

特集：SKYACTIV TECHNOLOGY

9

減速エネルギー回生システム “i-ELOOP” のデバイス開発

Development of the “i-ELOOP” Device

高橋 正好^{*1}

Masayoshi Takahashi

西田 史彦^{*4}

Fumihiko Nishida

藤田 弘輝^{*2}

Hiroki Fujita

鈴木 正悟^{*3}

Seigo Suzuki

要約

マツダは、技術開発の長期ビジョンである「サステイナブル“Zoom-Zoom”宣言」に基づき、「ビルディングブロック戦略」を推進している。

新世代技術「SKYACTIV TECHNOLOGY（スカイアクティブテクノロジー）」で、クルマの基本性能となるパワートレインの効率向上や車両の軽量化などのベース技術を徹底的に向上し、更に段階的に電気デバイス技術を組み合わせて、CO₂の総排出量を削減していく。そのSTEP2となるクルマの減速時に発生するエネルギーを電気として回収し、クルマが必要とする電気エネルギーとして再利用する新たな減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」（Intelligent Energy LOOP）を開発した。今回はその「ビルディングブロック戦略」のSTEP2となる減速回生技術「i-ELOOP」のデバイス技術として低抵抗大容量電気二重層キャパシタ（以下EDLC；Electric Double Layer Capacitor）とDC-DCコンバータについて技術紹介する。

Summary

Based on the “Sustainable Zoom-Zoom” plan, Mazda’s long-term vision for technology development, we have been advancing what is called a “Building Block Strategy”.

With use of a new-generation technology called “SKYACTIV TECHNOLOGY”, we intend to thoroughly improve Mazda’s base technologies with an eye to improving the powertrain efficiency, reducing the vehicle weight, and eventually combining them with electric device technologies in a phased manner so as to reduce total CO₂ emissions.

As the second step of this approach, Mazda has developed a new regenerative braking system called “i-ELOOP”, where the energy generated during deceleration is recovered and reused as electric energy necessary for a vehicle to move.

This paper introduces the Electric Double Layer Capacitor (hereinafter referred to as EDLC) and the DC-DC converter as device technologies of the “i-ELOOP”, a regenerative braking technology developed as the second step of the Building Block Strategy.

1. はじめに

世界的な低燃費志向の高まりを受けマツダでも数々の燃費低減策が提案されてきた。Fig.1 はスカイアクティブテクノロジーのコンセプトを示している。このコンセプトと“i-ELOOP”との関連をはじめに説明する。これらの改善アイテムの中で電気システムでの改善が効率的にできる領域

として、「廃棄していたエネルギーの再利用」と、「エンジンの仕事量削減」と、「エンジンの駆動力不要時燃料カット」を関連付けてシステム化し改善できる領域があると考え、オルタネータによる燃料での発電をゼロにするコンセプトの“i-ELOOP”の開発となった。その柱となる低抵抗大容量EDLCとDC-DCコンバータについて紹介する。

^{*1, 3~4} 車両システム開発部
Vehicle System Development Dept.

^{*2} 技術研究所
Technical Research Center

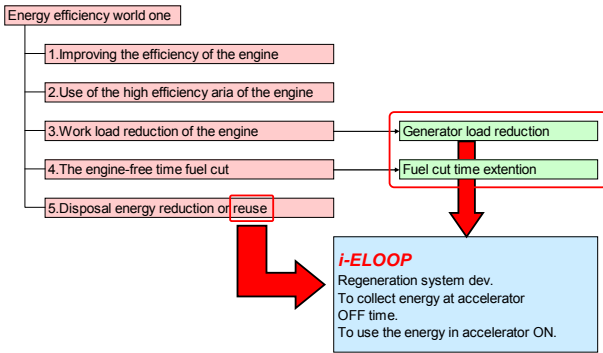


Fig.1 Improvement Items of Energy Efficiency vs "i-ELOOP"



Fig.2 Module Form

i-ELOOPのシステムについては、「減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」の開発」を参照願います。

2. "i-ELOOP"用 EDLC の仕様について

2.1 要求仕様

"i-ELOOP"システムは、燃料による発電をなくし回生エネルギーだけで車両消費電流をカバーすることを柱としており、加減速が頻繁で 40A 程度の電流消費時に 10%程度の燃費向上を目標とした。そのため、Table 1 に示すように、EDLC に求められるエネルギー量は、モジュール容量 120F 以上、エネルギー量 23kJ 以上とした。

回生する機能は最大 25V 発電の可変電圧オルタネータに持たせた。パルス幅制御により励磁電流を制御しレギュレータレスの可変電圧としている。EDLC モジュールは、鉛バッテリーと並接し、回収機能をメインで持たせるため、12~25V の範囲で 200A (オルタネータの制約のため) の回生が可能な事が要求される。また、居住空間(車室内/トランク)の広さを優先し、エンジンルーム内搭載を目指した。

そのため、特に 85 のような高温環境下でも、特性劣化しにくく、自身の発熱による性能悪化を最小限にするため、従来より低い内部抵抗を要求仕様とした。これらの要求を満足させることで、軽量コンパクトなモジュールが実現可能となった (Fig.2)。

Table 1 Requirements specification of i-ELOOP capacitor module

1) Input Voltage	0 ~ 25V
2) Module Capacity	120F
3) Energy amount	min.23kJ (At 14-25V)
4) Resistance	12mΩ
5) Charge electric current level maximum	200A
6) Temperature security range	-30 ~ 70
7) Storage Temperature	Max.85

3. 電気二重層キャパシタ (EDLC) 選定理由

3.1 性能要求からの選定理由

上記仕様を満足する蓄電デバイスの検証を行った。蓄電デバイスとして、物理反応原理の EDLC と化学反応原理の Li イオン電池 (以下 LiB)、ニッケル水素電池 (以下 Ni-MH) 及び鉛バッテリーで比較を実施した (Table 2)。選定のポイントは、低電圧系で、大電流 (200A) での受入れ性、エンジンルーム搭載を想定した寿命性能の実現性である。

まず、受入れ性であるが、Ni-MH電池は、電流受入れ性を考えると、2 並列以上で対応する必要があり、モジュールが大型化する懸念があることから候補からはずした。また鉛バッテリーは、受入れ性を高めると寿命が短くなるため、本システム用途には適用できないと考えた。EDLCとLiBは、パワー密度が 4,000W/kg以上であり、本システムへの適用は可能である。ただし、LiBは、寿命末期では回生効率の低下が懸念される。次に 寿命性能であるが、エンジンルーム搭載場所は、通常走行であれば走行風が当たるため、温度は上昇しにくい。渋滞やアイドリング停車では、80 を超える高温環境に曝される場合がある。そのため、蓄電デバイス自身の耐熱特性のみで寿命性能を満足する必要がある。更に、本システムは低電圧系のため、通常の HEVよりも平均電流値が大きくなり、発熱量の増加が懸念される。よって使用环境温度の上限が 60 であるLiBとNi-MH電池は、専用の冷却システムが必要となり大型化することと安全性面で選定から外した。一方EDLCは自動車用途として高温での寿命性能の向上が検討されており、使用範囲が 70 以上まで拡大したのもも報告されている⁽¹⁾、⁽²⁾。また、LiBやNi-MHに比べて内部抵抗が小さいことが特徴であるとともに、長寿命、環境への負荷低減などに優位性がある。従って、エンジンルーム内への搭載が可能で、本システムのような短時間大電流回生用途に適していると考え、EDLCを選定した。

Fig.3 に "i-ELOOP" と従来車の比較イメージ図を示す。

Table 2 Performance Comparison of Storage Device

	Capasitor		Lithium-ion batteries		Nickel-metal hydride bateries		Lead-acid storage batteries	
type	Electric double layer		HEV application		HEV application		Vent type	
Energy density(Wh/kg)	×	5 ~ 10		100 ~ 200		50 ~ 80		30 ~ 40
Voltage(V)		2.5		3 ~ 3.7		1.2		2
Maximum Output(W/kg)		10,000>		4,000		1,000 ~ 2,000	×	200
Resistance (mΩ)		1		2.5		3		5
Operating temperature()		-30 ~ 70		-30 ~ 60		-30 ~ 60		-30 ~ 80
Cycle life (soc 0 100% @25)		1,000,000>		3,000>		1,000>	×	300>
Safety		—		—		—		—
Environmental load		—	×	Li,Co,Ni,Mn	×	Ni	×	Pb

Current model

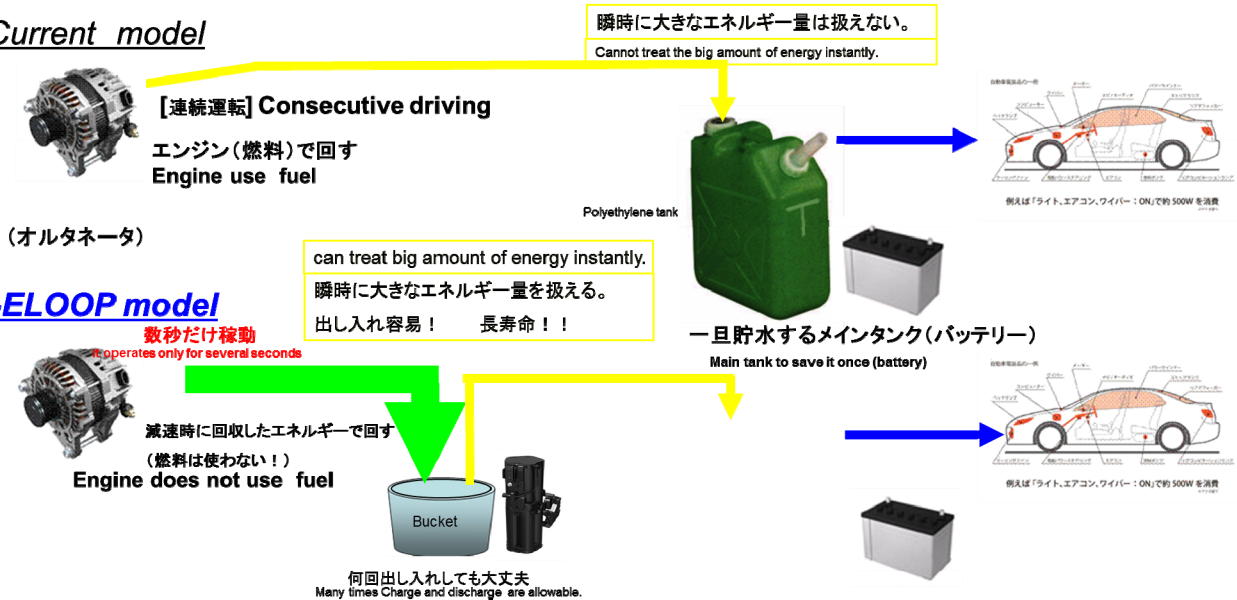


Fig.3 Comparison between Conventional Car and i-ELOOP

従来車における鉛バッテリーは、ポリタンクのようなもので入り口は小さいが容積は大きい。従って、今回の減速回生用途では、回生量が限定され回収効率が低い。そこで、回収と車両負荷に機能を分け、それぞれの蓄電デバイスに担当させる手法を考案した。" i-ELOOP "におけるEDLCは、入り口の大きなバケツのようなもので入り口は容易だが貯めることのできる容積は小さい。従って、回収機能に特化させ、鉛バッテリーと並接させるシステムを今回新たに構築した。

4. 電気二重層キャパシタ (EDLC) について

4.1 EDLC の原理と構造

Fig.4 に示すように EDLC の基本的なセル構成は、セパレータを介した 2 枚の分極性電極と電解液からなる。電圧

を印加すると、電解液中のイオンが電荷補償のため電極表面へ引き寄せられ、電極と電解液界面にそれぞれ電荷層が形成される。これを電気二重層 (electric double layer) と呼び、正極・負極上での電気二重層形成により EDLC は電荷を蓄える。Fig.5 に EDLC の構造を示す。電極には、高比表面積の活性炭にバインダ及び導電助剤を混練し、そのスラリーを集電板 (アルミ箔) に塗布したものをを用いる。その他の材料としては、セパレータとしてセルロース系、電解液には TEMABF₄ (トリエチルメチルアンモニウムテトラフルオロボレート) を溶解した PC (プロピレンカーボネート)、アルミケース、封口板などから構成されている (Fig.6 EDLC 外観)。

今回、自動車の回生システム用途への適用を目指し、日本ケミコン(株)と共同でセル・モジュールの設計・開発を

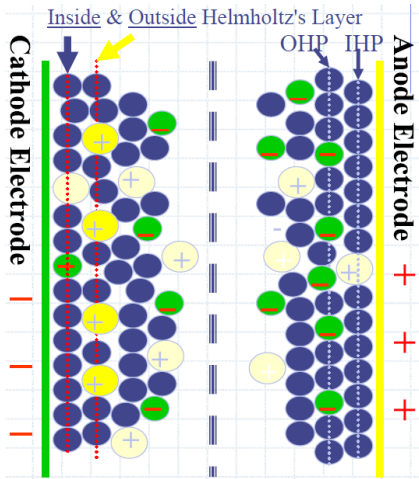


Fig.4 Principle of Electric Double Layer Capacitor⁽³⁾

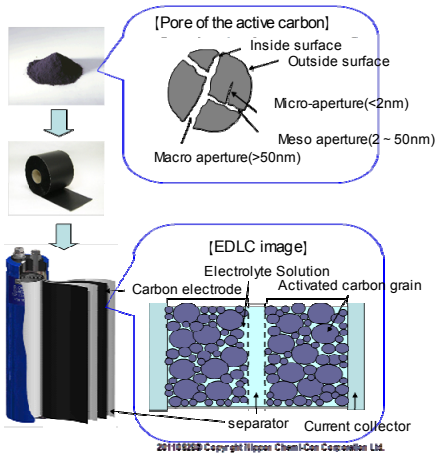


Fig.5 Structure of Electric Double Layer Capacitor⁽³⁾



Fig.6 EDLC Cell for Vehicle Made in Nippon Chemi-Con⁽³⁾

実施した。エンジンルーム内への搭載を実現するためには、酷暑地域においても内部発熱による温度上昇を抑える必要がある。そのためには、セル当たり 1m 以下の低抵抗化が理想である。しかし、これまでの EDLC では、モジュールでの内部抵抗が約 25m 以上が一般的であった。そこで、集電構造の改良及び電極材組成の最適化による接触抵抗の低減を実施することで、単セル 0.9m 以下を実現し

て大電流に対する効率を高められた。更に、高温での耐久性をこれまでの 60 から 70 に向上させ、頻繁な回生による自己発熱への許容度も向上した。

4.2 活性炭について

電極に使用されている活性炭 (Activated carbon) は脱臭剤などで知られているが、石炭やヤシ殻などを二酸化炭素や水蒸気、空気、燃焼ガス等を約 1,000 の温度で反応させ炭化賦活して作られる微細孔を持つ炭素のことである。この微細孔の壁の活性炭面積が、EDLC の静電容量に大きく関係し、セル 1 本分の表面積は東京ドーム約 3 個分に相当する。今回開発の EDLC はヤシの実の内果皮 (Fig.7) から製造する活性炭を使用しており、その内果皮は木や竹より硬く、良い活性炭原料となる。

内果皮以外も例えば中果皮はスポンジなど、胚乳はヤシ油、石鹸等にいろいろ使われ無駄にするところがほとんどない。フィリピンでは 2010 年ヤシ油用に 120 億個のヤシの実が使用されているが、その廃材の内果皮約 30 億個 (Fig.8) が活性炭用として使用されており、今後 EDLC が増産されても廃材利用率が向上し環境破壊等が発生する懸念は少ない。EDLC は鉛電池やリチウム電池等と比べ比較できないくらい環境にやさしい材料で構成されている。

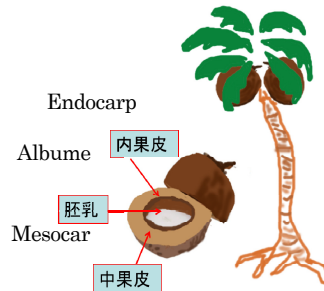


Fig.7 Coconut Structure

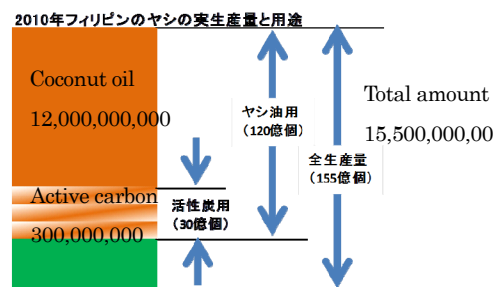


Fig.8 2010 Production and Use of the Philippine Coconut

5. 信頼性

5.1 基本特性

開発した EDLC の基本特性について以下に示す。

Fig.9 には、EDLC 容量の電流値依存性を示す。電流値が大きくなるほど、電圧降下が大きくなるため容量が小さくなるが、電圧降下も小さく良好な放電直線を示す。

Fig.10 には、EDLC 容量の温度依存性を示す。放電容量は、-30 から 70 の間で容量値の変化は小さいが、充電容量は、温度が低くなると共に小さくなった。これは、100A の測定電流値に対して、イオンの活性炭細孔内部への拡散が追いつかないためと考える。しかし、冷間時での容量低下率は小さく、冷間時での回生量の低下は問題ないレベルであると考えられる。Fig.11 には、EDLC 内部抵抗の温度依存性を示す。これまでのモジュール内部抵抗の半減以下を実現した。低温時の内部抵抗の増加率は、3 倍 (-30 と 20 比較) 以下であり、LiB や Ni-MH と比較しても小さく、低温時の受入れ性の悪化を抑えることが可能である。

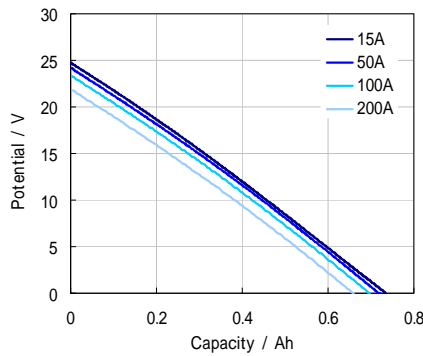


Fig.9 Current Dependency of Capacity

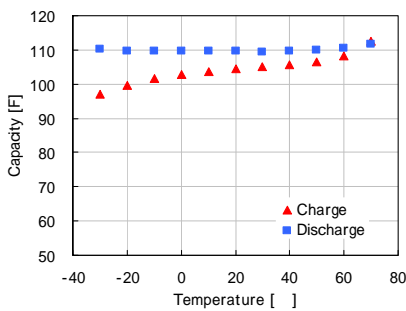


Fig10. Temperature Dependency of Capacity (at 100A)

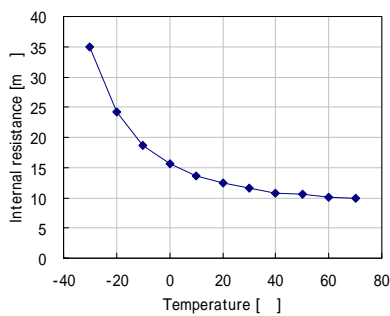


Fig.11 Temperature Dependency of Resistance (at 100A)

5.2 劣化特性

Fig.12 にサイクル試験結果を示す。サイクル時間と共に容量は一樣に低下している。Fig.13 には、横軸を t にした時のサイクル劣化試験結果を示す。横軸 t に対して直線的に低下し、LiB と同様に t 則に従うことを明らかに

し、使用範囲内であれば劣化予測が可能であることを確認した。Fig.13 より、切片部と傾き部に大別でき、切片部は初期の劣化に傾き部は主劣化と表現できる。初期劣化は、製造過程で活性炭の表面に吸着した官能基や水分及び不純物と電解液との反応が主であり、EDLC に特有の劣化と推定される。主劣化は、電解液の分解により電極表面に堆積物やガスが生じ、電極面積の減少による容量の低下を引き起こし、イオン拡散性が低下して内部抵抗の増加を導くメカニズムと推定している。

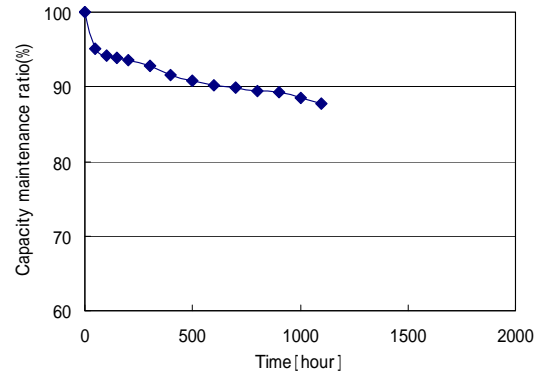


Fig.12 Deterioration of Cycle Test (at 70 ave.70A 12-25V)

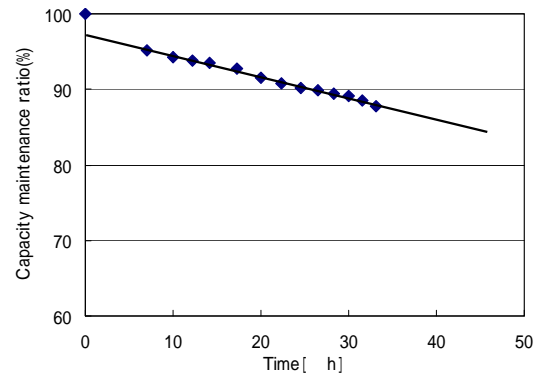


Fig.13 Deterioration of Cycle Test (t as the abscissa)

次に、主劣化に及ぼす劣化因子の調査を行った。Fig.14 ~ 16 には、制御因子である、温度・電圧・電流による影響度を調査した結果を示す。影響度に関しては、温度 > 電圧 > 電流の順であることを見出した。特に、電流に関しては、10 ~ 200A の電流範囲で 1.6% の変化率であり、非常に小さいことを明らかにした。これは、EDLC が物理反応原理のため、高レート対応可能なことから、充放電時の副反応が少ないためと推定される。以上のことから、制御因子として温度と電圧を制御できれば劣化をコントロールできる可能性を示した。今回開発した EDLC は、高温での性能保証を 70 まで向上させたが、エンジンルーム内への搭載のためにはまだ不十分であった。そこで、70 以上から、段階的に上限電圧を下げていき、85 以上では 16V 以下で制御する劣化コントロールを組み合わせることで、10 年 24 万 km の保障を実現することが可能となった。

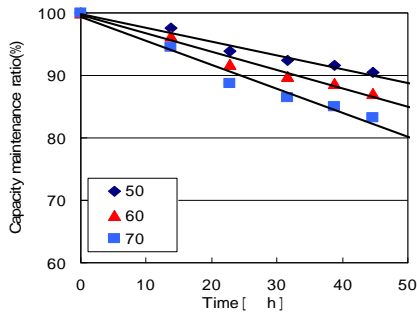


Fig.14 Temperature Dependence of the Life in Float Examination (at 2.5V)⁽³⁾

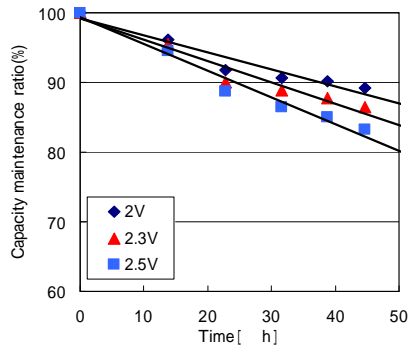


Fig.15 Voltage Dependence of the Life in Float Examination (at 70)⁽³⁾

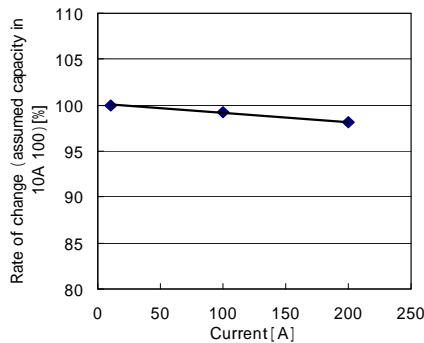


Fig.16 Current Dependence of the life in Cycle Examination (at 60, after 10,000cy)⁽³⁾

次に、自動車用途を想定した劣化試験による寿命の検証を実施した。劣化試験は、エンジンルーム搭載で、ハードユーザの実車走行を想定した走行モードと、停車時を想定した保存モードを組み合わせた複合モードである。複合モードによる容量劣化は時間の平方根に比例して減少し、内部抵抗劣化は時間の平方根に比例して増加した。10年24万km相当の劣化後でも、回収能力は確保できる事を確認した。以上より、今回新規に開発したEDLCと劣化制御を組み合わせることで、エンジンルーム内への水冷や油冷のような特殊な冷却機能が不要な搭載が可能なi-ELOOP用EDLCシステムを開発することができた。

6. DC-DC コンバータ

6.1 DC-DC コンバータ仕様

DC-DC コンバータの仕様は、定格電圧 DC12.5V にお

いて、入力電圧範囲 0~25V, 出力電圧範囲 11~14.8V, 作動温度範囲-40~85, 最大定格 MAX.50A とした。

今回開発した DC-DC コンバータは降圧型のコンバータである。車両に搭載するために、DC-DC コンバータ自体の発熱とラジオに対する放射ノイズを特に注意して開発した (Fig.17)。

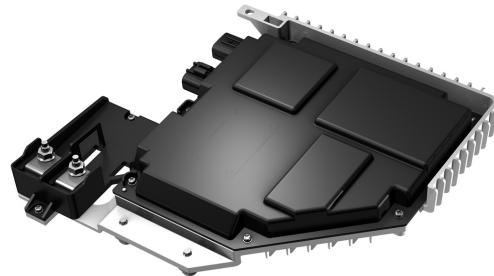


Fig.17 DC-DC Converter

6.2 DC-DC コンバータ容量決定について

全世界の車両消費電流調査を実施し容量を決定した。

Fig.18 はベルリンでの四季による消費電流の例で、Fig.19 は大阪での消費電流例である。通常 40A でほとんどのシーンをカバーできるが、今後の電子部品の増加を考えて MAX.50A とした。消費電流が 50A を超える状態が続く時はオルタネータとバッテリーを直結し車両側に電流供給される。

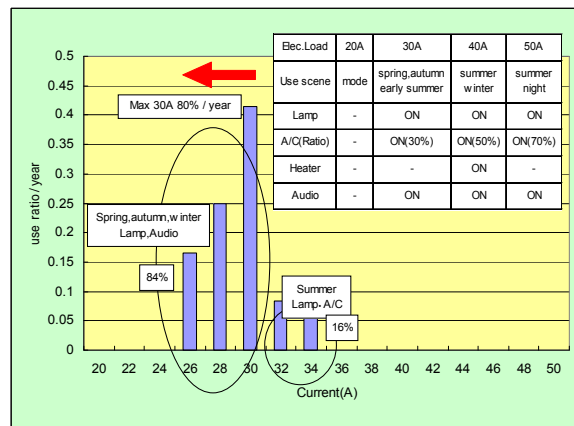


Fig.18 Electric Load VS Annual Use Frequency @ Berlin

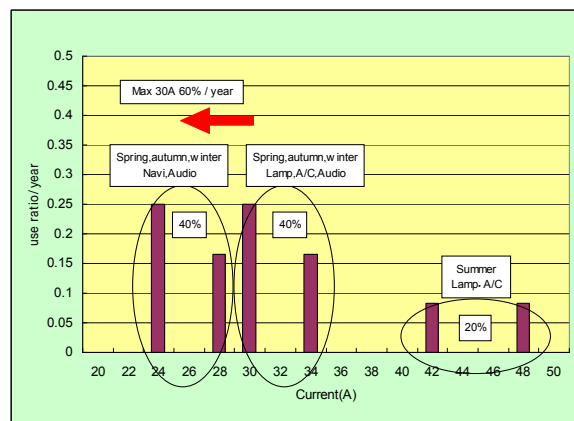


Fig.19 Electric load VS Annual use Frequency @ Osaka Japan

6.3 輻射ノイズ対応について

Fig.20 は降圧式 DC-DC コンバータの基本回路である。今回の DC-DC コンバータはスイッチング制御で降圧しているが1チャンネルでのスイッチングでは輻射ノイズと発熱量が多いため、今回は4チャンネル(Fig.21)でのスイッチングとしエネルギーを分散させる対応とした。4チャンネル化で発熱を分散させるとともに、輻射ノイズも約1/4とした。

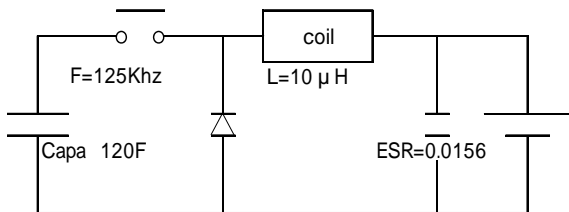


Fig.20 DC-DC Converter Circuit

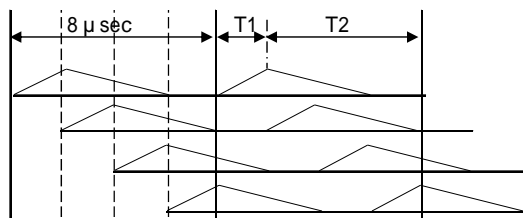


Fig.21 DC-DC Converter Basics Output Wave Pattern

DC-DC コンバータの出力は車両電装品に供給されている。よって出力の電源リップルは各電装補機類に大きな影響を及ぼす可能性がある。以下にリップルの机上検証結果を示す。最大入力電圧 $V_{in(max)} = 25V$ 。リップル電流 y とすると y と V_{out} の関係は次式となる (125kHz 時)。

$$y = \frac{1}{L \cdot F} \times V_{out} \times \left[\frac{V_{inmax} - V_{out}}{V_{inmax}} \right]$$

$$y = \frac{-1}{31.3} \times (V_{out} - 12.5)^2 + 5.0$$

よって V_{out} が 12.5V のときリップル電流が最大となり 5.0A 出力コンデンサ ESR = 0.0156 からリップル電圧最大値は $0.0156 \times 5 = 0.078V$ と小さく適正である。ただし実回路では車両負荷やバッテリー内部抵抗があり、0.078V 以上となるが、実車での評価結果もオルタネータリップル基準値より充分小さいことが確認できている。

6.4 各機能ごとの出力波形

各箇所の電流波形例を示す(Fig.22)。今回の DC-DC コンバータでは4チャンネル化しておりこの IC を 2 個使いしている。

入力電圧 V_{in} の MAX は 25V。スイッチング周波数は

125kHz/110kHz である。本図との実回路との大きな違いは負荷側には鉛バッテリーが接続されているため V_{in} が鉛バッテリーの電圧以下になると電流が逆流する。実回路では逆流防止の FET を設置している。

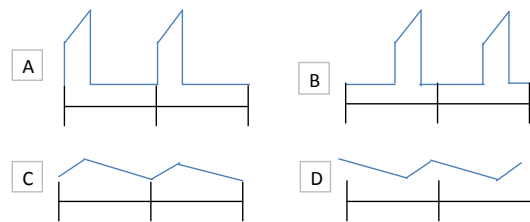
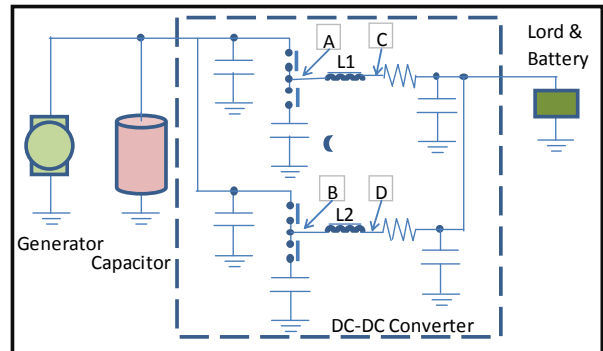


Fig.22 DC-DC Converter Wave Pattern

6.5 DC-DC コンバータ放熱特性

DC-DC コンバータの重要な管理仕様として放熱特性がある。今回の DC-DC コンバータでは降圧用のコイルが一番発熱する。放熱は DC-DC の放熱フィンを介して行われるがコイル, FET, コンデンサの温度分布を見ながら放熱特性を確認する必要がある。コイル, FET, コンデンサの中で一番熱的に弱いのはコンデンサであるため発熱源から充分必要な距離を取ることが重要である。Fig.23 は放熱フィンの温度測定結果で FET, コイルに近接するサーミスタでの測定の CAN 値である。約 50A 連続通電で 85 付近で熱平衡状態となる。

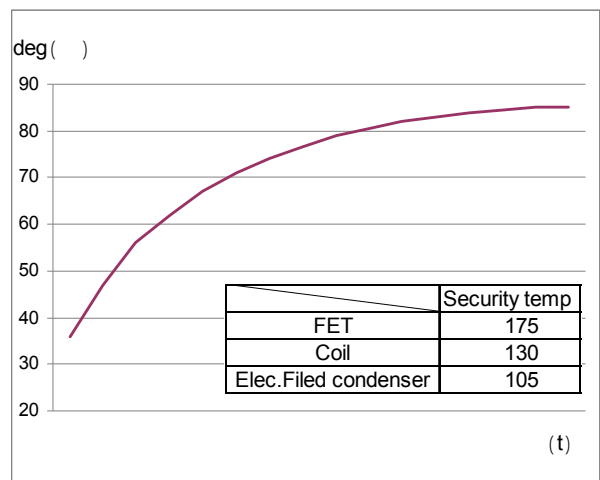


Fig.23 DC-DC Converter Heat Radiation Performance

7. まとめ

システム紹介で“i-ELOOP”の機能や効果を説明したが、システムを支える重要なデバイスとして本編では EDLC と DC-DC コンバータについて触れた。EDLC は、将来更なる大容量、高電圧化されると予測される。また、DC-DC コンバータも車両の機能がどんどん増加しており消費電流が増えることで大出力化していく傾向にある。システムで賄える電力を増加させ、これから増加していくであろう環境対応システムや安全システムへの対応や駆動力補助等への対応を可能とし、“i-ELOOP”を通じて環境に優しく“Zoom-Zoom”な走りの車作りに今後も貢献していきたい。

参考文献

- (1) 日清紡ホールディングスホームページ N's CAP の特徴より
- (2) JM エナジーホームページ ULTIMO ラミネートセルのご紹介より
- (3) 日本ケミコン(株) 提供資料

著者



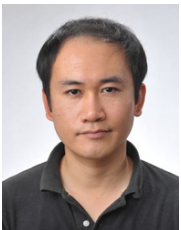
高橋 正好



藤田 弘輝



鈴木 正悟



西田 史彦