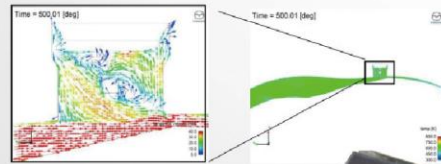
issue RE特有の燃え方

レシプロICEに対してREは、燃焼室が扁平なためプラグ点火以降の燃焼火炎の広がりがゆるくなる。「スムーズに回るけれどREは燃費が悪い」といわれる理由の一端はここにある。そこで燃焼立ち上がりをスカイアクティブG並みの早さとし、その後の膨張行程で起きるRE特有の2次燃焼をスムーズにするための燃焼室形状を作った。

- ① 点火～初期燃焼：プラグポケットの狭い空間内燃焼 (RE特有)
- ② 主燃焼：燃焼室流動による燃焼 (GE共通)
- ③ 2次燃焼：燃焼室形状が複雑に変化することで生じる流動(膨張行程でのスキュー流)による燃焼 (RE特有)
- ④ 後期燃焼：燃え残り領域(クエンチゾーン)へ向かう燃焼 (GE共通)

solution 1 MBDの活用

マツダが全社的に進めているMBD(モデルベース開発)をREに初めて採り入れた。点火プラグが位置する凹み内での初期燃焼をモデル化することで、燃焼空間の移動に伴う火炎の成長が出力に寄与するような燃焼室設計を行なった。



solution 2 燃焼室形状の工夫

ローター側に設けられた凹みは、プラグ点火直後にここで火炎を成長させ、ローターの回転方向にうまく火炎を進行させるためのものだ。燃焼室形状が連続して複雑に変化するREにスカイアクティブG/Xの知見が注がれた部分である。



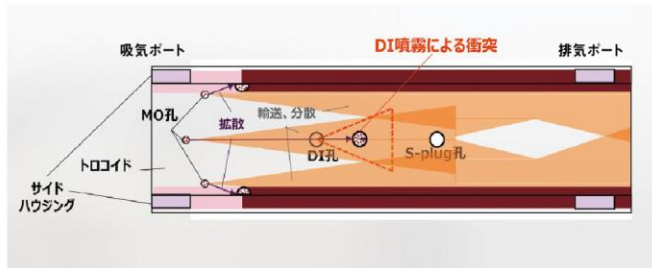
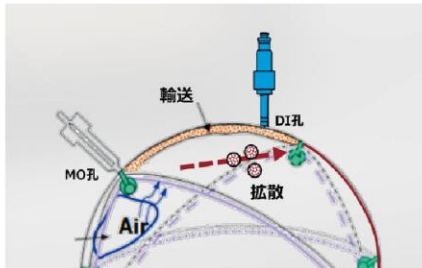
DI : Injection & lubrication

燃料噴射と潤滑

issue

ウォールウェット対策

REはローターとハウジングを潤滑するため燃焼室内にMOP (メタリングオイルポンプ) 噴射孔を開け、ここからハウジング内にオイルを噴霧し、そのオイルをローター側のアベックスシールが運ぶ。しかし、燃料供給がDI (直噴) となる8Cでは、噴射された燃料によって部分的にオイルが流されてしまう。下の模式図がその模様であり、3つのMO孔から出るオイル噴霧 (オレンジ色) のうち中央のMO孔から噴霧したオイルが燃料DI孔の位置で燃料と衝突し、ローターの回転により油膜が切れた部分をアベックスシールが通過することになる。



直噴システム



左：エキセントリックシャフトの回転からギヤで動力をもらって作動するフューエルポンプ。隣に見えるチェーンで噴射タイミングを取る。燃料噴射圧は一般的なガソリン直噴ICEと同程度である。

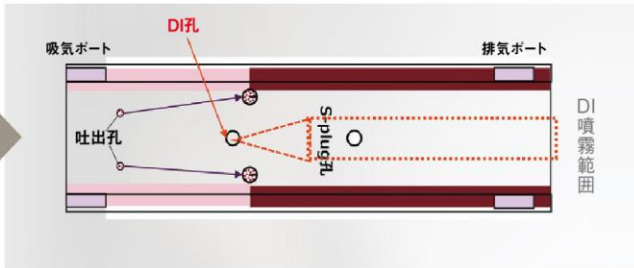
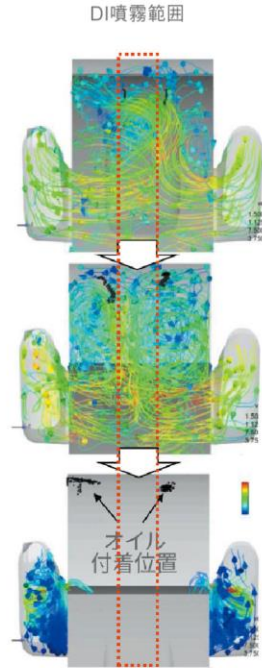
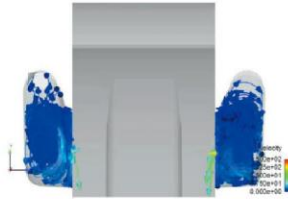


右：ローターハウジング上に設けられた直噴インジェクターとレール。開発当初は燃圧を高め多段噴射を適用したが、それだけでは解決が見られなかったという。最終的には最大圧30MPa / 3回噴射という仕様となった。

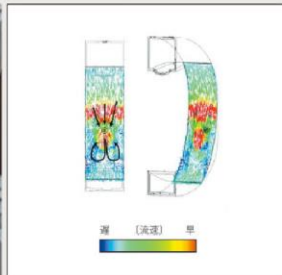
solution MBDの活用

MO孔から出た潤滑オイルがどのように拡散するかを最新のシミュレーションで可視化し、筒内に噴射された燃料と干渉しないMO孔配置とオイル噴射条件を探した。その結果が右の一連の図である。MO孔を出たオイルは燃焼室全体に拡散されるが、燃料とは干渉していない。これもMBDの成果であり、逆にこれだけ精度の高いシミュレーションの実施にはMBDが不可欠である。

Crank angle 20



混合気の成層化



筒内に噴射された燃料が空気と混ざって混合気を形成しながら点火プラグ近傍に集まる。そこで点火された混合気は速い燃焼火炎となって広がる。微細化した燃料が低温時でも十分に気化するため燃料噴射量を抑えられる。



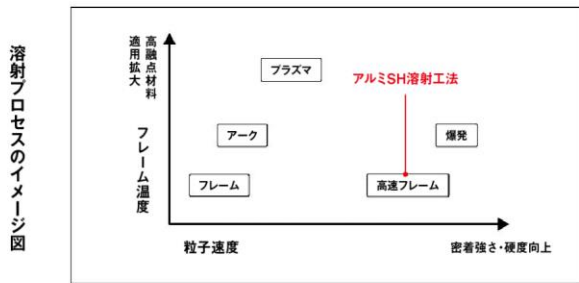
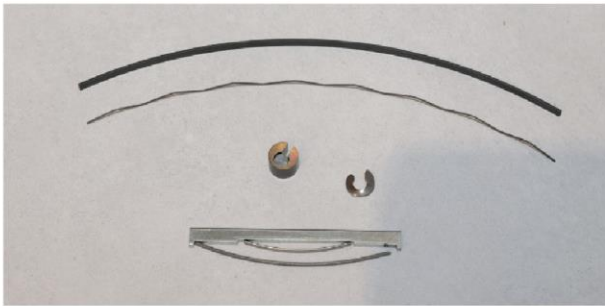
ローターハウジング側方に備わる点火装置。これまでのREとは異なり、プラグは1本のみとなった。EGRの導入もあり着火性を高める目的から、点火エネルギーには少々の増強がなされていると思われる。

Weight reduction | 軽量化

issue 1 サイドハウジングのアルミ化

ローターの回転によって片側3本ずつのサイドシールがサイドハウジング表面を摺動する。潤滑オイルは介しているものの、表面を窒化処理して硬化させた鉄製ハウジングでなければ耐えられないと言われてきた。BCでは軽量化

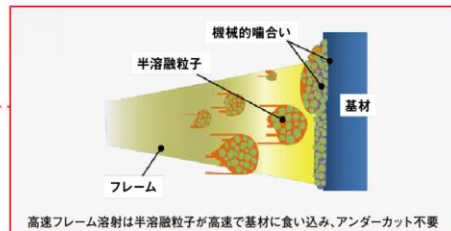
のためサイドハウジングのアルミ化を決断、柔らかいアルミ表面に高温で溶けたサーメット(セラミック)粉末を高速でぶつける工法を採用することでコストも含めた量産性と密着強さの条件をクリアした。



炭化物サーメット系溶射における各種溶射法の比較(特長、皮膜特性)

溶射法	熱源	投入エネルギー	粒子間結合力	基材密着力
フラーム		4	2	2
高速フラーム	燃焼ガス	2	4	4
爆発		1	4	4
アーク	電気	4	サーメット系は適用不可	
プラズマ		3	3	3

1: Poor 2: Average 3: Good 4: Excellent



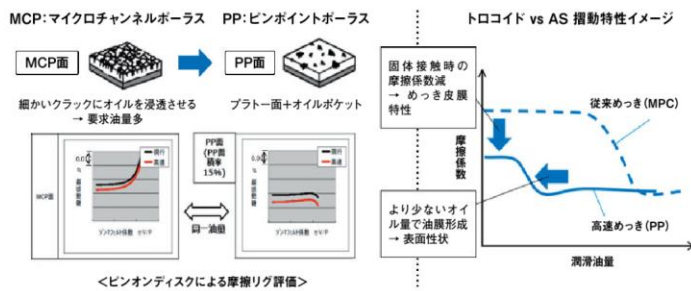
solution セラミック溶射と高速フラーム法

サーメットを表面に密着させる方法は上左の表のようになっているが、燃焼ガスを高速で吹き付ける高速フラーム法が最適と判断、溶射後の冷却も含めて工法開発した。1991年のル・マン24時間レースで総合優勝したマツダ787ではガス爆発式という方法を使っていたが、騒音と量産性の悪さから市販車には使えない。

issue 2

ローターハウジングの高耐久化

アベックスシールが接するローターハウジングの摺動面はもともと摩擦対策が難しい。かつてはチャタマークと呼ばれる引っかき傷の発生に悩んだ。これを解決したのはアベックスシールの工夫だったが、8Cでは生産性の向上をねらい高速めっき化に挑んだ。これが副産物を産み、低摩擦なめっき表面が実現した。その結果、少ない潤滑油量でも十分な油膜が形成され、摺動摩擦抵抗も低減した。



solution 高速めっき工法

高速めっきとは、めっき液を入れた槽に触媒を添加してめっき析出効率を高める製造法である。工程時間短縮のために採用されるが、マツダのチャレンジでは表面にオイルスポットがほどよく分散し良好な皮膜特性が得られた。とくに固体接触時の摩擦係数が減った。

Balancing | 音/振動対策



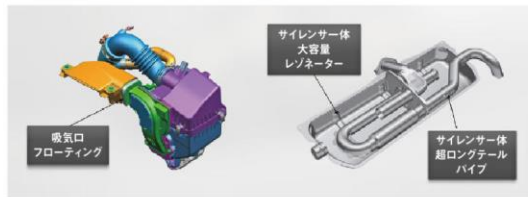
下: シャフト端に半分だけ錘をつけたバランスウェイト。詳細は不明だが、ローター回転とは反対方向に回転させる使い方が一般的だ。また、フライホイール部分にはばね付きのダンパーが使われている。



上: ローター重量の偏りはこのように3角形のカド部分を削って対策する。120度位相の合成力なのでどの部分に重量の偏りがあっても対策できる。計測制度が高くなり、0.001グラム単位での削りが行なわれる。

issue 1ローターの振動を解決

従来の2ローターREはローターが互いに逆位相で回るため回転振動は極めて低いレベルに抑えられていた。しかし8Cは1ローターであり、この重量物が回転すれば振動が出る。そこでバランスウェイトほかを使って対策している。また、排気音については吸気口と吸気管のフローティング処理や長いテールパイプなどで悪化を防いだ。



solution ローターの精密加工と各種手当

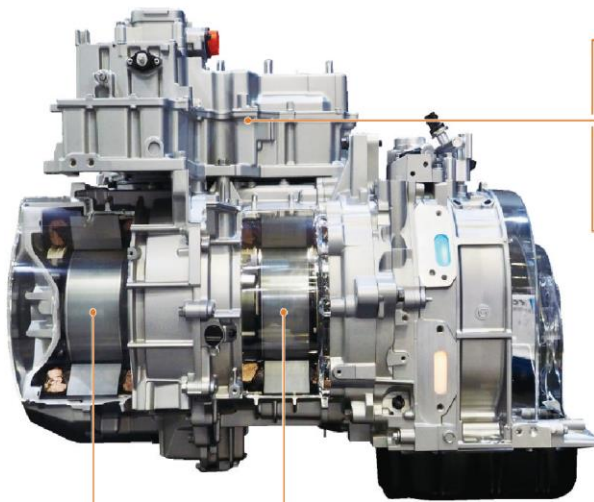
ローターは重量物であり、これがハウジング内で燃焼による振動や微小なトルク変動にさらされれば、電動ユニット全体として音・振動が発生してしまう。そのためローターの機械加工は念入りに行なわれ、吸排気系にも1ローターに最適なチューニングが施される。

e-SKYACTIV R-EV

Generator-EVという選択肢

コンパクトで高性能というイメージが強かったロータリーエンジンを、発電専用にする……。
マツダはEVとシリーズハイブリッドの強みを融合し、EVとしての使い方を拡張した
今までにない新しい電動車として、e-SKYACTIV R-EVを定義付ける。

TEXT:MFI PHOTO&FIGURE:Mazda / MFI



制御用インバーターなどの補機類

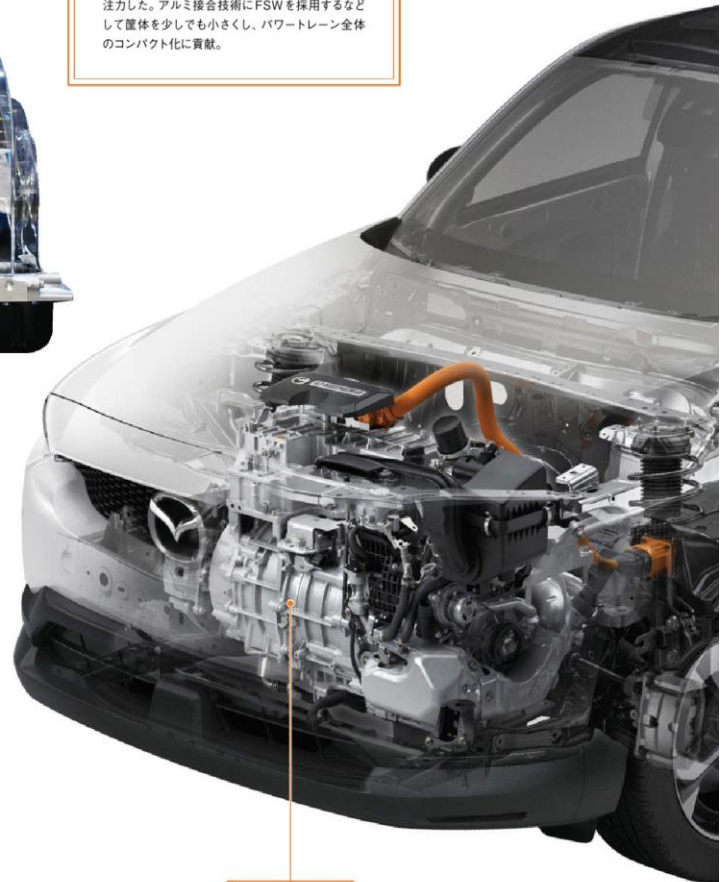
電動車の性能を大きく左右するユニットであるインバーターなどは高効率化だけではなく、小型化にも注力した。アルミ接合技術にFSWを採用するなどして筐体を少しでも小さくし、パワートレイン全体のコンパクト化に貢献。

駆動用モーター

定格電圧355V、定格出力60.0kW、最高出力125kW/9000rpm、最大トルク260Nm/0-4481rpmというスペックの交流同期電動機がフロントタイヤを駆動。上の写真は車両の前方方向から撮影したものになる。

ジェネレーター

こちらも薄型化を推進した高出力ジェネレーター。右側のロータリーエンジンと同軸上にレイアウトされ発電を行なう。左側に配置される駆動用モーター、そして減速機も含めて見事にストレートに配置されていることがわかる。



パワートレイン

e-SKYACTIV R-EVのパワートレイン

PHEV専用のプラットフォームではなく、BEVのMX-30と同じ車体フレームに搭載できるように設計することは車両価格を抑えるために必要だった。狙いの出力として125kWの駆動用モーターをこの条件で成立させるためには、エンジン全長の影響で4気筒はおろか3気筒でも不可能。そこで1ローターの薄型ロータリーエンジン搭載が決まった。同じシリーズ式ハイブリッドである日産e-POWERのパワートレインは3気筒エンジンを搭載するため、モーター/ジェネレーターを前後配置して成立させている。

マツダがe-SKYACTIV R-EVの価値として示したのは、ロータリーエンジンのコンパクトさを活かし、エンジン、発電機、高出力モーターをBEVモデルと同じ車体フレームに搭載可能とすることだった。そして以下の3点のメリットを顧客に提供することを狙っている。まず1つめは、普段はBEVとして使えて、ロータリーエンジンの発電で長距離移動も可能であること。2つめはモーター駆動による純粋で心地の良いドライビング体験。最後に多彩なライフスタイルをサポートする充電・給電性能となっている。

ロータリーエンジンのコンパクトな電動駆動ユニットは、まず小型化への挑戦が必要だった。エンジンと同軸上にモーター、ジェネレーター、そして減速機も配置することで電動駆動ユニットを統合化・一体化することが可能となる。これは小型化にあたってとても大きなメリットを生み出す。エンジン自体の設計、生産の工夫は他のページで解説しているが、それ以外の部分でもパワートレイン小型化への努力は多岐にわたっている。

モーターとジェネレーターは油冷だが、潤滑構造を徹底的に見直した。CAEと可視化の両面で狭いスペースでの均質なオイル流れを追求し、こちらのパートでも薄型化を追求した。インバーターやコンバーター、ジャンクションボックスなどは水冷シール部のボルトを廃止し小型化を推進。さらにアルミ接合技術にはFSW(摩擦攪拌接合)を採用し、ここでもサイズを抑えている。

充電・給電性能でも近年、とくに重要度が高まっている機構をきちんとキャッチアップ。通常の普通充電を利用することはもちろんだが、CHAdeMO規格による急速充電はバッテリーの温度管理を進化させ効率を高めた。さらに車両に搭載する17.8kWhの大容量バッテリーから家電機器などに給電するV2L (Vehicle to Load) は、荷室内に1500Wまで対応可能なAC電源を用意。さらに別売りの可搬型外部給電器を使えば最大4500Wまでの給電が可能になる。充放電ユニットを経由して家庭に電力を供給するV2H (Vehicle to Home) にももちろん対応。電力を車両移動に使うだけでなく、電気料金の安い夜間に充電を行ない、日中の家庭での電力を車両から給電し電気代を節約したり、停電時にはエンジン発電と合わせて長期間の非常用電源として使うことも想定されている。

エンジン駆動はすべてモーター
エンジンは発電に徹しタイヤを駆動することはない。ホンダe:HEVや三菱アウトランダーPHEVはエンジンと駆動軸を直結するクラッチ機構を持ち、効率の良い領域ではエンジンで走行するが、R-EVは日産e-POWERと同様に純粋なシリーズ式となる。



駆動はすべてモーター

エンジンは発電に徹しタイヤを駆動することはない。ホンダe:HEVや三菱アウトランダーPHEVはエンジンと駆動軸を直結するクラッチ機構を持ち、効率の良い領域ではエンジンで走行するが、R-EVは日産e-POWERと同様に純粋なシリーズ式となる。

燃料給油口(車両左側)



普通/急速充電口(車両右側)



モデル	バッテリー総電力量	充電方式	充電設備の電力	充電時間 SOC20⇒80%	SOC0⇒100%
MX-30 Rotary-EV	17.8kWh	普通 (AC)	3kW 6kW	約3時間50分 約1時間50分	約6時間20分 約3時間
		急速 (DC)	40kW以上	約25分	—
MX-30 EV	35.5kWh	普通 (AC)	3kW 6kW	約6時間40分 約3時間40分	— —
		急速 (DC)	最大50kW	約25分	—

充電仕様、R-EVとEVモデル比較

車両の右側にはCHAdeMO急速充電ポートと普通充電ポートが左右に並ぶ充電口が用意されており、リッドには充電インジケータの点灯が示す内容を示したラベルが貼られている。上の表はEVモデルと比較したものだが、使用するケーブルによっても普通充電の時間は変動する。



R-EVモデルの駆動用バッテリー
いちばん下の青い部分がAGV(無人搬送車)で、治具を介してバッテリーが載せられている。サブ組み立てラインで事前に燃料タンクをバッテリーと合体させてから次の生産工程に進むことで、その後の組み立て工数を短縮する。

COLUMB Hybrid

駆動用バッテリー

EVモデルとの共通化と作り分け

多品種混流のフレキシブルなラインはマツダ生産技術の面目躍如ともいえるところだが、駆動用バッテリーにおいてもまさに同様だ。EVモデルのバッテリーと組み立て用パレットを共通化するなどラインにおけるモデル別専用部を極小化することに注力し、効率化とコスト削減を実現している。

TEXT:MFI PHOTO&FIGURE:Mazda

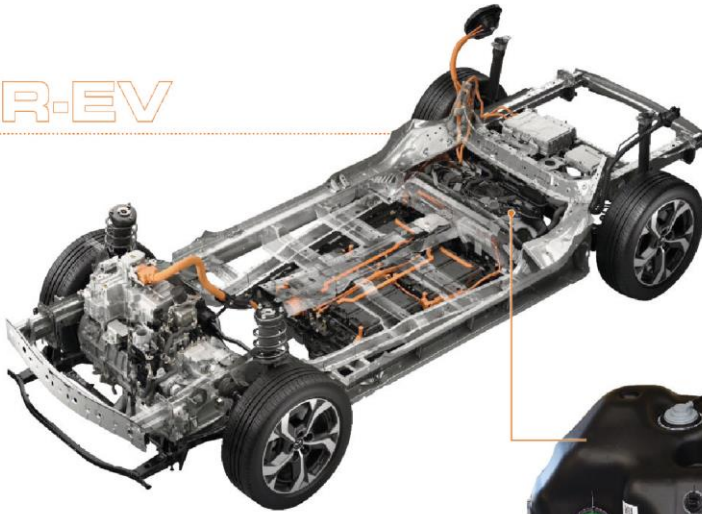


宇品地区にあるマツダ本社工場内バッテリー組立ラインの生産風景。AGVによって運搬されてきたバッテリーパック用フレームに、この写真では人の背後の位置に順次、流れてくるバッテリーパックをこのように載せていく。この後に同じ作業員がホルドでの固定や小型部品、上部カバーなどを装着してから、次の燃料タンクを装着する工程へと進む。



MX-30 R-EVモデルに燃料タンク合体済みのバッテリーパックが装着される工程。この後にBEV、PHEV、ICEといった異なるパワードレーンが搭載される工程となるが、すべてのユニットで搭載工程と設備は共通とし、専用部の極小化を目的としてアタッチメント治具だけを入れ替えるだけで対応している。様々な車種やパワードレーンを同じラインで生産可能だ。

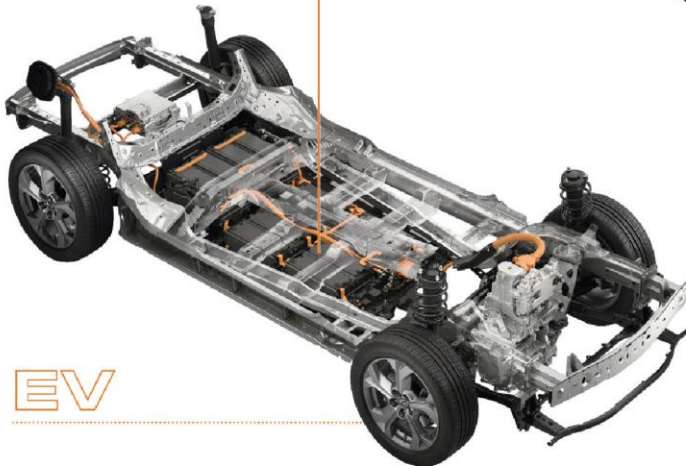
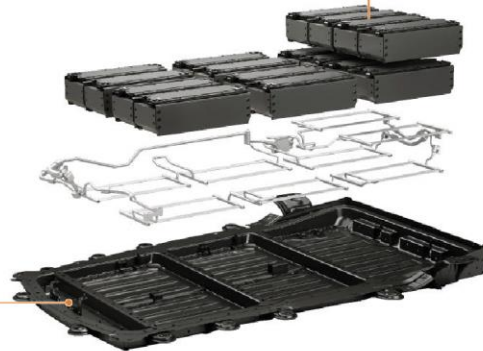
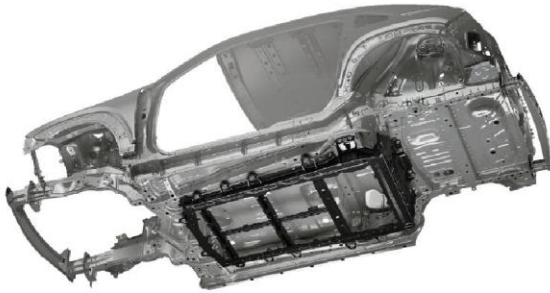
R-EV



↓ 50ℓの容量を備えるMX-30 Rotary-EVの燃料タンク。PHEVクラストップのEVモデルに航続距離を確保するための電池容量と、安心のロングドライブ性能実現のためのタンク容量を両立させるべく、このふたつを同時搭載することでスペース効率を最大化。電池用制御部品の配置を見直し後座下のスペースを有効活用するなどの工夫が随所に見られる。



↓ MX-30 EVモデルのボディ骨格。バッテリーケースを環状構造の一部として活用することを想定した設計とし、ケースを構成するフレームとボディをケース全周の20カ所で強固に結合、左右にたぐくクロスメンバーをケース内に配置している。このバッテリーケース締結部の剛性をコントロールすることで、ロードノイズ低減や振動抑制も行なっている。



↑ MX-30 EVモデルのバッテリーパック。銀色のバイピングは冷媒チューブによる薄型の熱交換器でパックに接触しており、温度上昇に合わせてバッテリーを冷却し適切な温度をキープし熱による劣化を防ぐ。MX-30 Rotary-EV用のバッテリーパックでは右側の2段になった部分に電池ではなく燃料タンクを配置する。

← MX-30 EVモデルのアンダーボディ。骨格のストレート化と環状構造を基本として剛性とエネルギー伝達効率を高めた、マツダの現在の考えが盛り込まれたボディだ。注目はリヤトレリングアーム取付部で、この部分も環状構造として強化し、伝達遅れを大幅に低減させることでより精密で楽しめる操縦安定性を狙っている。

EV



軽く、強く、精緻に。8C製造現場

互いに9か所で接するローターとローターハウジングを設計値どおりの精密さに仕上げる。
 世界で唯一、REを実用ICEとして完成させ量産を続けてきたマツダは、つねにこのテーマを追い続けてきた。
 そして新しい8C型の製造工程は、まさに「SKYACTIV RE」である。

TEXT: 牧野茂雄 (Shigeo MAKINO) PHOTO: 山上博也 (Hiroya YAMAGAMI) / 牧野茂雄



シングルローターRE

8Cは薄型だ。出力軸方向は直列2気筒より短い印象。まるでV型2気筒のような。ベルト駆動される補機はレシプロICEと変わらない。右側は発電機に接続される面で、中央部にばね式のダンパーが見える。ローターをふたつにすれば長さは増える。排気量は1.6ℓとなりPHEVの駆動用動力源としては充分だが、どうなるか。

2012年、マツダはRX-8の生産を終了した。搭載されていた13B型RE(ロータリーエンジン)はその後補修用の生産が細々ながら続けられた。筆者が最初にRE製造ラインを取材したのは1986年11月、最後は2008年4月だった。その前年の10月、マツダは「第40回東京モーターショー」に次世代REの雛形である16Xを参考出品した。その期待値もあってRE製造ラインの取材を申し込んだのだが、2008年9月のリーマンブラザーズ証券破綻を引き金とした世界同時不況、いわゆるリーマンショックで16X計画は凍

結された。

しかし、2023年に訪れたRE製造現場には2008年の景色がほぼそのまま残っていた。いまどきのICE(内燃機関)らしく「ロングストローク化」された8C型は、それまでの13B型を拡大コピーして変形させ単気筒(シングルローター)化したものだから、製造ラインは基本的に流用できる。そのうえで新規開発スカイアクティブICE群の生産開始に合わせて導入した数々の手法を8Cにも活かすのだろうか……と考えていた。その予想は当たり、さらにマツダは2020年代の

生産技術をマツダらしく咀嚼した上で導入していた。

ICEの製造は、金属に「削り」や「穴あけ」などの精密機械加工を施し、それを設計値と寸分違わず高精度で組み立てる作業だ。いまや精度は1ミクロン(0.001mm)のレベルである。そうでなければねらった熱効率に届かない。高精度な燃焼解析が可能になり、燃焼の状態を「見える化」できた結果、ICE製造はさらにシビアな精度を追求するようになった。

REはとくにむづかしい。レシプロICEではピ



徹底してジグ&汎用機

6軸ロボットと汎用マシニングセンターのペアで加工ステーションを構成する。右下に見える白いトレイを載せた台は自動搬送用のバッテリー式AGV。ロボットが加工機内のジグにワーク(加工対象品)をセットし、セットした状態で接触式センサーやカメラが位置を測定し(右下)、その位置データをもとに機械加工が行われる。ジグ(下)を交換すればほかの作業もできる。



ストンが上下運動して燃焼の仕事回転に変える。ピストンとシリンダーはピストンリング/オイルリングとオイル膜を介して接し、互いに直には接触していない。浮いている。REでは、そのピストンに相当するローターがシリンダーに相当するローターハウジング内で回転する。ピストンリングに相当するシールとオイル膜を介して浮いた状態で回転する。大きくて重量もあるローターはフローティング状態で回転しているのだ。

しかもシールの総延長はレシプロICEでのピ

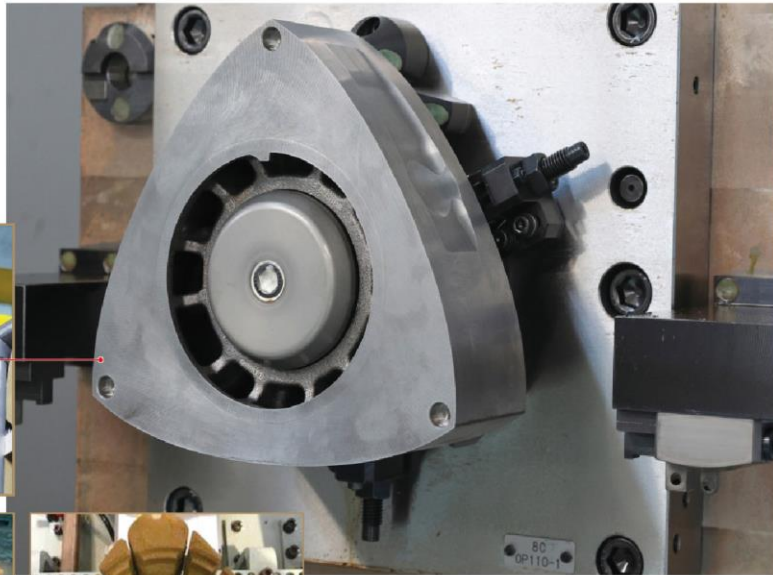
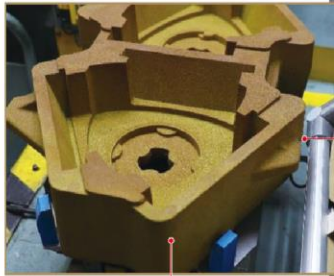
ストンリングの比ではない。きっちりシールし、密閉し、作動ガス(空気+燃料)および燃焼済みガスを漏らさず、燃焼エネルギーを回転力に変える。半面、シール素材の選択を誤るとハウジングに微細な「引っかき傷」が付いてしまう。ここが極めてむづかかったことから、マツダ以外のOEM(自動車メーカー)はRE開発を打ち切った。シール問題を執念で解決したマツダだけがREを実用化できた。

そのREが新しい製造設備と出会った。考え方は一連のスカイアクティブICE同様、強く、

軽く、精緻に、安く、である。専用機ではなく汎用マシニングセンターをアタッチメント交換で使い、接触式センサーやカメラによる画像処理などのセンシング技術で加工時の位置極め精度を極めて高いレベルに維持し、工程数を減らし、エネルギーをセーブし、オペレーターのミスを極小化する。レシプロのスカイアクティブICEでは製造時データと車検入庫時データが照合され、燃費のいいICE番号の加工条件が製造現場にフィードバックされているが、この流れも当然、REに受け継がれるだろう。

鉄製ローターは重力铸造

下の3枚の写真は砂型による鉄製ローターの铸造工程。砂型は高精度で自动成形され、外寸の型(左上)に中子(下右)を固定し、3個×2列で铸造する。完成したローターは燃焼室部分も含めて全面機械加工され(右)、シール取り付け部分の加工とバランス取りを行なう。13B型では数値を見ながら人がボール盤で削っていたが8C型は全自動化され精度は75%アップした。



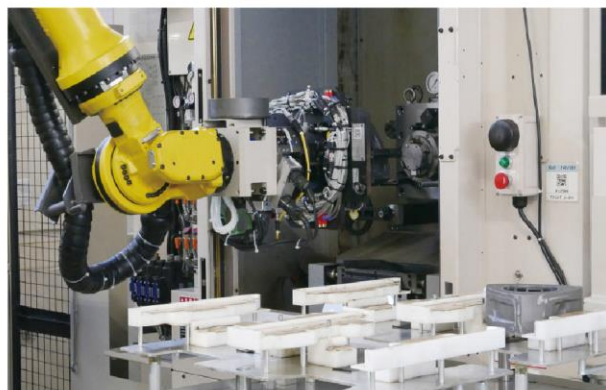
2008年当時のローター加工機

13B型は加工機内のテーブルに3つローターを載せ、回しながら刃物を上下させる線削加工だった。刃物を往復動作させカンナのように削っていた。現在はマシニングセンターでジグのゼロ点と加工品のゼロ点を合わせ、ミクロンレベルの精度で削る。



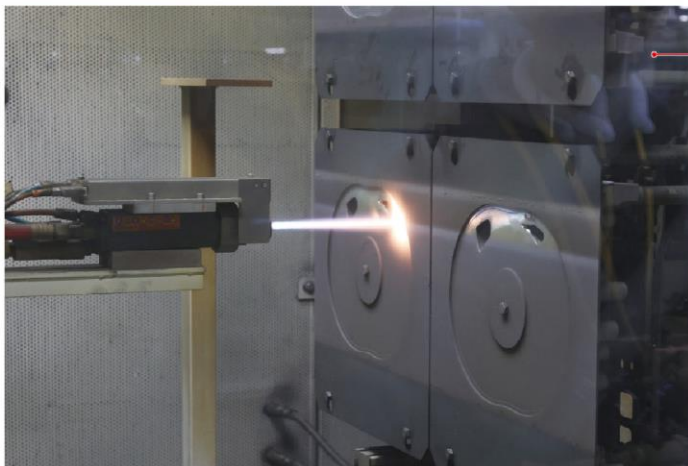
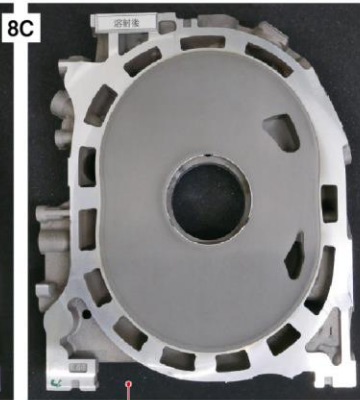
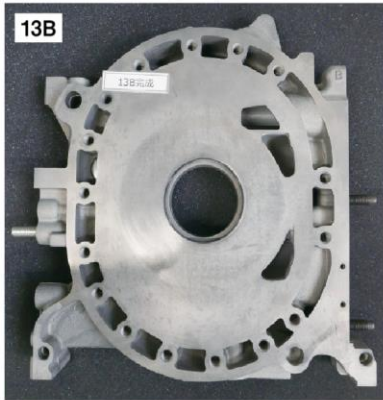
3個取り鑄物

重力铸造は型の上から溶けた金属を自由落下させる。3個×2列のローターを一度に铸造込む。2ローター方式だったことの名残だ。ローター内側は中子の部分以外に溶湯が届いている。大雑把なように見えて精密な铸造である。



2023年のローター加工機

左の写真とは打って変わって汎用マシニングセンターで1個ずつ加工。ロボットアームが素早くいいに製品を選び、マシニングセンター内のジグに固定し、ドアが閉まると自動選択されたツールでの加工が始まる。



アルミ製サイドハウジングの表面処理

上の左端は13B型の鉄製サイドハウジング。鋳物の表面を平らに機械加工した後でガス軟酸化処理を施している。上中央は砂型鑄造されたアルミ製のサイドハウジングで、型から取り出した後に表面を磨いた状態。通常、アルミ製のICEシリンダーブロックやシリンダーヘッドは丈夫な鋼製鑄型に溶けたアルミ溶湯を高圧で吹き入れる高圧鑄造で作られる。マツダはアルミ溶湯を砂型に流し込み、重力鑄造+わずかな「押し」と、砂型全体を半回転させる工夫で均一に砂型内に溶湯を行きわたらせるAPMC工法を確立している。製造時間はかかるが完成後の金属組織が緻密になるから薄型化が可能になる。こうしてAPMC工法で製造したサイドハウジング表面にサーメット粉末をマッハ2以上という高速でぶつけ、アルミ表面に圧着させ、強靱な層を構築する。数千度の燃焼ガスで吹き付けるからサーメットは半溶融状態でアルミにぶつかり丈夫な膜を作る。当然、アルミ材は変形するが溶射後の冷却を工夫し製品寸法と溶射膜厚は設計値どおりになる。

13B型より大きいローターは、従来同様に砂で固めた鑄型に溶けた鋼を流し込み重力鑄造で作られる。ハウジング類も砂型を使うマツダ独自のAPMC工法で作る。マツダはフォードとの提携時代にコスワース鑄造を伝授され、コスワースDFVレーシングエンジンを砂型で作っていた。その技術が磨かれ、スカイアクティブICEで進化し、8Cに使われている。アルミ化されたサイドハウジングの鑄造にはMBD（モデルベース開発）が投入され、砂型への理想的なアルミ溶湯流し込みの解析が行なわれた。

ローターの切削加工は、前述のように汎用マシニングセンターが行なう。2008年に見た方法とはかなり違い、当時50工程あったものが9工程に縮まった。工程が減れば、ローターを加工機にセット、取り外し、また別の加工機にセットし……という回数が減り、精度劣化のリスクが減る。汎用マシニングセンターの中にセットされたローターは、正確な位置極めて固定され、

いくつかの工具を自動で選ぶATC（オートツールチェンジャー）と連動したロボットアームが加工を行なう。

ローター、ローターハウジング、左右ふたつのサイドハウジングは、それぞれ別のマシニングセンターが加工を行なうが、同じ機械である。ジグとツールを取り替えれば、その機械でも同じ作業をこなせる。ジグの取り付け構造と基準も共通。スカイアクティブICEの製造工程設計で確立された技術である。

13B時代になかった工程はサイドハウジングへの溶射だ。13Bまでは鉄鋳物のサイドハウジングにガス軟酸化という処理で表面を加工していた。8Cは軽いアルミ製サイドハウジングであり、その内側表面、ローター両面に6つあるサイドシールが接する面に溶かしたサーメットの粉末をマッハ2という超高速で吹きかけ、丈夫な膜を作る。

こうして出来上がった部品は、念入りに機械

加工される。なかでもローターは極めて高い精度が求められる。回転体なので重量に偏り（アンバランス）があると偏心運動になってしまう。これを最小限に抑える加工が必要だ。ローターを一定回転させてアンバランスを測定し、そのデータがサーバーに入る。マシニングセンターにセットされたローターは高精度のタッチセンサーでゼロ点合わせを行ない、サーバーのデータに基づいて指示された深さの溝を角（コーナー）部分の上下面に加工する。

アンバランス測定のためのデータはすべてローターへの3つの角での合成バランスになり、どの角ををどれだけ削るかの指示としてマシニングセンターに入力される。120度位相での合成バランスだ。削る量はグラムだが、削りそのものは深さなので、削る深さの座標指示として出す。ここで削る量は0.001グラム単位の指示だ。ローター両面を削ることでスラスト方向のアンバランスも解消される。

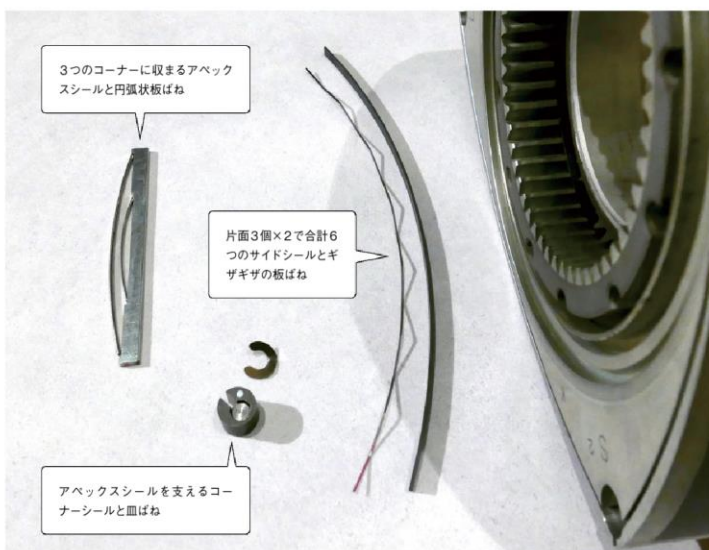
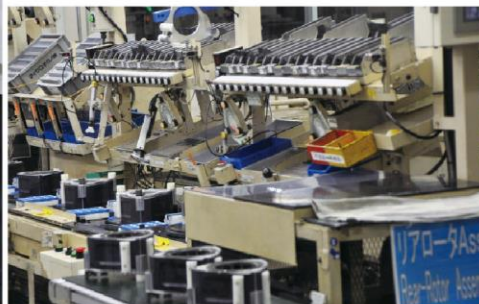
シール類の取り付け

まず、ローターを寝かしたときの3つの角の垂直面にアベックスシールを取り付ける。13B型に比べて8C型はローターの厚みが増えたのでアベックスシールは長くなった。その裏側には円弧状の大小ばねがふたつ入る。ローターとハウジングがオイル膜を介してつねに同じ状態で接するよう、ばねでアベックスシールを押し付けるのだが、あまり強く押し付けられればローターハウジングとの間で振動抵抗になってしまう。所定の位置にきちんと収まっているかどうかは指先で押して確認する。この工程に集う熟練の匠達は、指先の感覚だけでシールを設計どおりにセットする。このシーンは何度も見えてきたが、REが世代交代しても手仕事であることは変わらない。同様にコーナーシールとサイドシールも、下にはねを入れて手作業で組み付ける。各シールの状態を確認し、このローターをハウジング内にセットする工程へと送る。



2008年と2023年を比べると

2008年撮影の下の写真は、13B型のシール組み付けステーションである。左は2023年の8C型。置いてあるもの、使っているものはほとんど変わらない。ただし2000年以前と比べると匠達が着用している手袋がちがう。その昔はたしか軍手だった。ユニフォームもカッコよくなった(じつはこれ、重要な要素であることを日本企業の経営者は認識していない)。



この小さな部品がREのキモ

シールは気密部品である。燃焼ガス圧力を逃さないよう、行程間ガスが混ざらないよう、高い気密性を保持する部品だ。ばね形状がわかりやすいよう、影が出るように撮影した。いちばん長いコーナーシールの下にはギザギザ状のばね(シールスプリング)が入っている。この山の数と山谷部分の傾斜にもマツダのノウハウがある。アベックスシールは円弧状のシールスプリングによりハウジング内周面に押し付けられ、同時に燃焼ガス圧力によってつねにシール溝の片側に押し付けられる。アベックスシールとサイドシールが接する場所の気密性はコーナーシールに弾力を持たせることで対応している。下の写真は13B型(上)と8C型(下)のアベックスシール比較。素材は変わらないが大きさと厚みが変わった。その昔、マツダのRE開発陣はアベックスシールがローターハウジング内周面を細かく削ってしまう傷、チャタマークの発生に悩んだ。ヴァンケル型REのオリジナルであるNSUでもこの問題を解決できなかった。



最終アセンブリライン

吊り下げ式ハンガー上で作業する光景も2008年当時と変わっていない。下の写真は2ローターのRENESES 13B RE。フロント側ローターを組み付け、エキセントリックシャフトを取りつけた状態である。ここにリヤ側ローターが取り付けられる。右は現在のシングルローター8C。左下はクリーンルームを出て外装部品を組み付けているところ。必要な部品はすべてキット化され、オペレーターは順番に手前から部品を取って組み付ける。REは部品が少ないのでこれができる。ボルトも必要本数だけキットに入っている。この取材当日、8C型は7.8分に1台のスピードで製造されていた。作業オペレーターは7.8分ぶんの仕事を覚える。これは結構大変なので作業ナビゲーションで正しい手順をガイドする。工程に來たらモニター画面に作業指示が出る(みなさんそんなことは覚えているが)。



2023 e-SKYACTIV RE(8C)
 2003 RENESIS (13B)
 ∴ 10A、12A、13A、13B、20B
 1974 Start production on this assembly line

工場内の壁に、こんな記述があった。この場所でのRE生産開始は1974年。じつに49年前である。来年はこの製造ラインの50周年だ。継続は力なり。同時に意地と執念でもある。

製造ラインの一面は、やや圧力を加えて外部からホコリが侵入しないクリーンルームになっている。この中でローターへのシール類組み付けとローターハウジングへのローターとエキセントリックシャフト(レシプロICEでいうクランクシャフト)の取り付けが行なわれる。2008年当時の写真と比べると、ほとんど変わっていない。ローターの寸法が変わったため、作業時にローターを固定するジグは変わった。シール類の寸法も違う。しかし作業手順は同じだ。

クリーンルームから8C型が出るときには、ハウジングに囲まれた燃焼室は密閉された状態になる。吊り下げ式ハンガーの上で組み立てられる光景も2008年当時と変わらない。しかし部品は変わった。8C型は筒内直噴なので燃料ポンプ

はエンジン側にある。エキセントリックシャフトのエンドにギヤがあって燃料ポンプを回転させ、その動きをチェーンでもらう。燃焼のタイミングと燃料圧力が上がるタイミングを合わせられるように組み付けるため、カメラを使った画像処理が導入された。

これはつまり、精度と作動をオペレーターが保証するのではなく生産システムとして保証するということだ。製造現場のもっとも大きな変化はこれだ。重要な行程ごとにチェックとその記録が行なわれ、先の工程へは合格品しか流れない。最後にテストするのではなく、OKを積み上げてゆく。その流れを生産システムが管理し製品を保証する。マツダは生産技術領域にもMBDを活用している。

そして、最後には全数をコールドテスト(電気モーターを使う)する。もっとも効率の良い発電回転数である2300rpmで吸気圧力(負圧)、潤滑油圧力、回転抵抗、音振動、圧縮圧力を測定する。次にRENESES 13B型の想定データが山のようにある1200rpmで測る。さらに、最後の最後は燃料を入れて点火しICEを作動させるホットテストを250rpmで行なう。これに合格すれば車両生産ラインに8Cが送られ、電気モーターと減速機に合体される。

紆余曲折を経て目の目を見た16X型改良版のシングルローターRE。懐かしい光景と初めて目にするシーンに、16X発表以降16年ぶんの月日が詰まっていた。当然、次のステップがあるはず。この勘は当たりそうな気がする。



New model for rotary engine

MX-30 Rotary-EVというクルマ

11年の空白期間を経て復活した、マツダのアイデンティティともいえるロータリーエンジン。このパワートレインを搭載するのはMX-30だ。先行してマイルドハイブリッド、電気自動車がリリースされているリーススタイルドアの個性派に、新たな選択肢が加わった。

TEXT:MFI PHOTO:山上博也(Hiroya YAMAGAMI) / MAZDA FIGURE:MAZDA

Cセグメントに属するクロスオーバーモデル

MX-30「Rotary-EV」のボディサイズは全長4395mm×全幅1795mm×全高1595mm。車両重量は1780kgとなる。RX-8以来となる観音開きの「リーススタイルドア」がエクステリアの最大の特徴となっている。ロータリーを搭載するPHEVに加えてBEV、ICEの合わせて3つのパワートレインをラインアップすることになった。



新時代に蘇ったロータリーエンジンが搭載されるのはマツダMX-30だ。2019年の東京モーターショーで同社初の量産BEVとして世界初公開されたMX-30は、パワートレインだけではなくセンターピラーレスのセンターオープン式構造を持つ「リーススタイルドア」を採用する点でも異彩を放っている。MAZDA3やCX-30と同じセグメントに属するが、前述のリーススタイルドアや電動化に伴い骨格にはかなりの改良が実施された。当初はBEV専用モデルかと思われていたが、2020年秋の日本市場導入時にはSKYACTIV-G 2.0ガソリンエンジンに独自のマイルドハイブリッドシステムを組み合わせたICE車両も設定しバリエーションを拡大した。

そして今回、ロータリーエンジンを発電専用にするシリーズ式プラグインハイブリッドモデル、MX-30「Rotary-EV」を設定。23年9月14日から国内での予約受注を開始し、11月初旬以降にデリバリーが始まる。車両価格は423万5000

円～491万7000円、3年後の残価率を55%とした残価設定クレジットプランも用意される。

バッテリー容量は17.8kWhで、電池のみでWLTCモード107kmの走行可能距離を確保。さらに発電機として使われるロータリーエンジンの燃料タンクは50ℓの容量を備え長距離ドライブに対応する。バッテリーパックと50ℓの燃料タンクを同時搭載するにあたり、それぞれのスペース効率を徹底的に向上させこの構造を実現した。

すべての走行シーンでモーターが前輪を駆動し、急加速など大出力が必要な際はEVモードを選択していてもバッテリー残量に応じてアクセル開度に応じロータリーエンジンが始動するロジックを装備。BEVモデルで採用されていた「エレクトリック G-ベクタリングコントロールプラス (e-GVC Plus)」や、人間の特性に基づいて高精度なトルクコントロールを行なえる「モーターベダル」なども備えており、モーター

ならではの人馬一体の走りを追求したという。

このように3つのパワートレインを展開するMX-30は、マツダが提唱する「適材適所に選択肢を提供するマルチソリューション戦略」を代表するモデル。注目はロータリー復活だけではない、多くの特徴が備わっている。

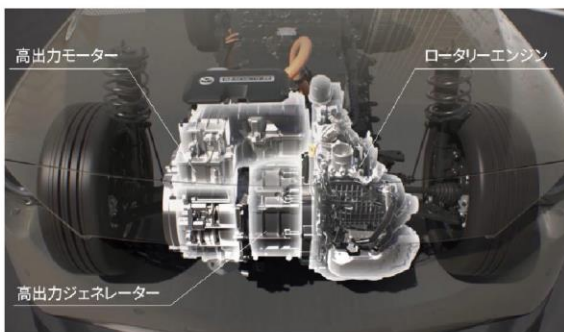


1ローターのロータリーと電動ユニット

MX-30「Rotary-EV」のエンジンルーム。一般的なエンジンよりも格段にコンパクトに収まるロータリーのメリットを最大限に活かすだけでなく、発電専用とすることで従来ユニットの2ローターから1ローターに変更している。

右：国内市場の先鋒はマイルドハイブリッド

2020年秋にMX-30国内向け最初のモデルとして、2.0ℓ直4 SKYACTIV-Gエンジンに24Vのインテグレートッド・スターター・ジェネレーターを組み合わせたICE車両がまず設定された。トランスミッションは第7世代商品群で共通の6速ATが組み合わされる。



左：主要ユニットの同軸上配置を実現したPHEV

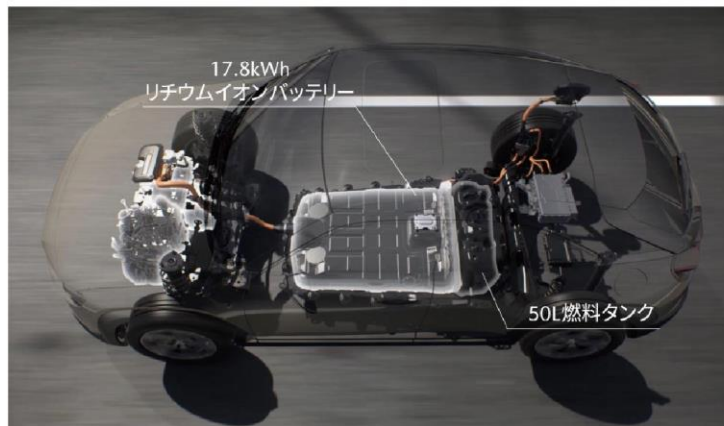
MX-30[Rotary-EV]パワートレーンの配置レイアウト。Cセグメントクラスのエンジンルーム、かつBEVのモデルと共通の車体フレームへの搭載が決められていたため、コンパクトな1ローターエンジンが選ばれた。同程度の出力の一般的なレシプロエンジンと比較してコンパクトな利点を活かし、ジェネレーター、モーターと同軸配置としてスペース効率を高めている。

上：BEVモデルの余裕あるエンジンルーム

エンジン、ジェネレーターが存在せず、駆動用モーターのみが収まるMX-30[EV-MODEL]のエンジンルームには、助手席側に見るからに剛性が高そうなアルミ製マウントが設置されている。車両前方に重量物が少ないため、いわゆる「鼻先の軽さ」が際立つハンドリングだ。

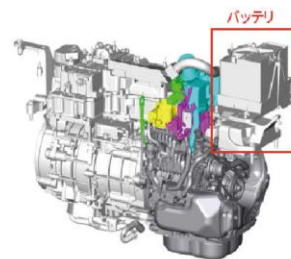
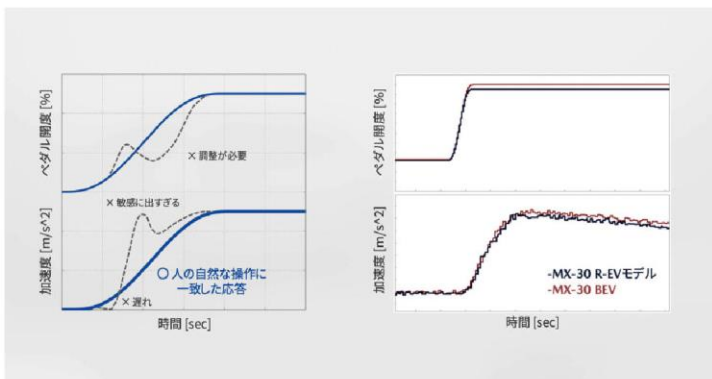
右：大型バッテリーと大容量燃料タンクが共存

航続距離の不安を払拭するために、50ℓの容量の燃料タンクを装備(レギュラーガソリンを使う)。これはMX-30ICE車両2WDモデルの51ℓとほぼ同等だ。電池モジュールの高密度搭載や薄型構造の冷媒冷却方式でバッテリーケース高さを抑えたこともポイント。ボディと電池パックを強固に結合し車体剛性向上にも寄与する。



下：人間中心の加速特性を追求した制御

モーターの高応答性を発揮させればICE車両とは段違いの加速応答性を引き出すのは難しくないが、マツダは人の感覚に合う加速特性をMX-30 EVモデルに盛り込んだ。PHEVであるMX-30 R-EVモデルでもこの思想はしっかりと継承されており、車両諸元の変化に対してEVモデルと同等の特性となるようハードと制御を作り込んだ。



鉛バッテリーとの干渉を避けるために

発電用ローターは変速機位置にレイアウトされるため、エンジンルーム内の鉛バッテリーと干渉。そこでベテランのロータリーパッケージングエンジニアが上部関連部品を集合させた「ベントルーフ」パッケージを立案し、これを解決した。

GMもトヨタもNSU（現在のアウディの前身）もソ連も、RE開発を1970年代に諦めた。実用化し量産に移行したのはマツダだけだった。2000年代に入りRENESES 13B型に触発されたオーストリアのAVLが小型の発電用REを開発し、これに中国民営の奇瑞汽車が興味を示しレンジエクステンダーBEVが開発されたが、結局は試作だけに終わった。

REにとって、これは極めて不幸なことである。豊富な知見を持つ企業は世界にただ1社、マツダだけだ。通常のレシプロICEの場合、おそらく過去に延べ何百万人ものエンジニアがかかわっただろう。知恵の大海戦術の中でレシプロICEは育った。日本の内閣府が所管したSIP（戦略的イノベーションプログラム）では、ついに正味熱効率50%超えが達成された。ラボ段階

とはいえ、50%超えはもっとも効率に優れた天然ガス発電タービンの64%にじわじわと近づいている数字である。

マツダ8C型はまだ、正味熱効率もBMEPも公表されていない。13B型との違いは、まずロングストローク化である。これは2007年に16X型の開発が発表された時点で明らかにされていた。REの場合、ローター中央部に刻まれた内歯の回転ギヤと出力軸側の固定ギヤとの間の偏心量=e値を、出力軸中心から三角ローターの頂点までの距離=Rで割ったK値が、レシプロICEで言うストロークに相当する。一連のスカイアクティブICE同様に、ロングストローク化が図られた。

もうひとつは燃焼の改善だろう。これは分解された8Cを筆者が見た印象でありマツダのコメ

ントではないが、燃焼室（REでは作動室と呼ぶ）にはスカイアクティブGのような丸いキャビティが設けられ、圧縮比が11.9へと高められ、燃料供給が吸気ポート内ではなく筒内直噴になり、点火プラグが2本から1本になった。つまりスカイアクティブGでの進化が転写されたと解釈できる。燃焼はRENESES 13B型よりさらに改善されているはずだ。

それと、発電専用ICEであり、高回転側は使わないこと。もっとも効率の良い発電回転数は2300rpmだと言う。つまりダウンスピーディング化である。排気量を拡大し、回転を下げ、投入された燃料をしっかりと燃やして使い切る。つねにマツダが言っているICEの改善プランそのものだ。形は違っても、考え方はスカイアクティブGである。



ロータリーエンジンの行方

BEV用の発電ICEとして復活したマツダのREは、果たして駆動用ICEに発展するか――

マツダがREを経営視点で捉えている以上、これは可能性大と考えていい。

シリーズHEVか、あるいはPHEVか、それとも水素燃焼REか……

TEXT&PHOTO・牧野茂雄 (Shigeo MAKINO)



RE開発陣を散々悩ましてきたシール類。小さな部品だが、油断しているとも未燃ガスも燃焼済みガスもだもれになるREにとっては極めて重要な部品である。1960年代には牛骨まで試された。トライボロジーという学問が確立され、その重要性が認識されたことで、この部品の将来に可能性が出てきた。もしRE専用の特別なオイルが出来、シールとセットで使えるようになったら……これからのREには人類が蓄積してきた機械の基本が役立つように思う。

では、ここから先に進むとしたら？

過去にマツダはREでいくつかの実験を行っている。印象が強かったのは水素燃焼REと電気モーターを組み合わせたHEV（ハイブリッド車）であり、1990年には開発が始まっていた。1991年のTMS（東京モーターショー）に参考出品されたショーカーHR-Xは水素REを使うHEVだった。1993年のTMSに出品したHR-X2は「リサイクルしやすい構造と素材の車体」が注目されたが、水素燃焼REもきちんと改善されていた。2003年のTMSには電動アシストターボを使う水素燃焼REに電気モーターを組み合わせたHEVが出品された。

つまりマツダは1990年ごろからREでの水素燃焼研究に着手し、REの欠点だった冷却損失が水素燃焼ではメリットになることを確認して

いたのである。その集大成が、2005年のTMSに出品したプレマシー・ハイドロジェンREハイブリッドコンセプトだった。水素燃焼REを発電専用にするシリーズHEVであり、REと電気モーターを並列配置し、しかも横置きだった。新登場のMX-30ロータリーEVは、燃料を現実的なガソリンに替え、発電用REと駆動用電気モーターを直列配置にした、2020年代のためのRE-HEVだと言える。過去からの流れをたどるとそう思えてくる。

もうひとつ、新しい8Cでの注目はトライボロジー（摩擦・摩耗・潤滑）技術としてのサイドハウジング表面溶射だ。あらゆるものが周辺技術に助けられている現状から考えると、トライボロジー領域の技術革新にRE性能ジャンプの期待を寄せてしまう。ADASと自動運転機能は半

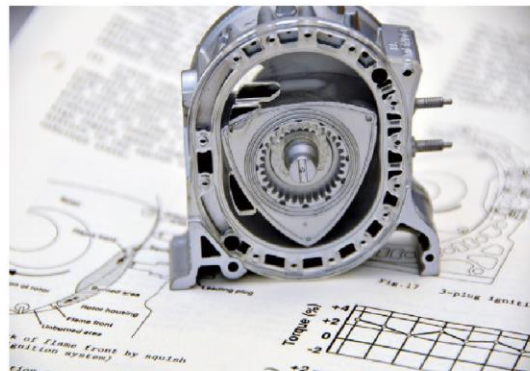
導体の進歩に支えられてきた。身近なところでは、スマートフォン用カメラと撮像素子の進歩がエンターテインメントと報道を変えた。ウクライナ戦争の前線で何が起きているかを真っ先に伝えてくれるのはスマホで撮影した動画である。こんなこと、20年前に誰が想像したか。チャットGPTのようなLLM（大規模言語モデル）に至っては1年前でも想像できなかった。

冒頭に記したように、REにとっての不幸は、携わったエンジニアが少なかったこと、知見を蓄積した企業がマツダだけだったことである。これを取り返すには周辺技術をどんどん取り入れるしかない。マツダは十分それを理解していたから8CはスカイアクティブREになった。レシプロでの最新成果とMBD（モデルベース開発）がREに入ってきた。しかし、まだレシプロ



← 最初のRE開発陣、いわゆるRE四十七士のメンバーだった室木 巧氏が見せてくれた小型の航空機用シングルローター空冷RE。どこかで無人機に使われているかもしれない。我われの知らないところでREは使われているという例だ。

← 以前はマツダ社内の売店で販売されていたREの模型。ハンドルでローターが回転する。さっぱり見なくなつたが、8Cの設計データをもとに再販してほしい。これは重要な布教活動であり、REへの関心を高めてもらう手段である。



に遅れをとっている。

挽回の手段があるとすれば、レシプロに比べて気が遠くなるほど長いシール寸法ではないだろうか、と考える。水素を燃料にすることで冷却損失がメリットになったように、トライボロジー技術の進化が「災い転じて……」を演じてくれるかもしれない。8C型に使われた溶射技術を実際に見て、そう感じた。

燃焼制御技術にも期待できる。スカイアクティブICEでは50ミリ秒での制御が可能になった。これは早い。しかし、ドライブシャフトのねじり共振周波数まではまだ遠い。制御時間を短縮できた先には、何か違った世界もあるような気がする。たとえば1回転で3回の燃焼ではなく、レシプロの気筒休止のような「間引き点火」は、筆者の素人発想ながら一定回転の発電専用ICEを考えるときは有効かもしれない、と考えたりする。

マツダにしかREの知見がないことも、もしかしたら「災い転じて」になるかもしれない。レシプロでの改良点を「REならどうなる」へとつねに結び付けて考え、しかも外には漏れない。同時に、いまでも「REをやりたい」という動機で入社する学生が多いことも大きな財産である。マツダ以外ではREの研究開発はできない。おそらく、何かREに使ってみたいアイデアを持っている人は少なくないと思う。

こういう若手に、RE開発部門に配属されなくてもRE開発に参加できる機会を与えるべきだ。ひとことで言えば脱オジサン企業。すでに一部で「自動車はオワコン」と言われている。筆者はそうは思わないが、そう思われてしまうことが自動車の不幸だ。これを払拭するには「いままではこうだった」「これがオレのやり方だ」などといった考えはいっさい捨て、REをやりたいなどという反骨精神を抱いた若者に目一杯力を発

揮してもらおう。そうでないと、簡単に辞められてしまう。

かなり荒唐無稽だが、筆者は「将来タイムマシンを実用化する企業」をたまに考えている。ただの遊びなのだが、マツダはやれるかもしれない、と思う。技術力うんぬんではなく意地と執念である。1960年代からREに取り組み、2023年にその最新型が出てきた。経営判断に意地と執念が入っている。見事だ。

そして、REに魅せられた研究者は海外にもいるということ。冒頭に「ソ連」と記したが、実際にそうだった。いまのロシアにも残党がいる。8C発売記念にウェブでRE世界会議を開催し、「16C」開発のためのクラウドファンディングを誰かが勝手に立ち上げ、ほかのだれかが勝手にREスタートアップを立ち上げる。こういうことは若者にしかできない。オジサンたちはただ笑って見ていればいいのだ。