

## 高電圧パルス電源における磁性体コアの特性評価

### CHARACTERIZATION OF MAGNETIC CORES IN HIGH-VOLTAGE PULSE POWER SUPPLIES

顔 秉宇<sup>#,A)</sup>, 出口 達也<sup>A)</sup>, 岡崎 祐樹<sup>A)</sup>, 小幡 真<sup>A)</sup>, 須貝 太一<sup>A)</sup>, 徳地 明<sup>A)</sup>, 江 偉華<sup>A)</sup>

Bingyu Yan<sup>#,A)</sup>, Tatsuya Deguchi<sup>A)</sup>, Yuki Okazaki<sup>A)</sup>, Makoto Obata<sup>A)</sup>, Taichi Sugai<sup>A)</sup>, Akira Tokuchi<sup>A)</sup>, Weihua Jiang<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Nagaoka University of Technology

#### Abstract

The Linear transformer driver (LTD) is one of the pulsed power generation methods. The characteristics of the magnetic core determine the maximum output performance of LTD. The circular LTD is equipped with 25 basic circuits with a rating of 144ASi MOSFET, and the maximum current is 3.6kA. Now we have designed a new Ltd called RT-Ltd, RT-LTD is equipped with 60 large-capacity SiC MOSFET, and the maximum current is improve to 14.2kA, which is about 4 times the circular output current under ideal circumstances. In RT-LTD, core is changed from the circular shape to the race-track shape. This study compared the BH characteristics of the magnetic core and its frequency dependence, and analyzes the role of the magnetic core in LTD based on these basic characteristics. In addition, we compared the efficiency of the ltd under different pulse widths and different load conditions.

#### 1. はじめに

加速器システムにて大強度ビームを取り出すために [1], Racetrack LTD(RT-LTD)を開発した。

RT-LTD 1 モジュールあたり 60 個の基礎回路が配置されている。スイッチは円形 LTD の Si パワーMOSFET に対し、SiC パワーMOSFET[2]である。このような基礎回路数の増加と大容量スイッチへの変更によって円形 LTD から大電流化が期待できる。円形 LTD と RT-LTD 1 モジュールの構造を Fig. 1 に示す。

本稿は 2 種磁性体コアの B-H 特性およびその周波数依存性評価する、これらの結果を用いて、LTD の出力に対する影響と制限を明らかにし、改善の方向性について検討する。

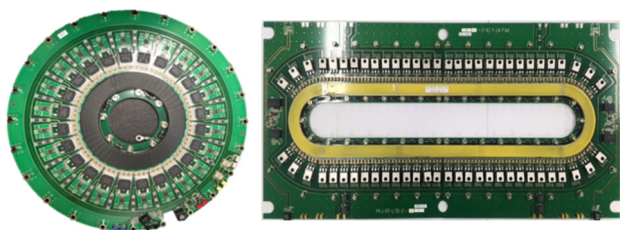


Figure 1: Circular LTD and RT-LTD.

#### 2. 磁気コアの特性比較

##### 2.1 周波数特性の比較

磁性体コアの特性比較を行うために、まず基本的な特性である商用周波数での B-H カーブの測定を行った。今回の実験では現在 LTD に使用しているナノ結晶磁性体コアを用いた。これらの 2 種類の磁性体コアの詳細を Table 1 に示す。

Table 1: 2 Types Magnetic Core Specifications

	Racetrack	Circular
磁路長 [mm]	1267	131
断面積 [mm <sup>2</sup> ]	154	175

繰り返し周波数 50 Hz の交流電圧を加える、B-H カーブの測定を行った。コアが飽和するまで電圧を上げ、飽和した時の 1 次側電圧と電流を測定した。測定結果は式 1 と式 2 により導出した B-H カーブを Fig. 2 に示す。

Figure 2 より円形コアの飽和磁束密度は RT 形コアの飽和磁束密度より大きい、円形コアの比透磁率は RT 形コアの比透磁率より大きいが確認できる。

$$B = \frac{1}{SN_1} \int v_1 dt \quad (1)$$

$$H = N_1 \frac{I_1}{l} \quad (2)$$

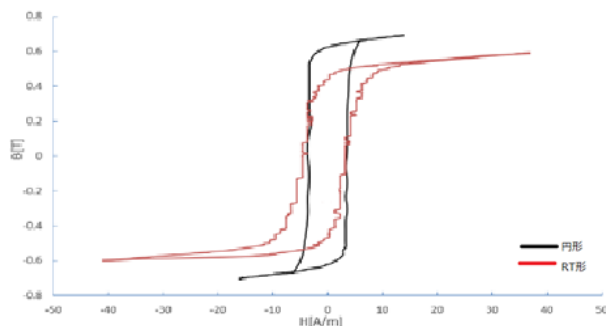


Figure 2: RT core and circular core hysteresis curve.

##### 2.2 周波数特性の比較

磁性体コアは高周波になると特性が劣化してしまうことがわかっている。そこで、インバーター回路を用いて磁性体コアに入力するパルスの繰り返し周

<sup>#</sup> s195072@stn.nagaokaut.ac.jp

波数を 333 Hz~2.5 kHz まで変化させて B-H カーブの測定を行った。

コアの 1 次側に周波数可変のインバーター回路を用いてパルス電圧を入力し、コアが飽和するまで電圧を上げ、飽和した時の 1 次側電圧と電流を測定した。B と H を導出した。Figure 3 と Fig. 4 に B-H カーブを示す。

円形コアや RT 形コアにおいて、周波数が高くなると、コアの保磁力が増加し、比透磁率が減少することが確認できる。

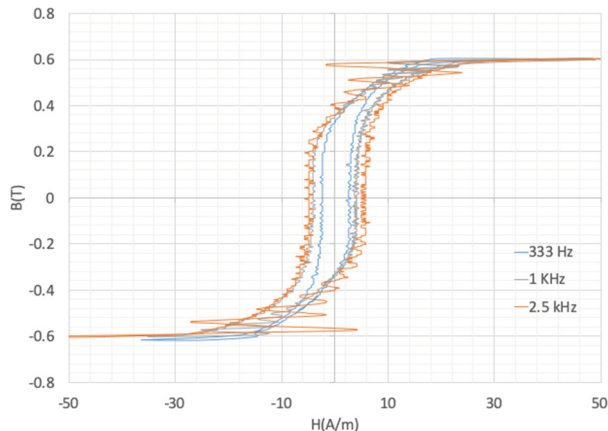


Figure 3: RT core hysteresis curve at different frequencies.

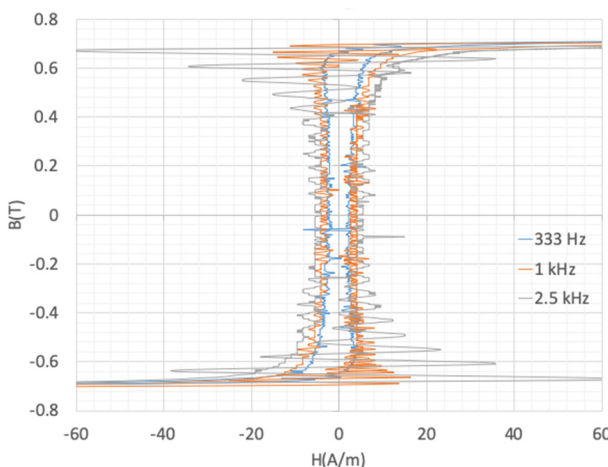


Figure 4: Circular core hysteresis curve at different frequencies.

### 2.3 短パルス特性の比較

LTD は主に高電圧および短パルス条件下で動作している。そこで、磁性体コアに入力するパルスのパルス幅を 100 ns~10  $\mu$ s まで変化させて B-H カーブの測定を行った。

コアの 1 次側に LTD 電源から 100 ns~10  $\mu$ s のパルス幅を入力し、コアが飽和するまで電圧を上げた、飽和した時の 1 次側電圧と電流を測定した、B と H を導出した。Figure 5 や Fig. 6 に B-H カーブを示す。

円形や RT 形磁性体コアにおいて、励磁時間が短くなると、コアの保磁力が増加し、比透磁率が減少する、またコア損失が増加することが確認できる。

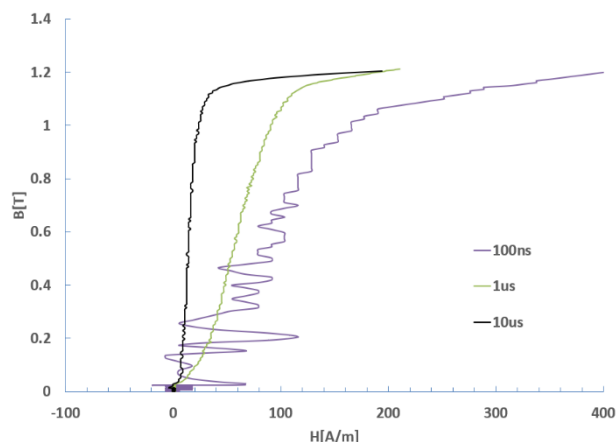


Figure 5: RT core hysteresis curve at different excitation time.

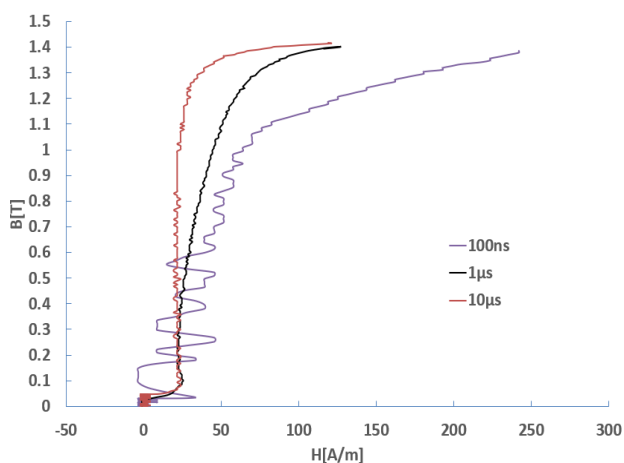


Figure 6: Circular core hysteresis curve at different excitation time.

## 3. LTD 電源の出力効率比較

### 3.1 パルス幅による出力効率

LTD 動作時、パルス幅の増加に伴って、磁性体コアの損失も増加していることがわかっている。磁性体コアの損失が大きくなると、LTD の効率が低下そこで、パルス幅変化させてエネルギー効率の比較を行った。

円形 LTD と RT-LTD は 1 モジュールで、パルス幅は 90~150 ns、繰り返し率は 1000 Hz、充電電圧は 800 V、負荷抵抗は 12.5  $\Omega$  であった。充電電圧、充電電流から入力電力を算出し、負荷電圧、負荷電流から出力電力を算出することで効率を算出した。実験結果を Fig. 7 に示した。

パルス幅の増加に伴って、円形 LTD また RT-LTD 出力効率が低下になる確認できる。これは、LTD パルス幅が増すにつれて磁性体コアの損失が増加したことに起因する。

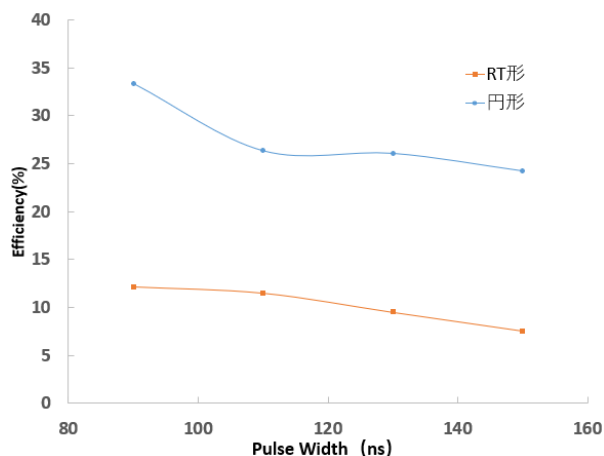


Figure 7: Output efficiency at different pulse width.

### 3.2 負荷抵抗による出力効率

円形 LTD と RT-LTD は 1 モジュールで、充電電圧 800 V、ゲート信号幅 130 ns、繰り返し周波数 1000 Hz、負荷抵抗を 1.25 Ω-12.5 Ω とした。

充電電圧、充電電流から入力電力を算出し、負荷電圧、負荷電流から出力電力を算出することで効率を算出した。その結果を Fig. 8 に実験結果を示す。

Figure 8 により、円形 LTD また RT-LTD 効率は負荷抵抗が大きくなるにつれて、小さくなっていることが確認できる。これは、コア損失は変化しないが、負荷電流は小さくなり、出力電力が小さくなるためである。この結果より、LTD は負荷抵抗が小さく大電流を流す方が効率が高くなることが分かった。

しかし、電流を大きくするとスイッチング損失が大きくなる。そのため、コア損失より、スイッチング損失が支配的な領域まで、電流を大きくすると効率は減少すると考えられる。

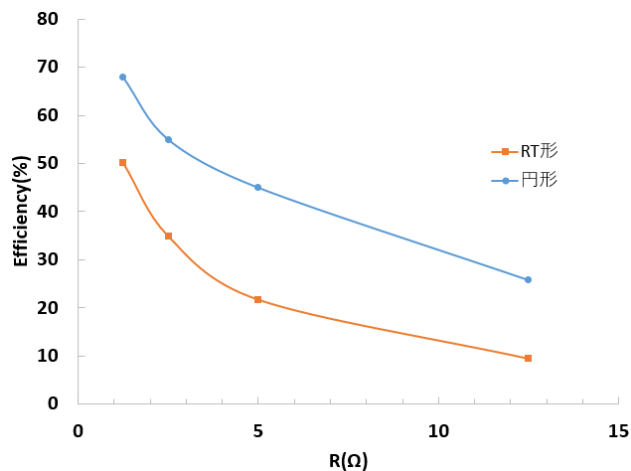


Figure 8: Output efficiency at different resistance.

## 4. まとめ

本研究では、LTD 電源の高効率化、高繰り返し化のために、磁性体コアに着目し評価を行った。2つのコアの比較により、円形コアは飽和磁束密度が高く、比透磁率も高くという結果を得た。

周波数特性実験より2種類と周波数が高くなると、コアの保磁力が増加し、比透磁率が減少する確認した。励磁時間特性では2種類ともに励磁時間減少によってコア損失が増加する確認した。

パルス幅の変化実験より、2種 LTD パルス幅の増加に伴って、出力効率が低下になる確認できる。また、負荷抵抗の変化実験で、2種 LTD 効率は負荷抵抗が大きくなるにつれて、小さくなっているという結果を得た。

従って、LTD は短パルス、低負荷抵抗で動作時、更なる高効率化が可能であると考えられる。

## 参考文献

- [1] W.Jiang *et al.*, "Pulsed Power Generation by Solid-State LTD" IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 42, NO. 11, pp3603-3608 (2014).
- [2] T. Takayanagi *et al.*, "Development of a New Pulsed Power Supply Adopted SiC-MOSFET", in Proc. IPAC'17, WEPVA063.