

## より効率的な DC-DC コンバーターの 構築：300 W 絶縁型 DC-DC コン バーターの効率評価と損失解析

DC-DC コンバーターの設計では効率が重要で、パワー MOSFET の使用はこの効率に大きく影響します。特に 2 次側の同期整流器用 MOSFET の選択は、高効率化の改善ポイントとなります。

### はじめに

本稿では、高効率を達成するために必要な 2 次側 MOSFET の特性を決定することに焦点を当てています。図 1 に示す評価回路を使用した直接測定を行い、その後、高精度シミュレーションの結果と比較して、損失の主な原因を特定します。



図 1. 300W DC-DC コンバーターの 2 次側損失を解析するための物理評価回路

## 第 1 章: 効率向上の追求

高効率の追求こそが、DC-DC コンバーターを含むほとんどのパワー・アプリケーションにおいて最重要です。効率の定義は以下の通りです。

$$\text{効率} = (V_{out} \times I_{out}) / (V_{in} \times I_{in}) \times 100 [\%]$$

さまざまな設計上の決定が効率と損失に影響を与えます。中でも 1 次側と 2 次側の MOSFET の選択が重要で、絶縁型 DC-DC コンバーター回路内の損失の 40 % 以上を占めます。

## 第 2 章: 評価ボードの設計

300 W の DC-DC コンバーター評価ボードを製作し、その損失を考察しました。簡略化した回路図を図 2 に示します。

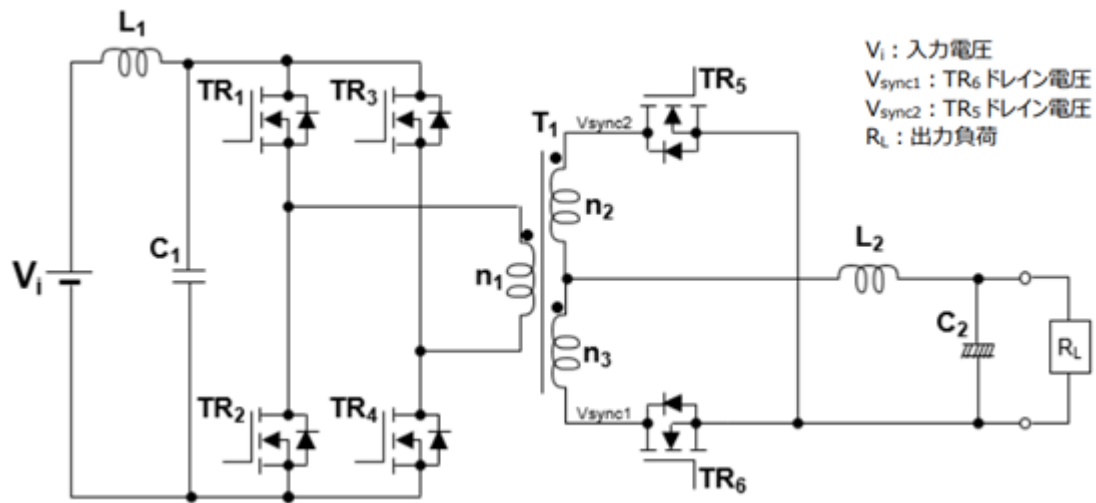


図 2. 簡略化した絶縁型 DC-DC コンバーター回路

この回路では、一次側（入力側）が入力となり、2本のレグと4個のスイッチング・デバイス（TR<sub>1</sub>、TR<sub>2</sub>、TR<sub>3</sub>、TR<sub>4</sub>）があります。二次側（出力側）には2つのデバイス（TR<sub>5</sub>とTR<sub>6</sub>）があり、これらは同期整流用です。さらに、静電容量 C<sub>2</sub>とインダクター L<sub>2</sub>による出力平滑フィルターが含まれます。入力電圧は V<sub>i</sub>、出力負荷は R<sub>L</sub>、V<sub>sync1</sub>と V<sub>sync2</sub>はそれぞれ TR<sub>6</sub>と TR<sub>5</sub>のドレイン電圧です。TR<sub>5</sub>と TR<sub>6</sub>には、2つの MOSFET が並列に接続されていることに注目してください。

このコンバーターは、フェーズシフト・フルブリッジ（PSFB）トポロジーを使用して 12 V を出力します。出力電圧は、TR<sub>1</sub>-TR<sub>2</sub>レグと TR<sub>3</sub>-TR<sub>4</sub>レグ間の位相シフト動作により、50 %のデューティ・サイクルで安定化されます。ハイサイド MOSFET とローサイド MOSFET 間のデッドタイムにおける貫通動作を防止するため、ゼロ電圧スイッチング（ZVS）が行われ、電力変換器のスイッチング損失を低減させています。

表 1 に 300 W DC-DC コンバーターの入出力特性を示します。

表 1. 300 w DC-DC コンバーターの入出力特性

パラメータ	条件	最小	標準	最大	単位
入力特性					
入力電圧		36		75	V
入力電流	V <sub>in</sub> = 48 V, I <sub>out</sub> = 25 A			12	A
出力特性					
出力電圧		11.4	12.0	12.6	V
出力電流				25	A
出力電力				300	W
出力リップル電圧				200	mV
スイッチング周波数			185		kHz

表 2 は、8 つの動作モードをまとめたものです。図 3 と図 4 は、これらの各モードにおける電流の流れを青と赤の点線で示しています。

表 2. 動作モード

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6	Mode 7	Mode 8
TR1	TURN-ON	ON	ON	TURN-OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
TR2	OFF	OFF	OFF	OFF	TURN-ON	ON	ON	TURN-OFF
TR3	OFF	OFF	TURN-ON	ON	ON	TURN-OFF	OFF	OFF
TR4	ON	TURN-OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	TURN-ON	ON
TR5	OFF	OFF	TURN-ON	ON	ON	ON	ON	TURN-OFF
TR6	ON	ON	ON	TURN-OFF	OFF	OFF	TURN-ON	ON

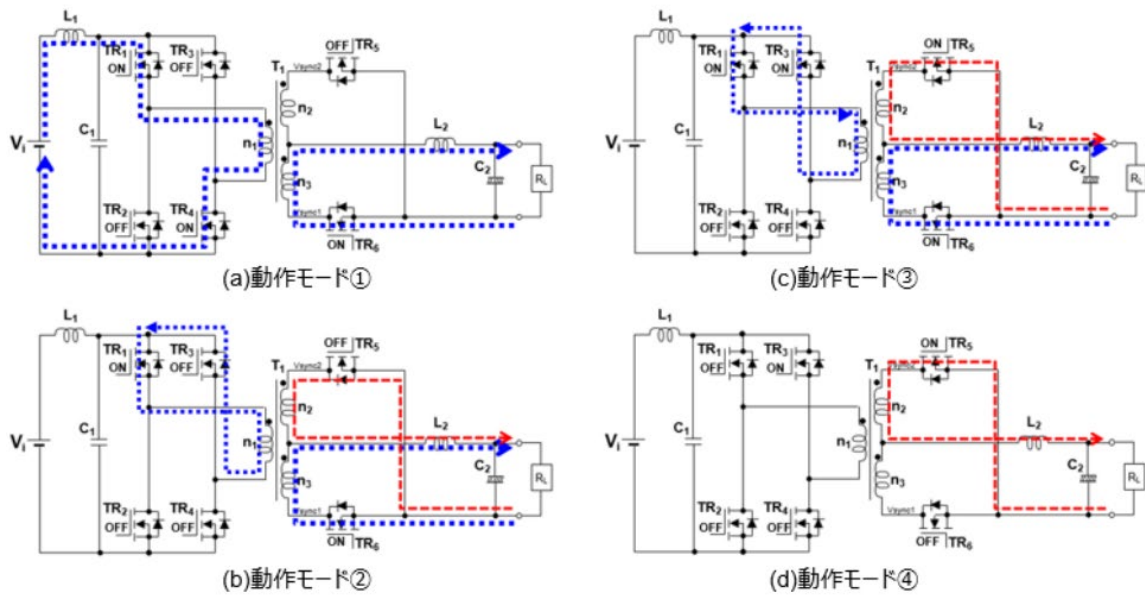


図 3. 動作モード 1-4

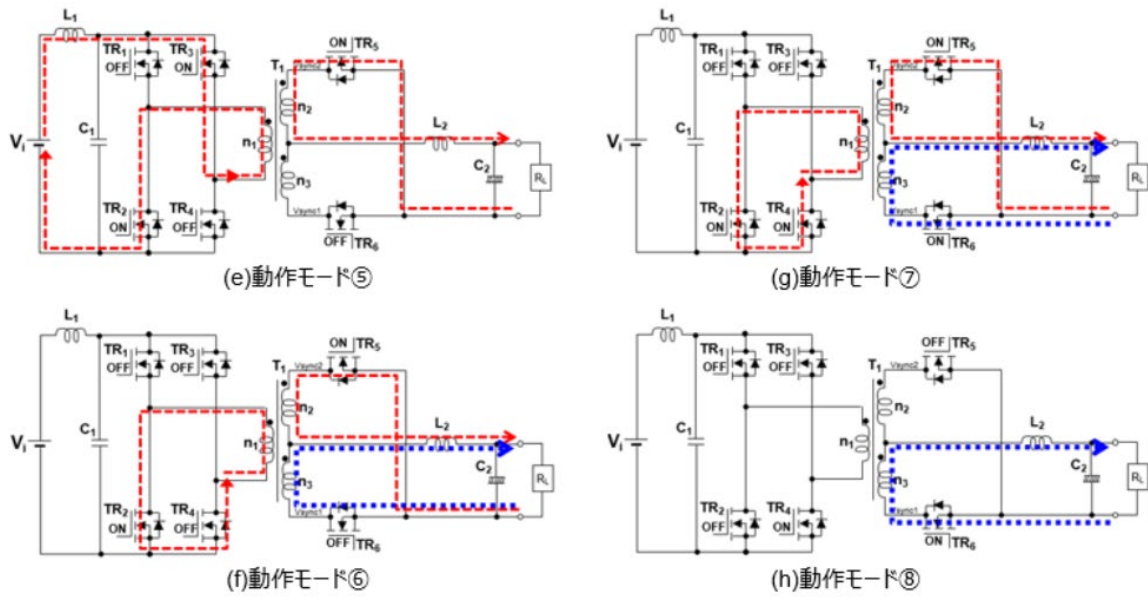


図4. 動作モード5-8

全 8 つの動作モード時の波形を図 5 にまとめます。これらの簡略化した波形には、スイッチング素子 TR<sub>1</sub>~TR<sub>6</sub>のゲート電圧 (V<sub>G</sub>) とドレイン電流 (I<sub>D</sub>)、TR<sub>5</sub>と TR<sub>6</sub>のドレイン・ソース間電圧 (V<sub>sync1</sub>, V<sub>sync2</sub>)、端子間電圧 (V<sub>L2</sub>) とインダクター L<sub>2</sub>の電流 (I<sub>L2</sub>) が描かれています。電流はソースからドレインに流れるため、TR<sub>5</sub>と TR<sub>6</sub>を流れる電流は負と表記されていることに注意が必要です。

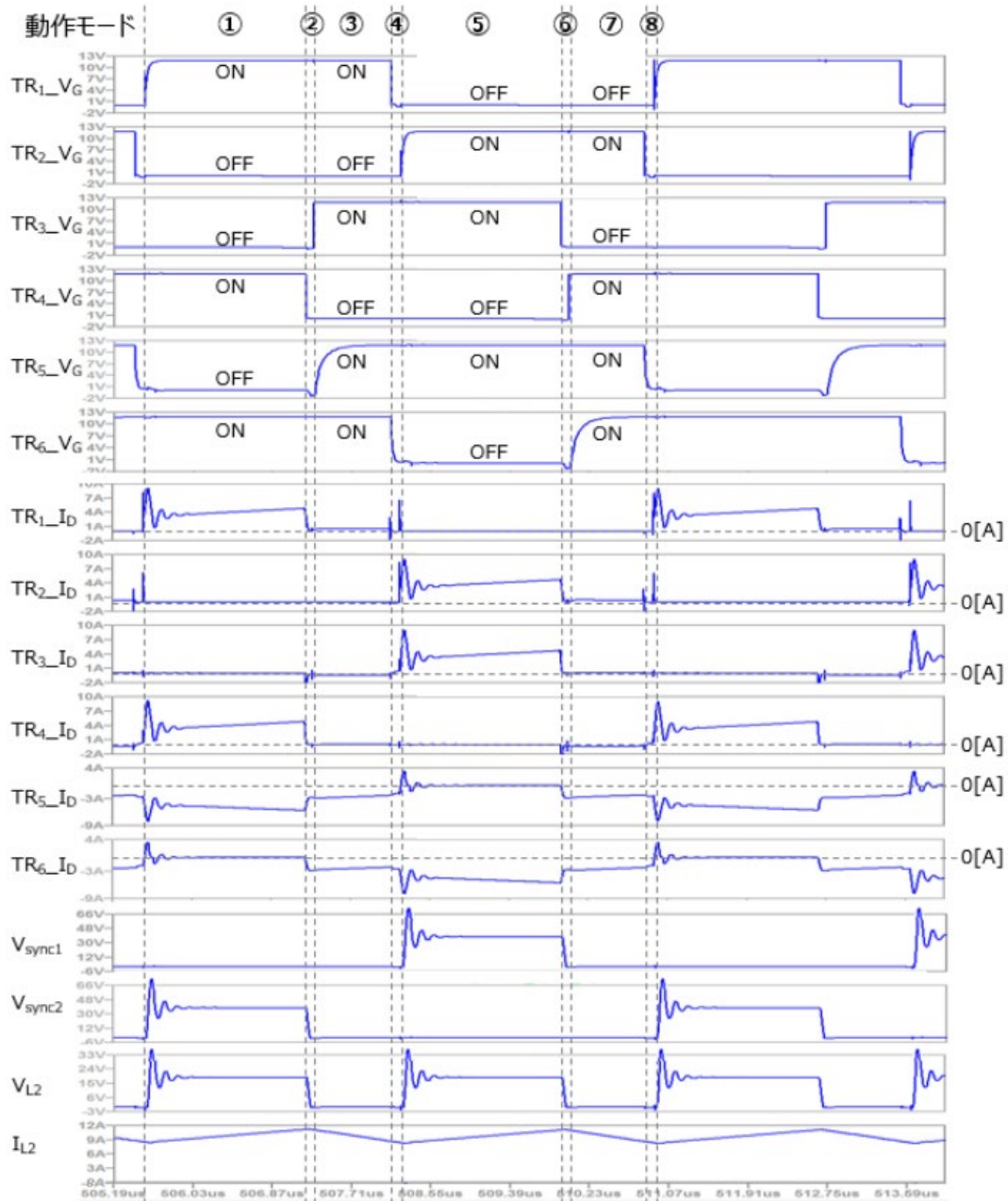


図 5. 8 つの動作モード時の回路動作波形

## 第 3 章: 効率評価と損失分析

効率の計算式は以下の通りです。

$$\text{効率} = (V_{out} \times I_{out}) / (V_{in} \times I_{in}) \times 100 [\%]$$

図 6 に、300 W 絶縁型 DC-DC コンバーター回路の効率を評価するための設定を示します。V<sub>in</sub>, I<sub>in</sub>, V<sub>out</sub>, および I<sub>out</sub> は、以下の条件下で、2 パターンのスイッチング素子の組み合わせにて測定しました。

V<sub>in</sub>=48 V, V<sub>out</sub>=12 V, T<sub>a</sub> (周囲温度) = 25 °C

I<sub>out</sub> : 1 A, 3 A, 5 A, 7 A, 10 A, 14 A, 16 A, 18 A, 20 A, 25 A

DC-DC コンバーター回路基板は、近くに設置した冷却ファンを使って強制空冷しています。

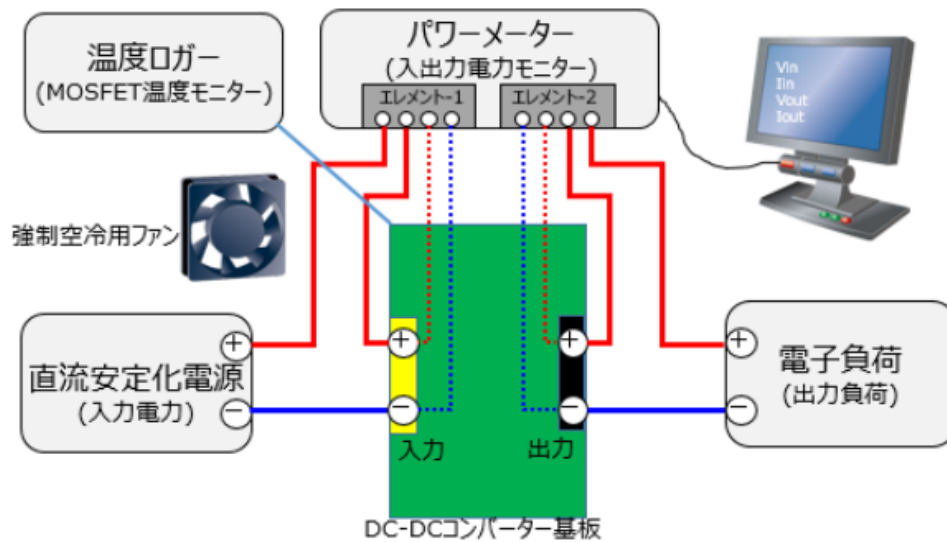


図 6. 効率評価時の計測機器接続方法

この評価は、一次側 MOSFET として TPN1200APL、二次側 MOSFET (TR<sub>5</sub>, TR<sub>6</sub>) として 2 種類の MOSFET (当社 TPH2R408QM と A 社製相当品) を使用して実施されました。仕様の詳細はアプリケーションノートの 9 ページに記載されています。TPH2R408QM MOSFET は、他社製相当品と比較してドレイン・ソース間のオン抵抗が低く (1.9 mΩ) 逆回復電荷量が少ない (74 nC) ことから選択されました。

## 参照リンク:

[300W 絶縁型 DC-DC コンバーターの効率評価と損失分析 \(PDF: 1.8MB\)](#)



[TPN1200APL](#)



[TPH2R408QM](#)



## 第 4 章: 二次側スイッチングが電力変換効率に及ぼす影響

図 7(a)~(c)は、TPH2R408QM と A 社製 MOSFET を使用した効率カーブを比較したものです。予想通り、TPH2R408QM は中負荷と重負荷で最も高い効率レベルを示しています。このような負荷では、導通損失が支配的であり、TPH2R408QM はドレイン・ソース間のオン抵抗が小さいからです。最大効率は出力負荷 16 A で 94.83 %、全負荷 25 A で 94.12 %となっています。

一方、A 社製 MOSFET のドレイン・ソース間オン抵抗は TPH2R408QM より約 16 %大きく、出力負荷 16 A 時の効率は 94.67 %、全負荷 25 A 時の効率は 93.89 %です。

図 8 は、両タイプの MOSFET の素子温度と出力電流の関係を示しています。注目すべきは、TPH2R408QM の温度が常に 45 °C 以下であり、A 社製 MOSFET よりも発熱が少ないことを示していることです。

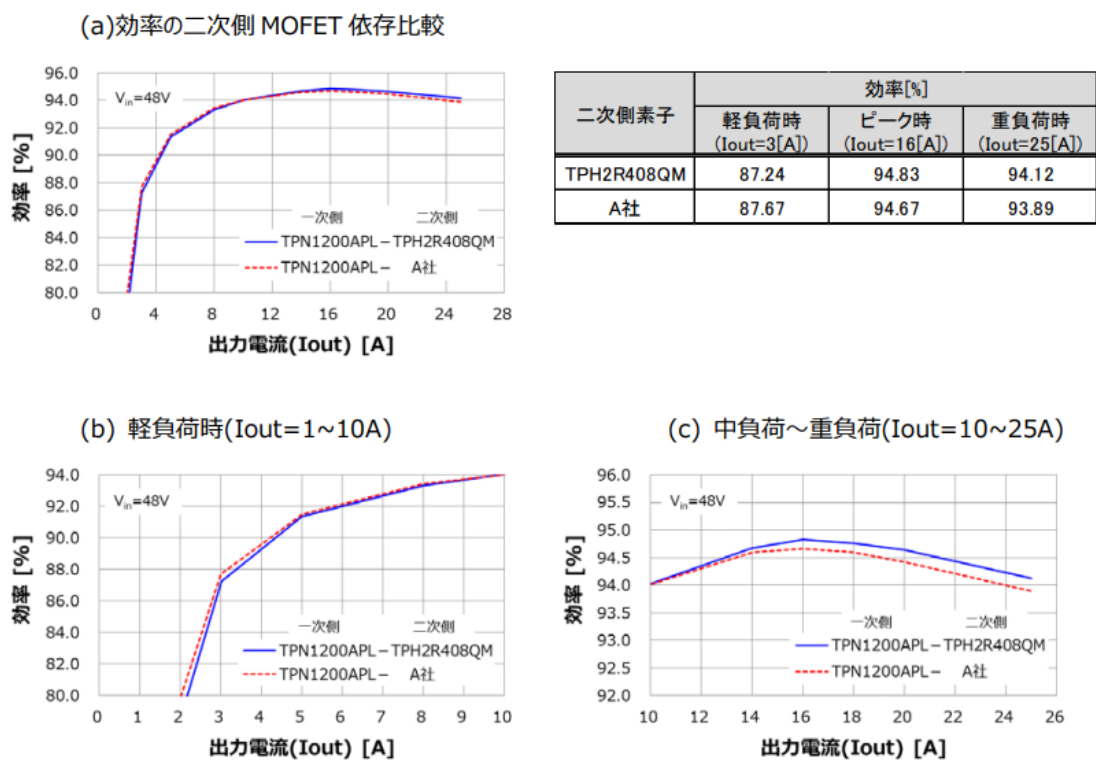


図 7. 効率曲線

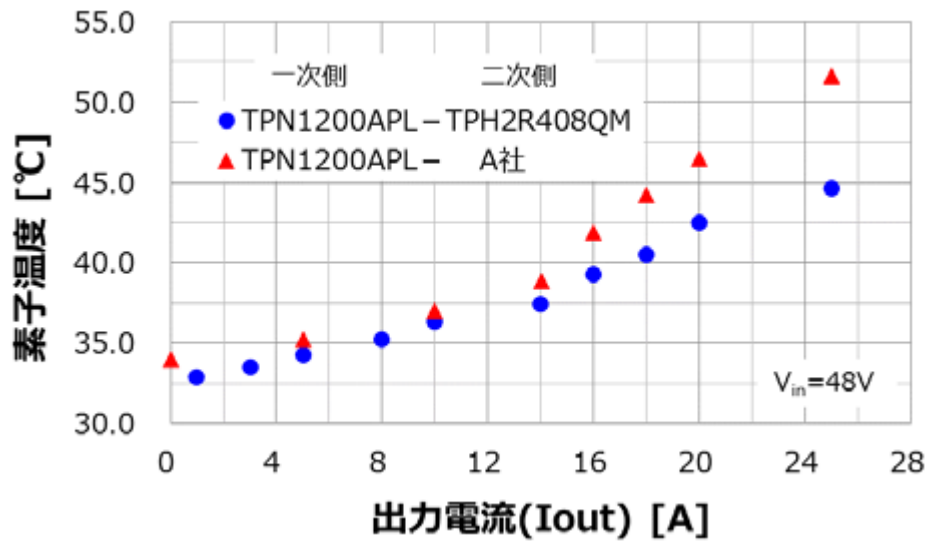


図8. 温度比較

## 第 5 章: 損失解析シミュレーション

損失解析は、損失解析専用設計された高精度デバイスモデルを用いたシミュレーター回路を使って行いました。評価ボードではフェーズシフト・フルブリッジ PWM コントローラー IC を使用していますが、このシミュレーション回路では電圧・電流センシングに応じてフィードバックを行う代替制御モデルを使用しています。シミュレーション回路を図 9 に示します。トランスとリアクトルは実測結果に基づいています。シミュレーション設計の詳細については、アプリケーションノートを参照してください。

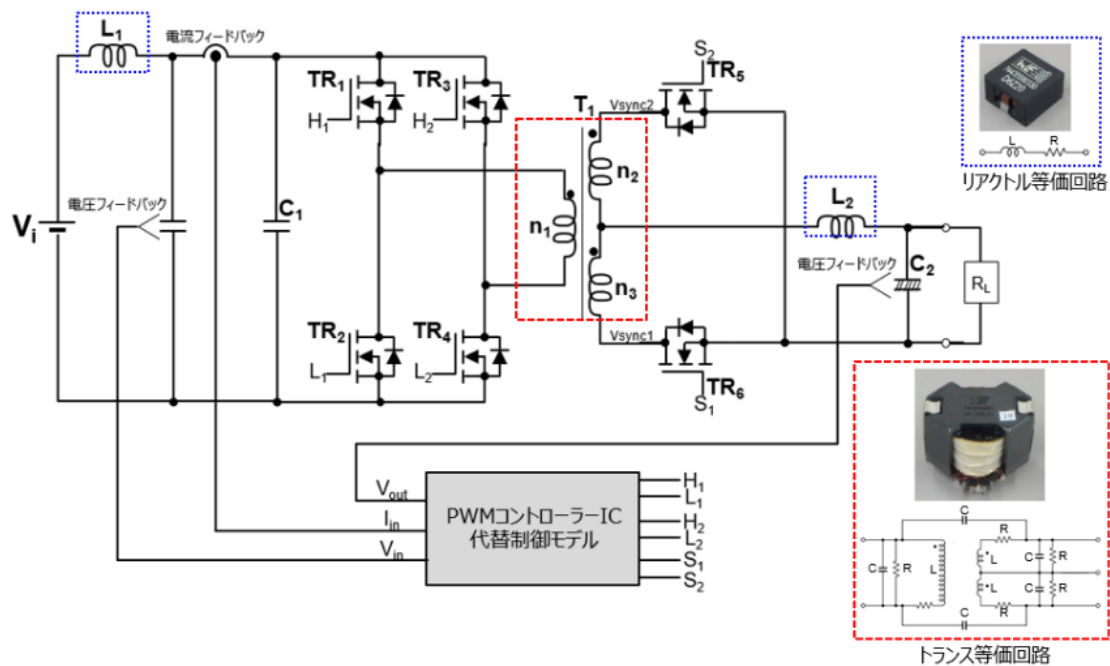


図 9. 損失解析回路

シミュレーションが検証された後、二次側 MOSFET の損失定義に関連した結果が得られました。図 10 は、I と V の定義、二次側 MOSFET のタイミングチャート、タイミングチャートに基づく各損失形態の算出方法を示しています。各損失区間は時間の区切りに基づいており、6 種類の損失が計算されました。

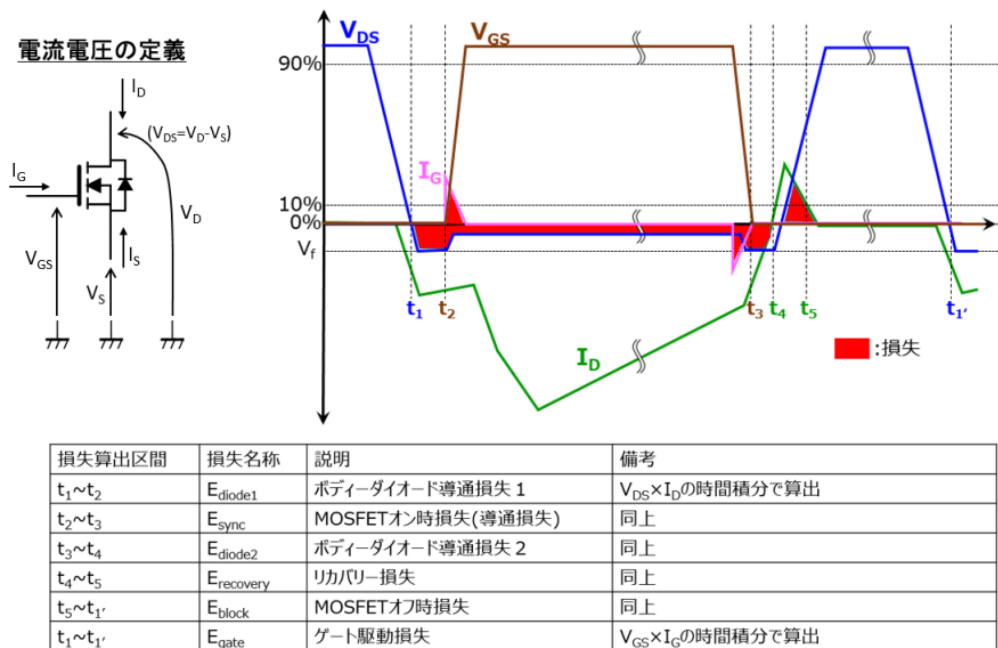


図10. 損失計算タイミングチャート

## 参照リンク:

[300W 絶縁型 DC-DC コンバーターの効率評価と損失分析 \(PDF:1.8MB\)](#)

## 第6章: どの MOSFET が最適か？

TPH2R408QM の場合の 2 次側 MOSFET の損失解析結果を図 11 にプロットします。支配的な損失は、ボディダイオードのリカバリ損失 ( $E_{\text{recovery}}$ ) (これは電流の影響を受けにくい) と導通損失 ( $E_{\text{sync}}$ ) であり、これは出力電流とともに増加します。このことは、逆回復電荷量が低く、ドレイン・ソース間のオン抵抗が低い MOSFET が最も効率的な選択であることを示しています。

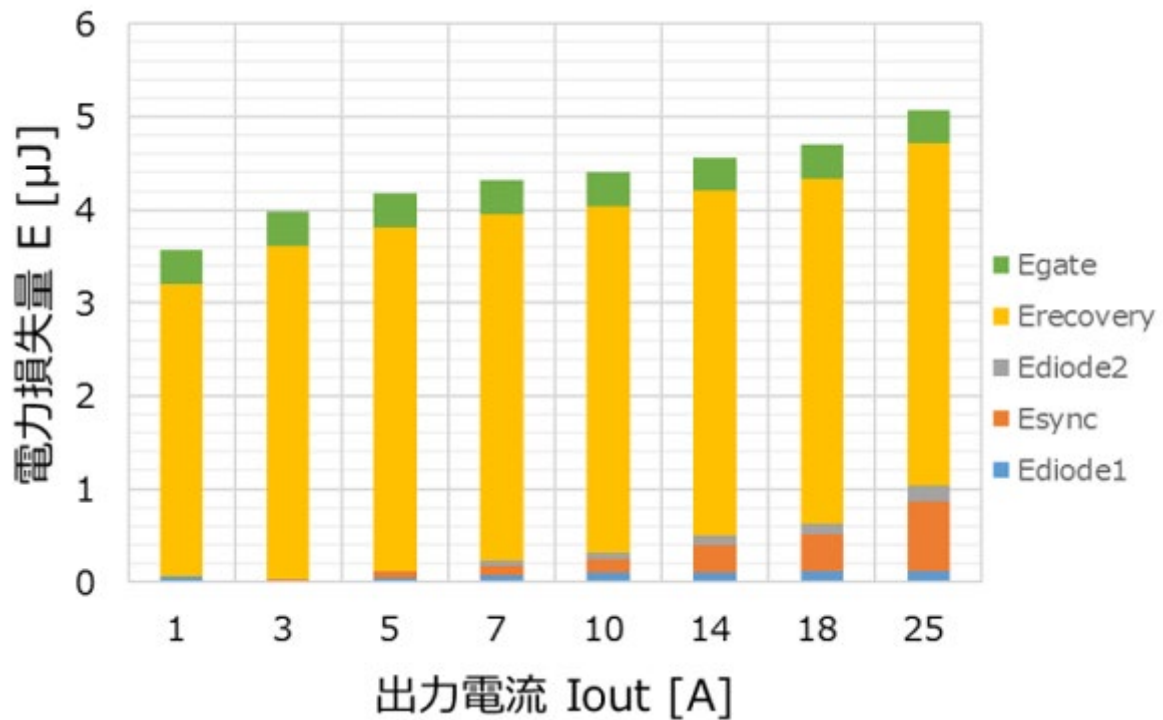


図 1 1. 損失タイプ別に分類された 2 次側 MOSFET の損失解析結果

## 第7章: 効率の最適化 : 二次側 MOSFET の探索

絶縁型 DC-DC コンバーター回路の二次側 MOSFET の選定は、全体の効率を左右する重要なポイントです。当社は、30 V から 250 V までの幅広い  $V_{DSS}$  と、各  $V_{DSS}$  クラスにおけるさまざまなドレイン・ソース間オン抵抗タイプのパワー-MOSFET の強力なラインアップ提供しています。当社の低逆回復電荷量、低ドレイン・ソース間オン抵抗 MOSFET を用いた高効率 DC-DC コンバーターの設計については、リファレンスデザインをご参照ください。

### 参照リンク:

[パワー-MOSFET の強力なラインアップ](#)

[300W 絶縁型 DC-DC コンバーター](#)

## 製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。

- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。

本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。

- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。

特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。

- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。

- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。

- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。

本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。