F1ハイブリッドシステムの開発

Development of Hybrid System for Formula One

吉　田　将　隆*　　喜　多　真佐人*　　新　　博　文*
Masataka YOSHIDA　　Masato KITA　　Hirofumi ATARASHI

要　旨

2009年からF1世界選手権のレギュレーションが改定され，運動エネルギー回生システム（Kinetic Energy Recovery System：KERS）の使用が許可された．レギュレーションではKERSの駆動軸は後輪に限定され，出力は60 kW以下かつ１周あたりの使用エネルギーは400kJ以下と規定されている．Hondaは2007年夏から研究開発を進め，F1の特性に合わせた小型，軽量化を軸に高回転，高出力の直接油冷モータおよびモータ駆動用インバータユニットと電圧制御装置が一体となった水冷PCU（Power Control Unit），ならびに高出力密度リチウムイオンバッテリーを開発した．

2008年４月に直線路での初走行，５月にはシルバーストーンサーキットにおいて他チームに先駆けて世界初となる実車走行テストをおこない，その優位性と高い安全性を実証した．

ABSTRACT

In 2009, the regulations for the Formula One World Championship were amended to allow the use of kinetic energy recovery systems (KERS). The new regulations stipulated that the KERS drive shaft be limited to the rear wheels, that output should be no more than 60 kW, and that the amount of energy used per lap be no more than 400 kJ. Honda had been conducting R&D in this area since the summer of 2007, and had developed a high engine speed, high output, direct oil-cooled motor, a water-cooled power control unit (PCU) which integrated a motor drive inverter unit and voltage control system, as well as a high power density lithium ion battery, all based on being small and lightweight enough for Formula One characteristics.

This system was first used to drive on straight roads in April 2008, and in May of that year Honda beat out other teams to conduct the world's first driving tests in an actual vehicle at the Silverstone Circuit, where the technology's superiority and high level of safety were proven.

１．まえがき

Hondaは化石燃料の代替，排出ガスの削減，地球温暖化への影響低減という観点から，電気自動車や燃料電池車，ハイブリッド車の開発に取組んでいる．

F1世界選手権においても，2009年のレギュレーション改定にてブレーキング時にエネルギーを回収し駆動時のアシストに利用するKERSの使用が許可された．これに対応するためエネルギーの回収方法として，これまで培ってきたエレクトリックドライブ技術をベースに電気式ハイブリッドシステムを選択し開発を進めた．

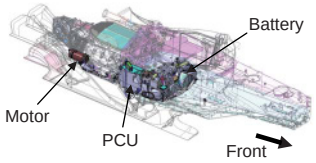
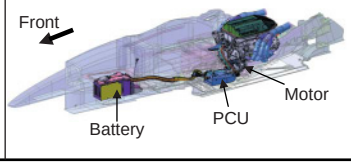
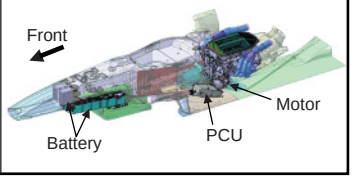
１ラップあたりに使用できるアシストエネルギーと最大出力がレギュレーションによって規定されたため，本開発ではレーシングカー特有の高度な運動性能をそのままに高出力化技術と高トルク化技術を軸に可能な限り小型化と軽量化をおこない，レーシングカーへの搭載を可能としたモータ，PCU，リチウムイオンバッテリーを開発した．またレーシング走行時の出力特性の要求に対応すべく高応答性を実現した．

2007年の夏から本格的な開発に入り，９カ月の短期間に先行車であるRA1082（機能確認車）を実走させ，その後F1界で世界初となるレーシングコースでの全開走行をおこなった．RA1082で確認した基本機能を元にRA1089（レース先行車）を経て2008年末までにRA109K（レース車）を確立するまでに至った（Table 1）．

本稿では本F1ハイブリッドシステムの開発について紹介する．

＊四輪R&Dセンター

Table 1　Specifications of KERS

Vehicle code		RA1082	RA1089	RA109K
Shake-down		2008-APR	2008-NOV	2009-JAN
Motor	KERS power	60 kW	60 kW	60 kW
	Torque	45 Nm	45 Nm	45 Nm
	KERS energy	800 kJ	400 kJ	400 kJ
	Location	Transmission	Front of engine	Front of engine
	Dimension	ϕ100 x 202	ϕ100 x 190	ϕ100 x 190
	Max rpm	21000 rpm	21000 rpm	21000 rpm
	Weight	7.7 kg	6.9 kg	6.9 kg
	Cooling	Transmission oil	Engine oil	Engine oil
PCU	Power module	Si-IGBT/SiC-diode	Si-IGBT/SiC-diode	Si-IGBT/SiC-diode
	VCU type	Boost copper	Switched capacitor	Switched capacitor
	Operating voltage	680 V	560 V	580 V
	Weight	11.2 kg	8.0 kg	7.4 kg
	Cooling	Water	Water	Water
Battery	Type	Li-ion	Li-ion	Li-ion
	Cell number	114	108	106
	Weight	22.4 kg	21.2 kg	20.8 kg
	Cooling	Air	Air	Air
Layout				

2．開発コンセプト

2009 年 F1 レギュレーションにおいて KERS システムの接続は後輪に限定され，コース１周あたりの最大使用エネルギーは 400 kJ 以下，かつ出力は 60 kW 以下と規定されている．本開発テーマでは F1 車両に搭載するため小型化と軽量化という観点のみならず「勝てる車」として必要な性能目標を以下のように設定した．

（1）システム重量：30 kg 以下

（2006 年の車体バラスト重量の 60%以下）

（2）アシスト性能：出力 60 kW で連続時間 5 sec 以上

［オーバーテイク（追越し）が可能な出力とアシスト時間］

各機能部品の性能および重量，重心などの目標設定にあたってはレース戦略やビークルダイナミクスシミュレーションなどを駆使してあらゆる面から検討をおこなったが，その検討を重ねる中でコンセプトに関する重大な課題があった．

ひとつはレース戦略上オーバーテイクとラップタイムのどちらを重視するかということである．400 kJ を１度に使用するシングルアシストと最大 400 kJ を数回に分けて使用するマルチアシストを比較した場合，各コーナでエネルギー収支を合わせるマルチアシストの方がシングルアシストより約 0.1 秒ラップタイムを向上できることがシミュレーションにて明らかになった．Fig. 1にアシスト方式違いによる各サーキットでの Time gain を示す．マルチアシストはエネルギーストレージを小さくできるため，エネルギー容量が少なく出力密度の大きいスーパーキャパシタの搭載も考えられた．これは車体への影響がより少なくなるという相乗効果もある．しかしレースでは他車よりも前に出ないと勝利はできない．例えばタイヤグリップが駆動系トルクを上回る（タイヤが空転しない）180 km/h時点からア

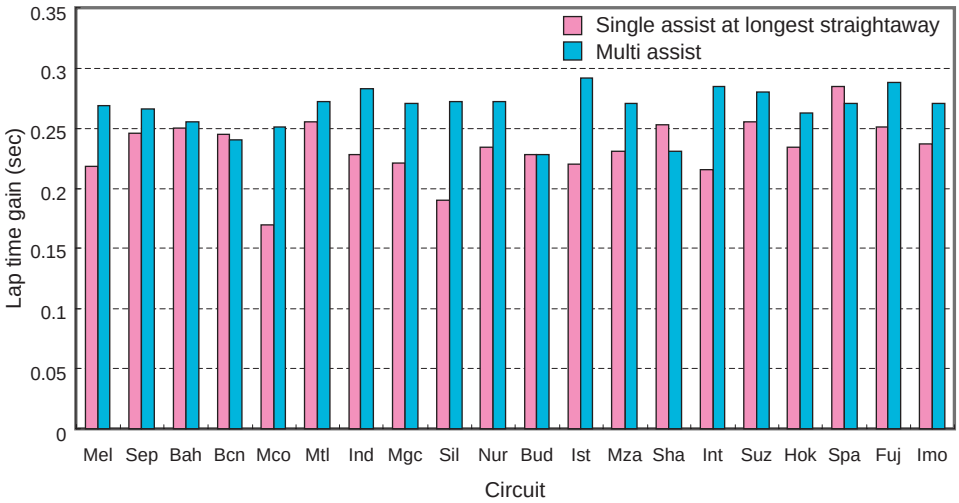


Fig. 1　Lap time reduction

シストを開始した場合，出力 60 kW を 6.666 秒間使用(エネルギー換算で400 kJ)すると，アシストなしの場合に比べ車速で 15 km/h 上回ることが可能で，その差は距離にして 20 m になる．仮にコースレイアウトの関係などで 6.666 秒の使用が不可能でも他車に対して 2.78 秒で 5 m(1 車身)，4.22秒で 10 m(2 車身)の差となることからオーバーテイクが可能になり，シングルアシストがレース戦略上有効と考えられる(Fig. 2)．このように KERS を実際のレースでどのように使用するか意見が分かれたため，目標要件も揺れ動いたがHRF1(Honda Racing F1 Team)と共に議論を重ね，最終的にオーバーテイクを重視するということでコンセプトを決定した．

ふたつ目の課題は KERS のブレーキング時に得られるエネルギー回収量を最大にすることとドライバビリティの両立である．レギュレーションではブレーキ協調制御等が禁止されているため，回収エネルギー量はコースレイアウトだけではなく，ブレーキの作動時間や強さなどのドライビングスタイルで変化する．またサーキットによっては目標のエネルギーが回収できないことがシミュレーションにより明らかになっていた．これらに対してはドライビングスタイルの差が最小限になるようにシフトチェンジ時の損失や，モータフリクションを相殺するためのゼロトルク制御の損失を最小にすること，さらにエンジンブレーキと回生ブレーキの最適化配分や各機能部品が使用領域において最高効率となるように設定して対応した．またより多くの回生エネルギーを得るために例えば一定のブレーキ圧以下でなければ回生を許可しないなどという，いくつかの回生条件に関するレギュレーションの撤回を FIA(国際自動車連盟)に進言していくこととした．

3．KERS システム開発

3.1. 車載パッケージ開発経緯

3.1.1. RA1082(機能確認車)の開発

RA1082 は実走テストによる KERS のメリットを明確にすると共に，各機能部品の F1 適合性に対する課題の洗い出しを目的に製作された．ベース車体はRA106(2006年レース車)を使用し，PCU およびバッテリーは重量部品のため車体重心への影響が少ないモノコック(コックピットを形成する CFRP ボデー)内部のドライバーズシートの後ろを改修して配置することとした．この部分にPCUやバッテリーなどの高圧部品を配置することは車体重心位置や電気安全性に対してメリットがあったものの，同時にこの部分に存在するガスバック(燃料タンク)容積を低下させ，最大ガソリン搭載量は 140 リットルから約 40%減の 83 リットルに減少した．これはレース戦略上の課題になると考えられた．モータも本来なら車体重心に近いエンジンに直接搭載をするべきであったが，2006年から施行されたエンジンホモロゲーション制(開発凍結)によりエンジンの変更が認められず駆動軸の接続ができないことから，モータをトランスミッションのケース内部に収めることとなった．そこで後方への空力を阻害せずケースのバルジが最小となることを

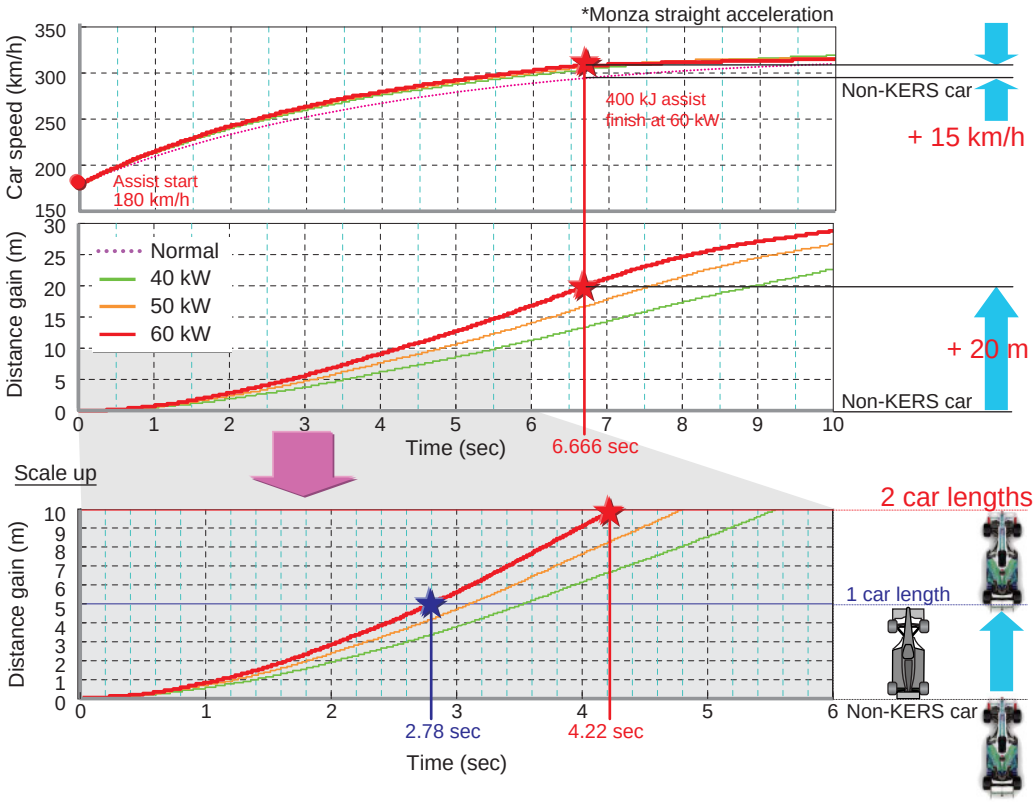


Fig. 2　Assist time / car speed and distance gain

優先し，レイシャフト（ドリブン側シャフト）の５速ギヤにモータギヤを接続した．またトランスミッションとエンジンの取付け締結部の関係からモータの直径を 100 mm に決定した．

3.1.2. RA1089（レース先行車）の開発

RA1089 は RA1082 の課題を踏まえ，KERS の車載影響を最小限にしつつ高度な運動性能を維持することを目的に設計が始まった．またこの車は来るべき2009年ウィンタテスト（シーズン前テスト）用車両という重要な位置づけであった．車体性能と KERS 性能を両立させるような前例の無い搭載レイアウトは難航し，シャシ制作に入っても設計変更が度重なり製作現場の負担となった．さらに当初認められていなかったKERS取り付けのためのエンジン変更が，Honda から FIA への要請により許可されたため，各機能部品の搭載を再度見直すこととした．その頃既に RA1089 のシャシレイアウトは決定時期を間近に控えていたが車体運動性能を第一に考え，エンジンの改造を含む各機能部品の冷却仕様，また衝突安全性の確保などすべての項目が成立する搭載位置を HRF1 のエンジニアと共に短期間に再検討した．結果として数多くの案の中からモータはエンジンフロント側，PCUは左側サイドポット内，バッテリーはモノコックフロントのキール部に搭載することを決定した．モータ搭載位置による比較検討を Table 2 に示す．この決定によりエンジンとモータの駆動軸を接続するモータ用ギヤトレインが新規に必要になったばかりか，モノコックの外に配置された PCU やバッテリーの衝突に対するタフネスと，従来に無い手法での電気安全性を確立する必要性に迫られた．これらを最優先し，各機能部品の仕様検討を初めからやり直すこととなった．このことはPCUおよびバッテリーの単体テスト期間を圧迫し，ひいてはシステム立ち上げを短期間にてやらなければならないことを意味した．

つぎの課題はガスバックとモータの位置関係である．エンジンのモータ駆動伝達を直接クランクシャフトにおこなうとクランクシャフト前方にあるガスバック周辺にモータ容積分のリセスをつける必要がある．空力影響を及ぼさない左側面までモータをオフセットし，モノコック後端面（バルクヘッド）とエンジンの間にギヤトレインを配置して可能な限りガスバック容量の減少を少なくした．

各機能部品が全くの新規開発になったことで日本と UK の二拠点で困難な作業が長期間続いたため，RA1089の完成は遅れ，当初の目標であった11月のシーズン最初のウィンタテストにはシステムチェックが間に合わず，目標を第二回目のウィンタテストに変更することとなった．

3.1.3. RA109K（レース仕様車）の開発

RA109K はレース用車両として設計された．KERS 部品の配置は RA1089 とほぼ同位置であったが RA109K は空力部品であるエンジンカウル周辺が RA1089 に比べ，さらに小さく絞られ，カウル内に配置されたPCUとバッテリーの形状は再び一から見直す必要があった．空力性能は風洞テスト時間に左右されるため，空力部品をまず３月の開幕戦ターゲットとして製作し，それ以降も順次アップデートをおこなう．しかし KERS 部品は製作時間や信頼性確認に時間がかかるため簡単には仕様変更はできない．これらが両立する仕様の開発は 11 月末まで日本と UK の二拠点，24 時間体制という形で進められた．特にバッテリーモジュールは機能部品の中でも一番大きな容積と重量を占め車体の重量配分や空力パッケージを左右する．このバッテリー配置の決定は当初の仕様決定時期を割り込んだが，最終的にはバッテリーモジュールをキール部と，それまで認められていなかったノーズ部に分散配置することとした．しかしノーズ部は FIA の衝突レギュレーションが厳密に規定されているため，HRF1は衝突レギュレーションに対してシミュレーションや台上衝突試験をおこない安全性を証明して FIA の認可をとった（Fig. 3）．

Table 2　Comparison of motor position

Motor position	Mass	Front-weight distribution	C.O.G
Engine front - LHS	8.69 kg	-0.60%	+1.0 mm
Gearbox	10.30 kg	-1.13%	+1.4 mm

3.2. KERS システム概要

本節ではレース適用車両であるRA109Kについて述べる．

F1 ハイブリッドシステムの概要を Fig. 4 に示す．モータの駆動軸はモータ用５連ギヤトレインを介してエンジンのカムギヤトレインに接続される．モータと PCU はモノ

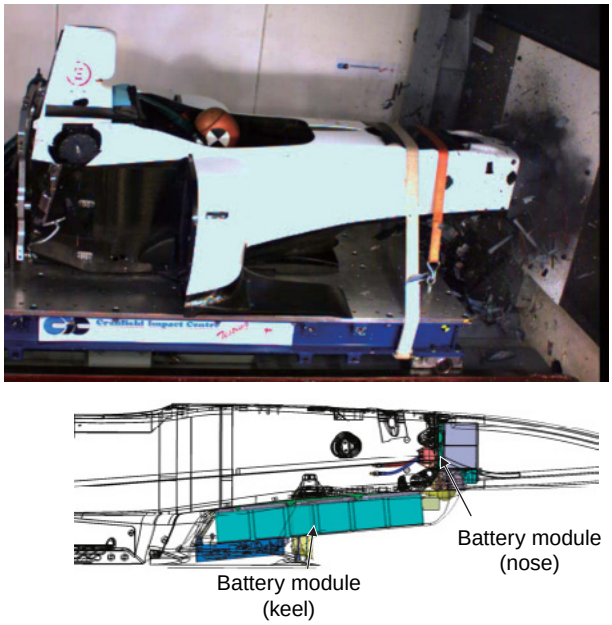


Fig. 3　Front collision test for FIA regulations and battery layout for RA109K

コック左側面に防振マウントされ，モータはエンジンオイルで，PCUは専用冷却水にて冷却される．バッテリーはモノコック前方に固定され，温度は前方からの走行風で調整される．このほかPCUはFIA Standard ECU(S-ECU)とCAN通信でつながれており相互指令，監視をおこなっている．アシストと回生はドライバの操作に連動して制御される．

F1車両では振動環境が量産車に比べて厳しいため，PCUやバッテリーは 20 G の振動でも機能上課題のない構造とした．モータはエンジン振動が印加されるため振動レベルはそれ以上の条件となるが加振装置の能力を超えるため単体での評価がおこなえず，エンジンベンチ，および実走テストの確認で信頼性を判断した．また衝突時の安全性を考慮し FIA のサイドインパクト要件を満たす構造とした．

3.3. モータ用ギヤトレイン

モノコックの左側面に位置するモータとクランクシャフトを連結する手段として5連ギヤトレインを採用した．ギヤはエンジンのカムギヤトレインにかみ合い，クランクシャフトと接続した(Fig. 5)．これらの KERS 専用パーツは，エンジン本体ではレギュレーションで使用が禁止されているマグネシウムカバー，チタンボルト，セラミックボールベアリングを採用して軽量化をおこなった．

もともとエンジンとモノコックの間は数ミリのクリアランスしかなく，ここにギヤトレインを配置するにはバルクヘッドにリセスを設けて空間を設定しなければならない．リセスはモノコック剛性を下げることやガスバック容量を減少させるため，ギヤトレインハウジングをエンジンフロントカバーと一体化してレイアウト性を向上させた．ギヤトレインは5連で並列に配置し厚さを 30 mm 以下としたが，このようなギヤトレインの形態を持ち，双方向にトルクを伝達する手法は初めての経験であったため開発途中ではギヤの共振によるシャフト折損などが頻発した．その後細部の仕様変更と耐久テストを繰り返した結果，実走テストまでに耐久性についても成立させることができた．

3.4. モータ

F1に搭載するためには小型，軽量，高出力は無論のこと，高効率化はオーバーテイクのエネルギー量確保の重要なファクタであり勝敗を決すると言っても過言ではない．したがって両者を高い次元で実現するためブラシレス DC モータを採用した．前述のように車体搭載性の観点で直径を 100 mm，全長を 200 mm 以下で設計することとしたが，要求出力から換算すると出力密度は 8 kW/kg 以上となり，量産車のモータを大幅に超える厳しい要求値であった．さ

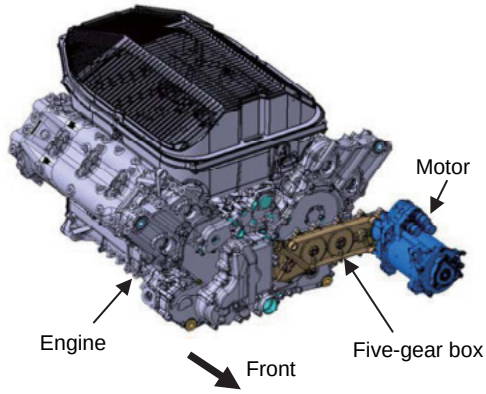


Fig. 5　Five-gear box for motor

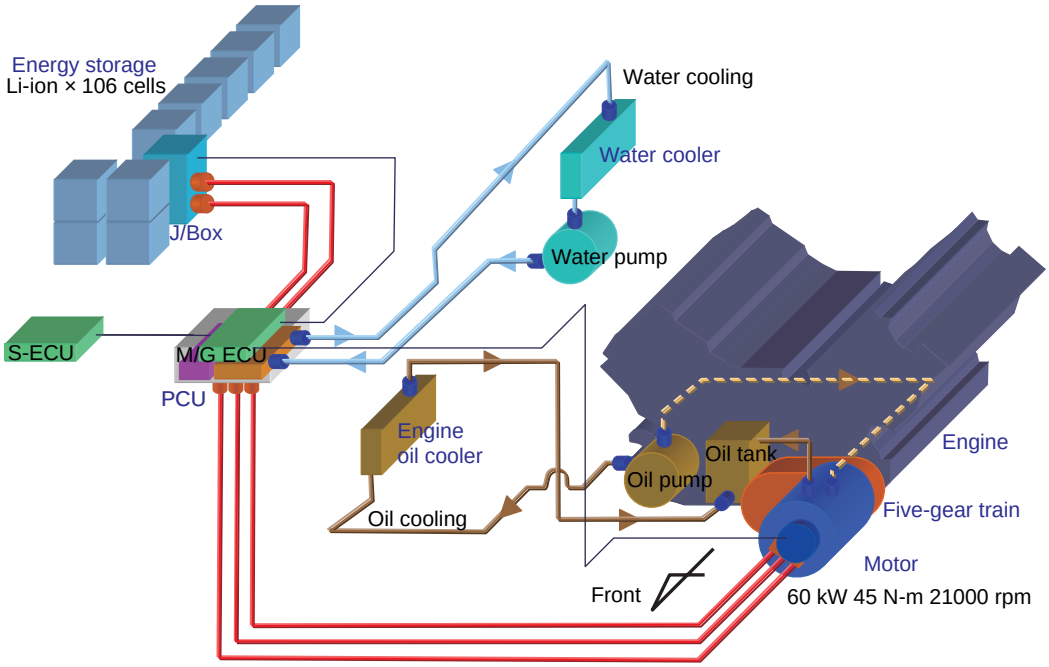


Fig. 4　Hybrid system

らに過去のサーキット走行データから KERS のシミュレーションをおこない，どのサーキットにおいても最低限の回生量を確保できるように 13000 rpm 以上で最大 60 kW の出力と回生が可能なモータとした．そのため，電磁鋼板および磁石材料の新規開発，巻線手法の見直し，新たな冷却手法とロータ構造の採用などモータのすべてに渡って設計を見直した結果，8.7 kW/kg という高出力密度を高い効率を維持しながら達成できた(Fig. 6)．

ロータは新規開発の高保磁力磁石(160℃でiHc=1.1MA/m)を採用すると共に，従来のモータに対して２倍以上の高回転を実現するため，磁石の飛散防止策として有機系の高強度繊維によるフィラメントワインディングを採用し磁石外周を保護した．また磁石の磁場配向を磁極中心に集中させるため磁場角度θin，θout をつけたことでトルクを８％向上させ，軸長方向に磁石を分割接着し渦電流損による温度上昇を軽減した．ステータを構成する電磁鋼板は鉄－コバルト(49Fe-49Co-2V)をベースに 100μm 薄板化による渦電流損低減，圧延後熱処理によるヒステリシス損低減，酸化絶縁薄膜による占積率向上に成功した．この結果従来の板厚 200μm の珪素鋼板(Fe-Si)に比べて飽和磁束密度を 30%，トルクを15%向上させつつ鉄損を60%低減した．ステータ巻線は高トルクかつ低損失のために重ね巻とし，ステータ両端の渡り部は耐傷銅線を用いてプレス成型し従来にない低い渡り高さを実現した (Fig. 8)．またモータの小型化に伴い，従来のステータハウジングによる水冷ジャケット方式ではモータ駆動時の巻線を耐熱温度内に収めることが不可能なため，ステータは巻線端部を直接エンジンオイルで冷却する構造(Fig. 9)とし，専用のラジエータを用いること無く成立させた．また冷却オイルをロータが攪拌するとフリクションが増大するためロータに冷却油が付着しないよう円筒カバーを用いてステータ側油室を完全シール構造にした．この結果モータ単体効率はアシスト時で平均回転数 20000 rpm 平均効率 95%，回生時で平均回転数 16500 rpm 平均効率 93%であり高出力と高効率を両立した(Fig. 10)．

3.5. PCU

PCU はモータを駆動するためのインバータユニット(PDU)と電圧を自由に昇降圧することが可能な電圧制御装置(VCU)が一体となっている．PCUはモータへ最適な電圧，電流をバッテリーから供給またはバッテリーへ回生するためのもので，モータの高効率，小型化へ大きく寄与する．PDU に搭載された Intelligent Power Module(IPM)は専用設計にて小型化と損失低減を図ったほか，フライホイールダイオードのノイズ低減を目的に車載用として初めて SiC

Fig. 6　Formula One KERS motor

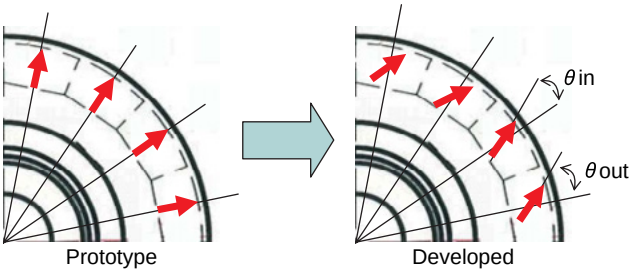


Fig. 7　Direction of magnetization

Fig. 8　Core assembly

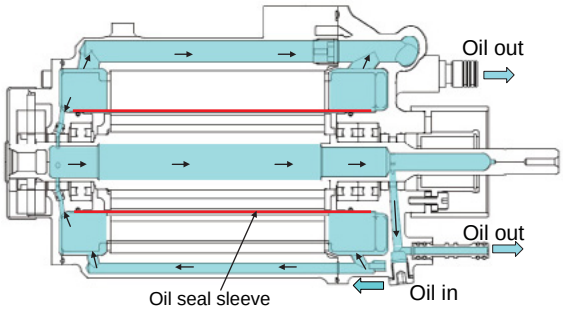


Fig. 9　Section of motor with cooling oil flow

ダイオードを採用した．

VCUはブーストチョッパ方式にて開発を始めたが，PCUも車載搭載要件が厳しく小型軽量化が必要なことからシステム動作周波数を引き上げて，リアクトル(昇圧用コイル)の小型軽量化が望めるスイッチドキャパ方式に変更した(Fig. 11)．リアクトルは前述のシステム動作周波数アップだけでなく，圧粉磁心材採用による 3D 形状コアとすることでさらなる小型軽量化を図った．しかしスイッチドキャパ方式は車載実績が無く原理証明レベルの技術であったため，その成立性には難航を極めウィンタテストへのサーキット移動直前まで対策に追われた．結果的にはRA1082用PCU に比べ 3.8 kg の軽量化が達成できた．

RA1082 の PCU はモノコック内部に配置されていたが，RA1089から急遽モノコック外部に配置されたため，新たに衝突要件が付与された．軽量化と衝突要件を両立できるようにそれまでのアルミケースから CFRP ケースへの変更を検討した．またPCUケースの形状も空力性能を優先に考えたカウル内部には搭載スペースの余裕がないため，空力カウル部品変更のたびに形状を見直すこととなった．

RA109K の PCU 初期仕様は専用冷却水回路で冷却をおこなっていたが，高耐熱化と低損失化を目的に Si-C MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)を使用したパワーモジュールと新規ヒートスプレッダ(銀－ダイヤ複合材)を開発しており，これによりエンジン冷却水を共用したさらなる小型軽量化 PCU をシーズン中盤のイギリス GP へ投入する計画であった．

3.6. エネルギーストレージ

F1 用 KERS としての目標を達成するためエネルギーストレージ(ES)の目標値はシステム効率を考慮して以下のように設定した．

(1)ES 出力端で 70 kW 以上，実充放電エネルギー量 500 kJ 以上を有すること．

(2)衝突安全の確保のため，ボックスは FIA サイドインパクトテスト同等以上，内部構造は 100 G 以上に耐える強度を有すること．

KERS 機能部品の中でもバッテリーの重量比率は高く，60 kW の出力を得る場合，従来のリチウムイオンバッテリーでは 30 kg 以上になってしまいレース車にこのまま搭

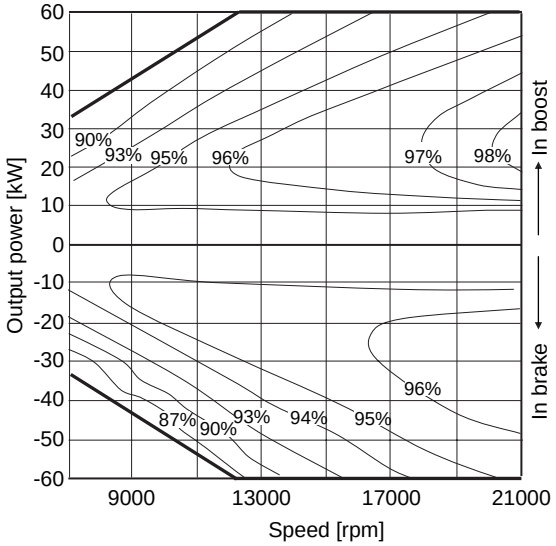


Fig. 10　Motor efficiency

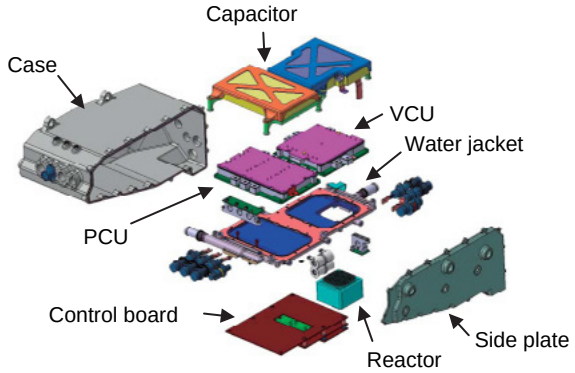


Fig. 12　View of PCU for race specification

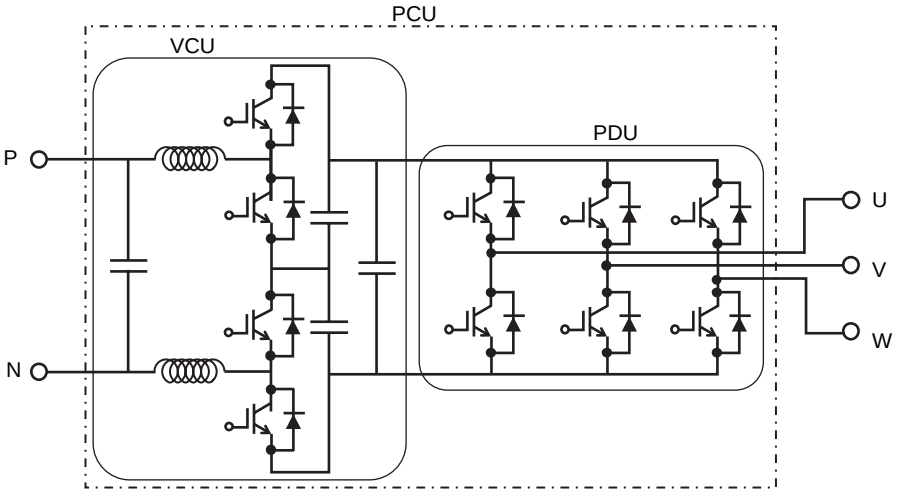


Fig. 11　Race specification PCU block diagram

載すると競争力低下を招く．そのため市販車用に研究開発中のリチウムイオンバッテリーをベースとし，出力に特化したバッテリーを新規開発した．出力密度の向上は2009年レース供給体制を確立する直前までおこなわれた．最終的に出力密度はRA1082仕様の約5000 W/kgをさらにRA109Kで約6000 W/kgへ進化できた．これは一般的なニッケル水素バッテリーの約５倍，リチウムイオンバッテリーの約２倍の高出力密度となる(Fig. 13)．

一方でRA109Kのバッテリーの搭載場所は衝突要件が成立するノーズ部とキール部に２分割搭載した．冷却は車体重量への影響を最小限にするため車体前方からの導入空気による冷却とし，防水処理は単モジュール制作時にセルの接続部や高圧端子部をモールドすることによりおこなった．またセル温度と電圧を常時モニタするセンサターミナルユニットをバッテリーボックスごとに配置した(Fig. 14)．

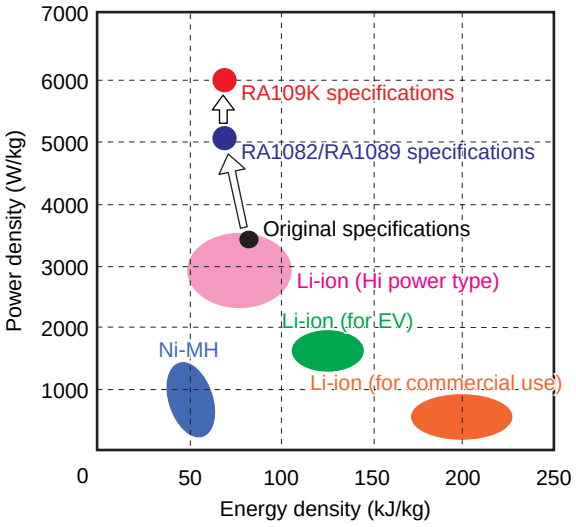


Fig. 13　Battery specifications

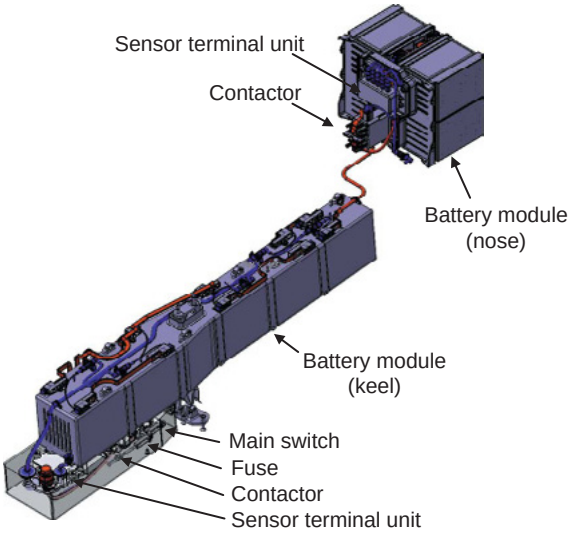


Fig. 14　Battery pack with control unit

3.7. 高電圧安全

Hondaの高電圧安全に対する基本思想は，車両衝突時にも潰れにくいエリアに高圧部品を配置することである．ところがレースでは戦略や車体パッケージングからKERS高電圧部品はモノコック外の潰れる可能性があるエリアに配置された．この条件で高電圧安全を確保するため，KERS導入に際し量産経験に基づいた安全対策提案を積極的に発信していく必要があると判断し，FIAの統一安全基準導入の動きに先行してHonda独自の安全思想を構築した．KERSにおける高電圧電源とは下記の３ユニットである．

・高電圧バッテリー
・PCU内コンデンサ(充電中の場合)
・モータ(外回し時に逆起電圧発生)

高電圧安全の確保にはKERSユニット，ケーブル類の絶縁確保が重要である．さらに事故や他車との接触により絶縁破壊の可能性がある場合は上記３ユニットからの高電圧供給が確実に遮断される必要がある．またメンテナンス時はカバー，ケース等の絶縁構造取外しに対する配慮も必要である．さらにモニタリング機能(地絡検知)の整備も重要と考える．以上の観点より具体的には下記構造により安全を確保した．

3.7.1. 衝突時の安全性

(a)衝突時に想定される荷重による絶縁構造物(ケース，カバー類)の破壊を防ぐ．具体的にはFIAサイドインパクトテスト同等条件で絶縁構造が破壊しない強度を確保した．

(b)下記の場合メインコンタクタを遮断すると同時にPCUコンデンサ内の電荷を放電した．

・S-ECUに接続されるFIA走行データ検査用記録ユニットが設定値以上の加速度を検知した場合
・PCU制御基板上の加速度センサが設定値以上の加速度を検知した場合

具体的にはVCUのスイッチングによりVCU両端コンデンサ間で電荷を移動させ，スイッチング損失や導通損失により電気エネルギーを熱に変えて放出した．

(c)制御電源の供給が絶たれた場合にPCUコンデンサ内の電荷を放電する回路を制御基板上に設置した．

(d)設定以上の荷重がかかった場合，高電圧コネクタ固定プレートが破壊する構造にした．プレート破壊荷重をケーブル破断荷重より小さく設定し，衝突時に高電圧配線が破断するより先にコネクタが外れるようにした(Fig. 15)．

3.7.2. メンテナンス時の安全性

(a)イグニッションオフにおいてはメインコンタクタを遮断すると同時にPCUコンデンサ内の電荷を放電した．

(b)DCケーブルコネクタにインターロック機構を採用し，高電圧コネクタ取外し時は端子部に高電圧が印加されない構造とした．高電圧コネクタカバーを脱着するに

は制御ハーネスの取外しが必要となり，制御電源が切れると PCU は放電しコネクタに高電圧は印加されない．バッテリー側にも同様の構造を採用することで安全を確保した．

3.7.3. 地絡検出システム

PCU 制御基板上に検出回路を実装し KERS 動作中(メインコンタクタ接続中)は常に高電圧部地絡検出システムを動作させた．地絡を検出した場合は警告灯を点灯すると同時にメインコンタクタを遮断し安全性の確保をおこなった．

3.8. 制御

KERS 制御システムは S-ECU 制御部および PCU 制御部により構成した(Fig. 16)．

S-ECU 制御部はドライバ操作に基づく電力指令算出とモータ出力および1周あたりのアシストエネルギーの監視をおこなった．アシストはアクセルペダルが全開状態でドライバがアシストボタンを押すことによっておこない，エネルギー回生はブレーキング動作でのみおこなった．モータ出力はトルクセンサ等の値を用いて計測され，違反と判断された場合は数秒間の出力制限ペナルティが科された．アシストエネルギーはモータ出力の積算で算出され，400 kJ に達した時点でアシストを停止した．

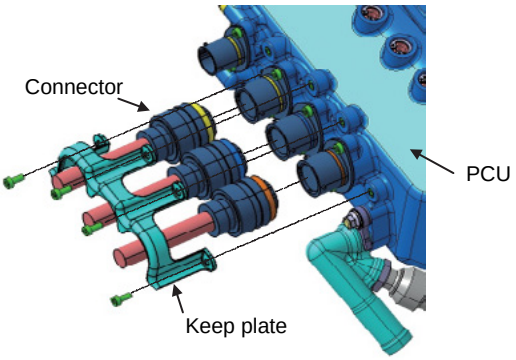


Fig. 15　Structure of high voltage connectors

KERS を最大限に生かすためには 400 kJ を効率的に使用することとそれを可能にする回生エネルギーの回収が求められる．400 kJ のアシストをおこなうにはシステム効率による損失およびゼロトルク制御によるエネルギー消費等を考慮すると 500 kJ 程度の回生エネルギーが必要と試算された．カーボンディスクブレーキは制動力が大きく短時間で減速できるため，回生トルクを付加すると制動力が安定せず，スタビリティ低下を招くことが考えられ，サーキットや路面状態などによっては十分に回生をおこなえずエネルギーが不足することが予想された．そのため協調制御を含めた各制御部の最適化および各種シミュレーション結果の仕様反映による各機能部品の制御の最適化をおこなった．また実走テストを通じブレーキの前後バランスや回生ブレーキとエンジンブレーキの配分の最適化に努めた．これらの作業はすべて高次元でのバランスが必要で，実走テストのセッティングはS-ECUの機能制約や年間走行距離制約もあり困難が予想されたが，ドライバのからの改善要求もなく初期仕様としては問題ないレベルにあった．

ドライバに委ねられるアシスト開始操作は駆動力過多によるホイールスピンが発生しない最低車速から実施することとした．これは低いギヤでのモータトルクによる必要以上の駆動力の増加と走行抵抗増加によるアシスト効率の低下回避を同時におこなうためである．またアシストによる加速にはギヤレシオや空力設定の影響があるため，各サーキットでのオーバーテイクに必要な時間やエネルギーを算出してその有効性を明らかにすると共にその結果を ES 容量の決定や各機能部品の冷却設計へ有効に活用した．

PCU 制御部は S-ECU 制御部からの電力指令に基づいて各機能部品の制御をおこなった．PCUマネージメント制御，モータ制御，VCU 制御，バッテリー制御により構成され，既存仕様をベースにレース適用に必要な機能を構築した．

PCUマネージメント制御は電力指令とシステム状態との調停により，システム停止や出力停止あるいはパワーセーブといったシステム動作を決定した．

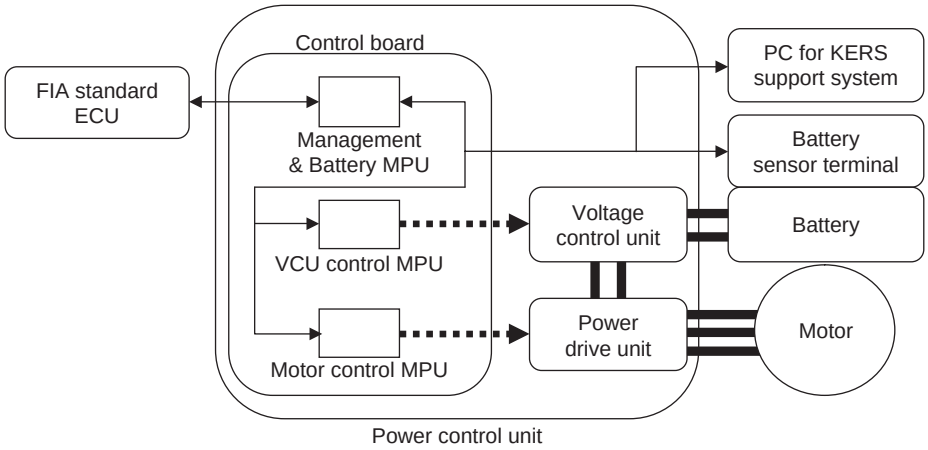


Fig. 16　Control system configuration

モータ制御とVCU制御はモータ出力を制御した．RA1082でのギヤボックスへのモータ接続によりシフトダウン時にトルクを抜く制御が必要となったが，シフトダウン時は減速中の回生が可能な時間であり，エネルギーが回生できないトルク抜き制御は極力短期間にしたいと考えた．レギュレーションで規定されている許容最大応答時間である 50 msec の応答性ではトルク抜き制御からの復帰時間が無効となるため，回生できない時間短縮を目的に 15 msec 以内の応答性を目標とした．電力指令はマイナス 60 kW から 0 kW あるいは 0 kW からマイナス 60 kW へとギヤの切り替わりごとにステップ状に変化することとなり，回転変動および負荷変動が大きな中での制御性の確保が要求された．モータ制御はベクトル演算を用いた電流フィードバック制御をおこなったが，ステップ状の電力指令に対し界磁成分電流の挙動を抑えきれずに過大電流が流れてしまうことがあった．VCU 制御では出力電圧フィードバック制御をおこなったものの急峻な負荷変動に追従しきれず過大電圧を頻繁に発生させた．これらの対策は実走テスト直前までおこなわれて，モータ制御での目標電流値算出手法の改良および両制御部でのフィードフォワード項による電圧印加により 15 msec 以内に対して十分な応答性と安定性を両立した．

またモータ制御にて通常走行(アシストなし)時のゼロトルク制御をおこなってエンジン加速を妨げないようにするなど速さの追求に必要と思われる技術要素を惜しみなく投入した．さらに 2009 年ウィンタテストからの投入を目指し， PDU の損失を最小にするため従来の PWM 変調(pulse width modulation)の duty を 100%としてスイッチング回数を低減した１パルス制御と，モータ効率を最大にするため VCUの可変電圧制御を開発した．またこれらのシステムの協調制御をおこないシステムの最適化を同時にはかった．

バッテリー制御はセンサターミナルにて取得したバッテリー電圧と温度の監視および充放電量算出に基づく充電状態の的確な把握によりリチウムイオンバッテリーを安全かつ高効率に使うことを可能とした．

4．台上テストおよび実走テスト

4.1. 台上テスト

システム確認および耐久用として２基の F1 エンジンテストベンチを使用した．それらには KERS 対応としてバッテリーシュミレータ(BTS)およびインバータスタンド(Fig. 17)を導入した．これまで量産車には無い高応答化に対応するためにまったく新しい BTS を導入し RA1089 の開発に合わせてエンジン，モータ，PCU，バッテリーなど，すべてを組合せたシステム全体のテストを実走相当の過渡負荷状態にてトラブルを出さずに実施することが可能となった．

これにより KERS システムの各機能部品の動作確認から実車両を用いたシステム全体の機能確認，機能保証テストまですべてのテストを台上置換し，レギュレーションで厳しく制限されている実走テストをおこなうことなしに KERS システム全体の早期熟成を図った．

Table 3　Testing items on engine dyno bench

Function test	-System operation / setting -System output -System efficiency -Fail safe action -Temperature measurement -Vibration measurement -Gear behavior -Oil pressure measurement -Tool operation check
Durability test	-Engine and KERS parts durability test -Energy management

テストベンチの基本形態を Fig. 18 に示す．エンジンを冶具の一部とし KERS システムを搭載した．ベンチテスト装置を用いて各種評価テストを Table 3 の各項目に即し定常あるいは過渡負荷状態にてテストした．ベンチ上での過渡負荷テストは，実際に走行経験のあるサーキットデータをもとに実走行状態を再現するモード運転をおこない，過渡性能評価，特にエネルギーマネジメントや各部の温度測定などを実施し，開発スピードアップに対し有用なデータの取得とフィードバックを可能とした．モード運転の代表例を Fig. 19 に示す．

これは以下の組合せでテストをおこなったデータである

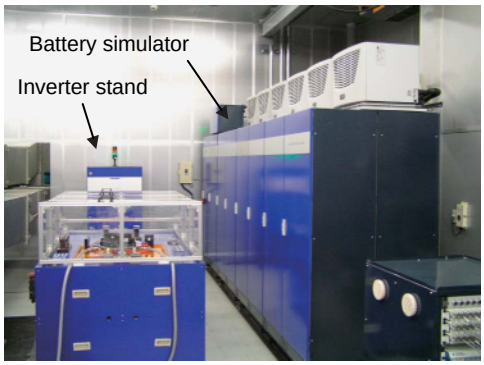


Fig. 17　Battery simulator and inverter stand

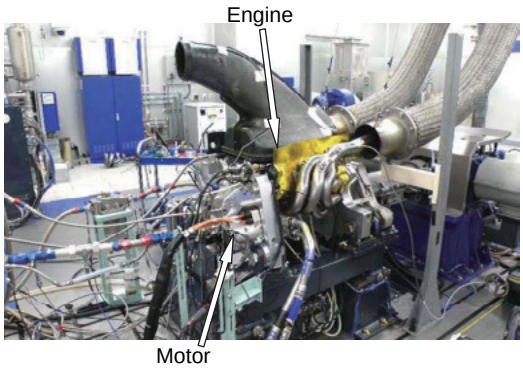


Fig. 18　Combination examination of engine and motor

Table 4　Durability test results of dyno

Event	Purpose	Mileage
KE-01	Check environment and first issue parts	238.4 km
KE-01.5	Check track-1 specification parts	465.4 km
KE-02	Track test simulation (for Jerez circuit)	611.0 km
KE-03	Check track-2 specification parts	748.8 km
KE-04	Check race specification parts	1351.9 km
KE-05	Check engine gear durability with extreme circuit mode (test stopped due to schedule)	566.1 km

が，実際にサーキットを走行する以前に機能や耐久テストをベンチ上でおこなえることを示している．

・Driver : Jenson Button
・Circuit : Monza
・Car : RA1082 + KERS System

さらに RV(Real vehicle)ベンチ[1]では上記パワートレインテストベンチの環境に加え，実際の F1 モノコックと冷却系およびパワートレインをベンチ上に搭載し，実車環境での各種テストが可能となった(Fig. 20)．実際にRA1082をRV ベンチに設置し KERS システム特有の電気ノイズ対策をサーキット走行前に完了した．ただし以後の車両では製作日程の関係でRVベンチを使用することはなかったが，台上ベンチとしてサーキット走行前にパワートレインの耐久テストをおこない，すべての機能部品で２レースイベント分(1350 km)以上のマイレージ保証をおこなった(Table 4)．

4.2. 実走テスト

HRF1は2008年４月下旬に初のKERS搭載マシンRA1082のシェイクダウン(S/D)をおこない，その後 RA1082 で４回，RA1089 で２回の実走テスト走行をおこなった．

最初の実車である RA1082 の車体改修は S/D の４日前にようやく車体が完成したが，当初の予定であった２週間のシステムチェックを大きく割り込んだ上，車体セッティングや追加改修などから実質２日間程度の準備期間しか得られなかった．実走テストメンバはシステム動作チェックと初期トラブルに短期間で対応せざるを得ない状況で所定の期日までには完全動作するまでに至らなかった．そのため最初のS/Dでは通電状態を維持し，システムの安全性と

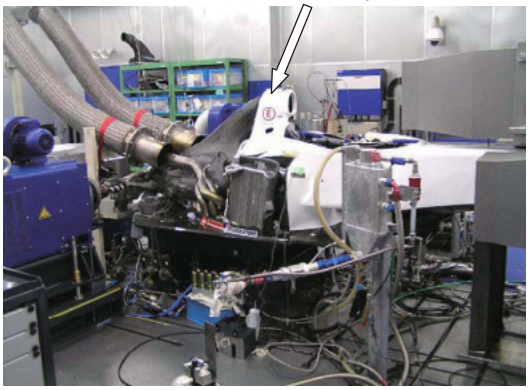


Fig. 20　Bench examination using RV bench with real Formula One KERS car

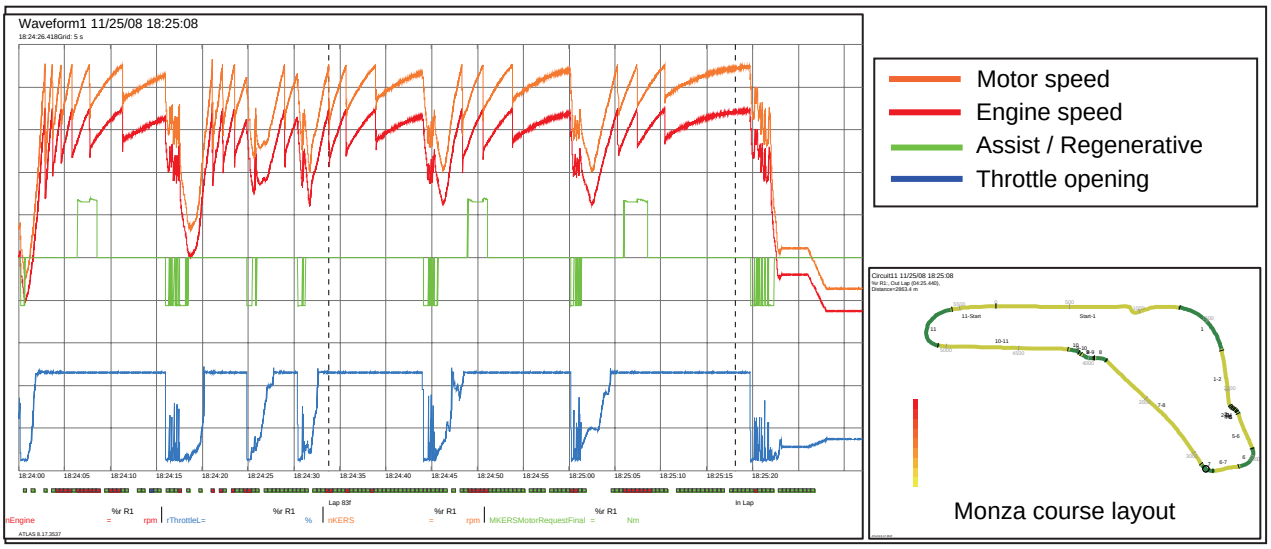


Fig. 19　Circuit mode test on dyno

各機能部品の機能確認に留めることとした．HRF1ではRVベンチのようにシャシーダイナモによるシステム動作確認ができないため，システム動作をチェックするにはエンジンをファクトリー内でファイアーアップ(エンジン始動)させて確認するしかない．しかしエンジンを始動するには，大勢のエンジニアとメカニックおよび数時間前からの立ち上げシーケンスが必要である．またエンジンの耐久性の観点から無負荷のまま長い時間を回すことができないため，ごく短時間で所望のデータを得るしか無く，KERS のシステムチェックは難航した．通常S/D前に1，2度しかファイアーアップはおこなわないが，RA1082では数十回のファイアーアップをおこなった．最初のS/Dはレギュレーション上限の負荷状態では無かったが F1 全 10 チーム中最初の KERS での記念すべき走行となった．その後ファクトリーにて S/D で確認された不具合を対処し，1週間後にシルバーストーンサーキットにて出力および回生のテストをおこなって KERS システムが F1 にとって有効に機能することが確認できた．チームはその後にさらなる改良を重ね，7月のプライベートテスト，9月にヘレスサーキット(スペイン)での合同テストに参加し，初めてサーキットにて本格的な走行を開始した(Fig. 21)．ヘレスサーキットではレギュレーション上限負荷で実車による KERS の効果検証をおこない，次の効果を確認した．

(1)Fig. 22 に表すように，1周当りのエネルギーが 400 kJ 前後のアシストをおこなった場合には，LAP タイムで約 0.4 秒短縮できた．

(2)Fig. 23 に示すように一つのストレートを連続して 324 kJのアシストをおこなった場合には車体速度で 7 km/h，到達距離で 7.8 m(1.6 車身)伸ばすことができた．

冒頭のシミュレーション結果とはアシスト時の車速や路面状態を含めたタイヤの空転量と空力仕様が異なるため，数値に差異があるが KERS の有効性は十分に証明できた．

KERSシステムのフルパワーのアシストを体感したドライバは，「アシストを入れた時ヘアピンが物凄い速さで近づいてきて感激した．逆にアシストの無いエンジンだけの加速はまるでおもりを背負っているようだ」とコメントするほどだった．

そしてウィンタテストを控えた 2008 年 11 月，RA1089 が完成した．しかし RA1089 は前述のように新型の VCU を搭載した上システムがRA1082とは大きく異なったため，ノイズによるシステム障害が頻発し，台上ベンチの解析と合わせて実車のノイズ解析と対策方法について連日協議した．RA1089 では HRF1 のエンジニア，メカニックも実走テストメンバと一体となり結果的に RA1082 を上回る 100 回ものファイアーアップをおこなってすべてのトラブルを克服した．これは非常に困難な課題に対して日英のすべてのメンバが一致団結した結果である．

そして 11 月 28 日サンタポッド(イギリス)の直線コースにて RA1089 の S/D(Fig. 24)をおこない，すべてのシステムが正常に作動することが確認され，サーキット走行が可能と判断されたため 12 月 9 日のヘレス合同テストの参加に向け RA1089 と機材をトレーラに 12 月 4 日の夜に積み込んだ．しかし 12 月 5 日の F1 からの撤退発表を受けてすべての活動は停止され，結果的に 11 月 28 日の S/D はHonda第3期F1活動最後の実走テストとなった．KERS のサーキット実走実績を Table 5 に示す．

Fig. 21　KERS car and engineers

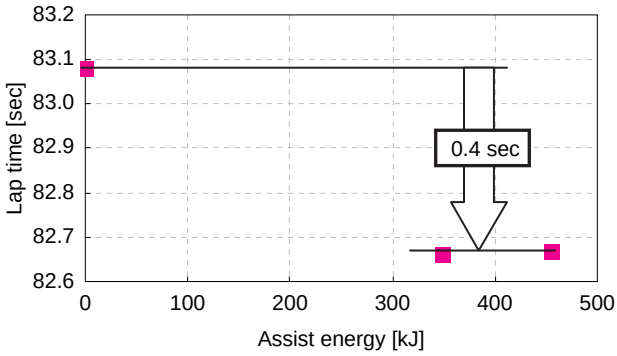


Fig. 22　Lap time against the assist energy

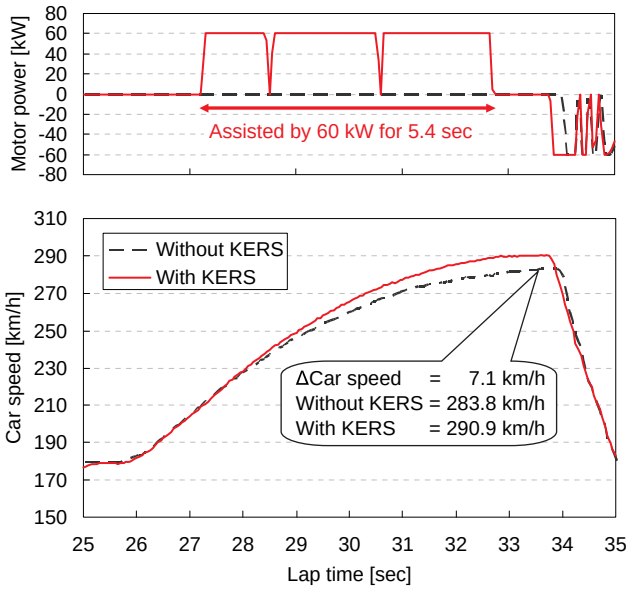


Fig. 23　Car speed comparison

Table 5　Track test results of KERS car

Date	Circuit	Driver (chassis)	Mileage	Notes
29-Apr	Santa Pod	A. Wurz (RA1082)	2.4 km	Shake down
7-May	Silverstone (short course)	J. Rossiter (RA1082)	25.0 km	Shake down 25 kW assist 35 kW recharge
29-Jul	Silverstone (Stow School)	M. Conway (RA1082)	48.6 km	Shake down 60 kW assist 60 kW recharge
16-Sep	Jerez*	M. Conway (RA1082)	88.6 km	60 kW assist 60 kW recharge
19-Sep	Jerez*	A. Wurz (RA1082)	225.8 km	60 kW assist 60 kW recharge
13-Nov	Kemble	A. Davidson (RA1089)	10.5 km	Shake down
28-Nov	Santa Pod	A. Davidson (RA1089)	33.5 km	Shake down 25 kW assist 25 kW recharge

*: Full race track

Fig. 24　Launch of the RA1089 with KERS system

5．まとめ

2009 年からの KERS の導入に対応するため電気式ハイブリッドシステムの開発をすすめた結果，次の成果を得た．

（1）小型軽量化したハイブリッドシステムを開発し，最高出力 60 kW で 400 kJ のアシストをサーキット周回のラップごとに実現する性能の車を製作した．

（2）サーキットにおいて他社に先駆けて世界初となる実車走行テストをおこない，KERS によるラップタイム短縮（400 kJ アシスト時には 0.4 sec 程度）と，オーバーテイクブーストの効果（324 kJ アシスト時には 7 km/h 程度）を実証した．

（3）各機能部品および車を開発するすべての過程，さらにサーキット走行において安全性を実証した．

あとがき

全く新しいKERS機能部品の研究開発に加え，日本，UK双方の技術開発者およびレースエンジニア，メカニック等の現場運営者並びに車体製作担当者や車体電装担当者などKERS に関連するすべてのスタッフへの高電圧システムの教育と習熟，さらにFIAへの安全に関する協力とレギュレーション改正の働きかけなど，これらすべてが同時進行にておこなわれたため，開発当初は混乱も生じたが，開発着手から９か月で初めての走行，レース仕様車のシェイクダウンまでは15カ月という異例の短期間にて本開発が進められたことは，とりわけ言語，国境の壁を超え，お互いを尊敬するに到った HRF1 のメンバとの共同開発体制と協力メーカ，物流，出張，翻訳，現地スタッフ等の関係者のすべての思いが結集したからこそ成し遂げられたことであり，メンバの誇りである．

参考文献

（1）中村聡，本橋康弘，早川修一：ウインドシミュレータ装置開発によるF1エンジン吸気事象解析，Honda R&D Technical Review, F1 Special (The Third Era Activities), p.90-95

■著　者■

吉田将隆

喜多真佐人

新　博文