

パワーインダクタの第一歩 - 基本パラメータを理解する -

蜷川 顕二

シニアFAE

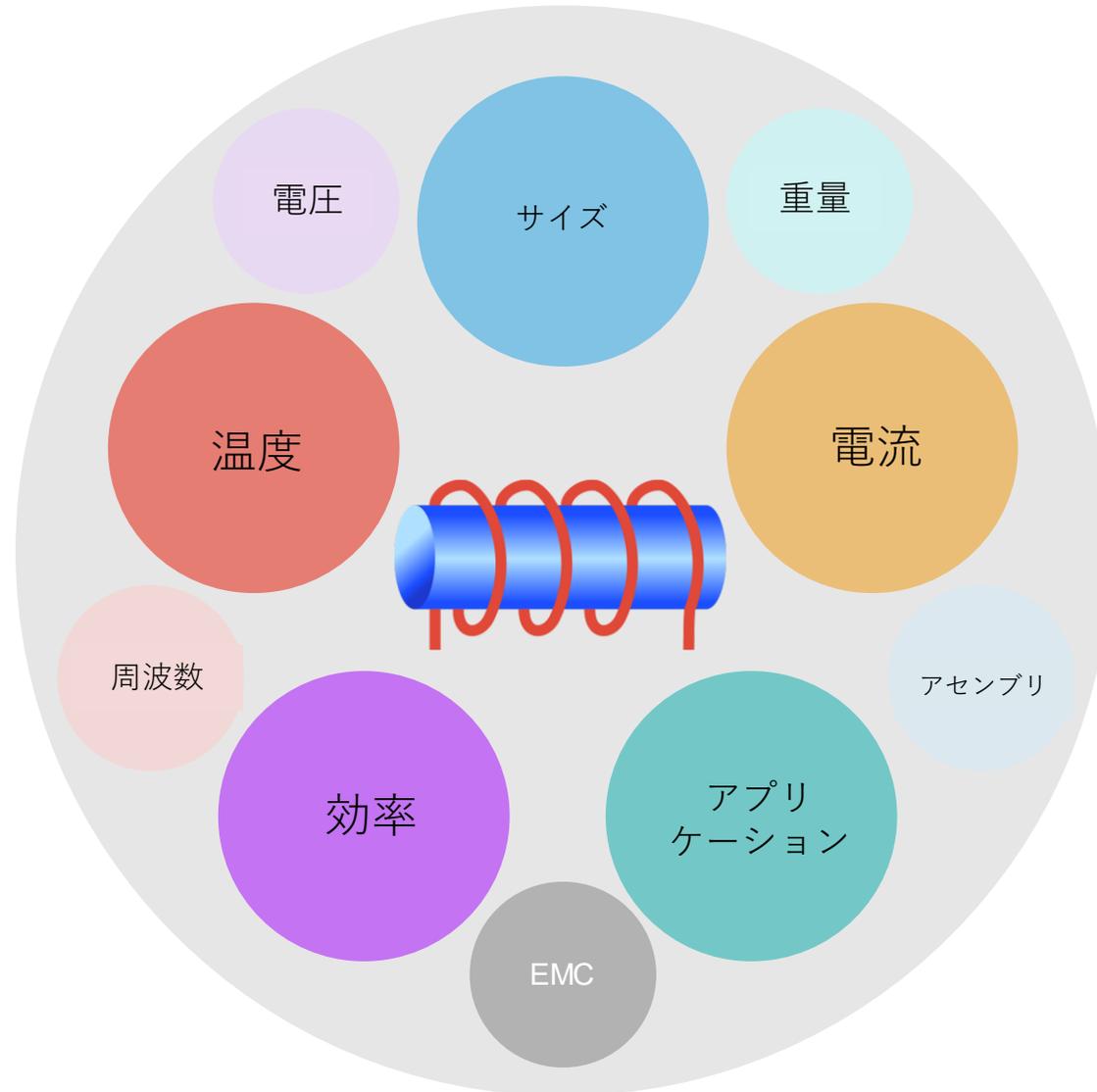
MPSジャパン

2024年6月

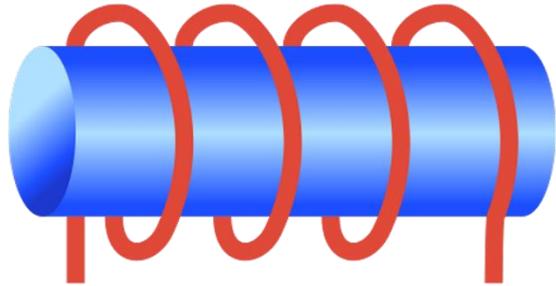
トピック

1. インダクタとは?
2. 技術的特性, 電磁気学の基礎
 - インダクタンス
 - 透磁率
 - インダクタ損失
3. インダクタを選定するときに重要なパラメータ
 - 定格電流
 - 飽和電流
 - 共振周波数
 - 巻き始め
4. MPSのインダクタの概要
5. 効率比較
6. Q&A

インダクタを選ぶ



インダクタとは



インダクタの主な機能とは?
電流変化に逆らう

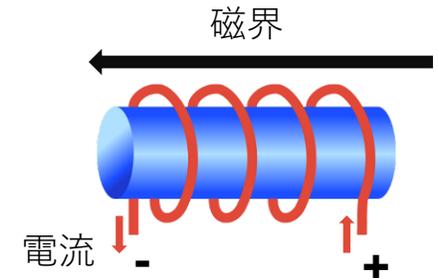
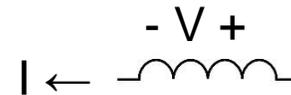
$$V = L \frac{di}{dt}$$

電流に変化があるとき、
インダクタには常に電圧が発生する

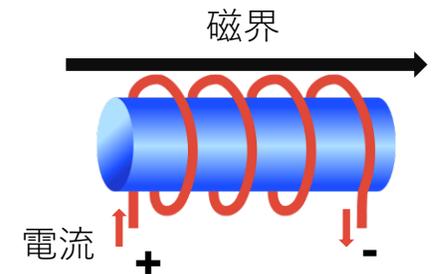
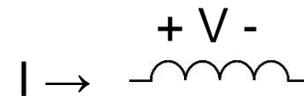
$$I = \text{constant} \quad V = 0$$

コイル状に巻かれたワイヤ

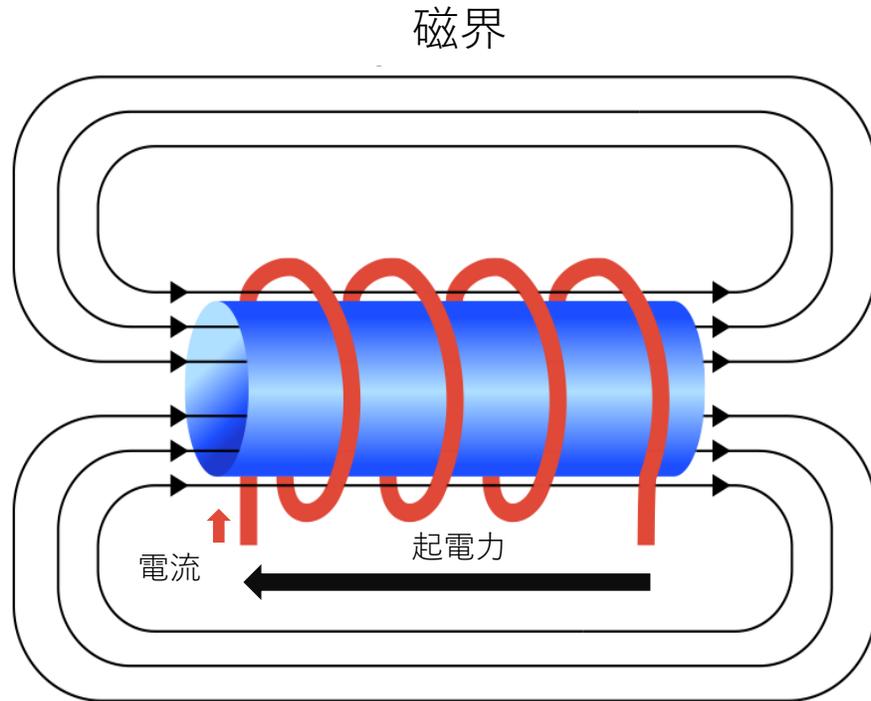
- 回路からの電流変化に逆らう
 - 電流が減少しているとき、インダクタは減少を妨げる働きをする



- 電流が増加しているとき、インダクタは増加を妨げる働きをする



インダクタとは



- インダクタは電気エネルギー (電流) を磁気エネルギーとして蓄積することが可能
- 電流の時間変化により、誘導磁気エネルギーは変化し、起電力を発生させる

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

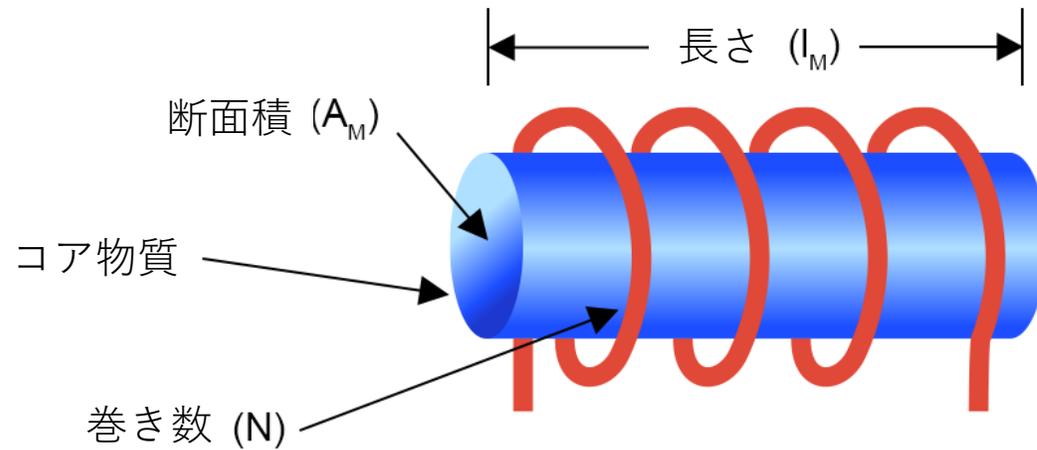
e 起電力 (EMF : Electromotive Force)

$\frac{d\phi}{dt}$ 時間の変化によって発生する磁束の変化

$\frac{di}{dt}$ 時間の変化によって発生する電流の変化

L インダクタンス値 (単位 H (ヘンリー))

インダクタンス



$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r A}{l} N^2$$

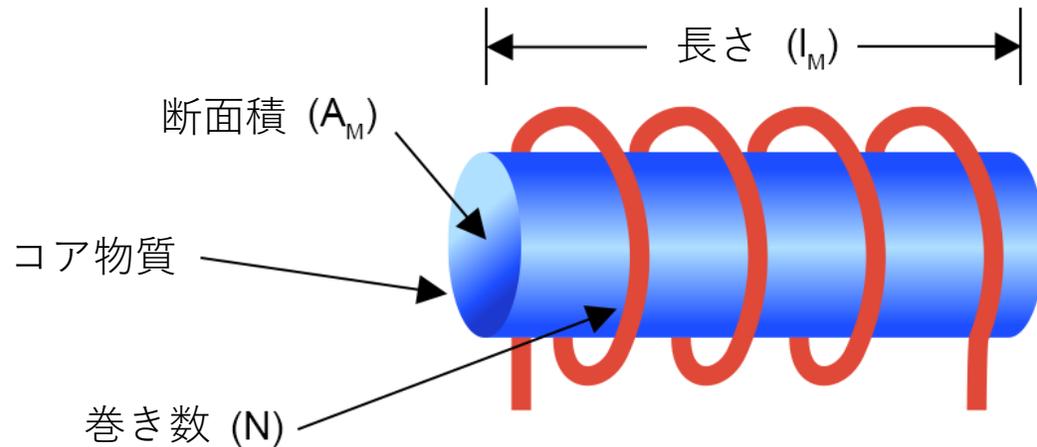
- L インダクタ値、単位はヘンリー (H)
- μ_0 真空透磁率 ($4\pi 10^{-7}$)
- μ_r 比透磁率
- A_M コイル断面積
- l_M コイル長
- N 巻数

$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A}{l} N^2 \rightarrow L = A_L N^2$$

コア物質に関連したパラメータ A_L : インダクタンス係数

インダクタンス

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r A}{l} N^2$$



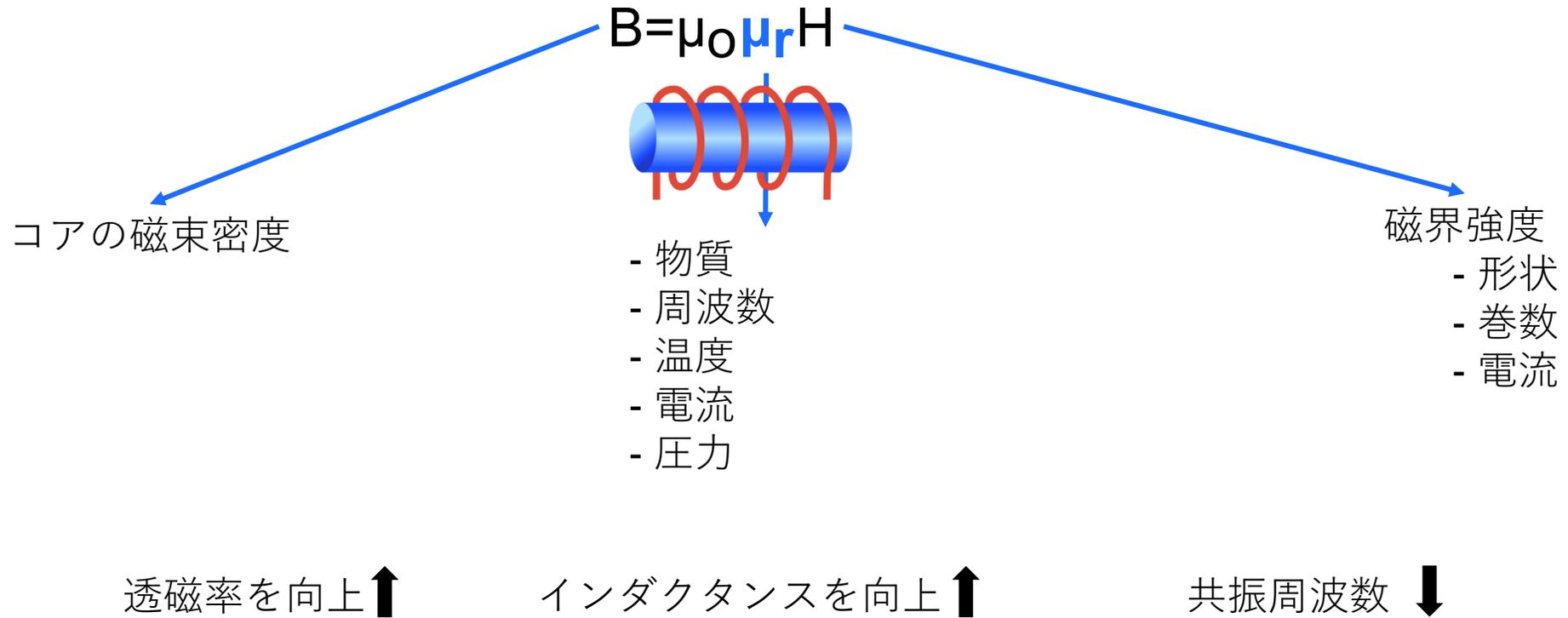
インダクタンスを増加するには:

- μ ↑ 高い透磁率のコアを使う
- l ↓ コアの長さを減らす
- A ↑ コアの断面積を増やす
- N^2 ↑ 巻数を上げる

サイズ、重量、パフォーマンスのバランスをとる
小さなパッケージは重量を減らすことが可能
巻き数を少なくすると R_{DC} を減らすことが可能

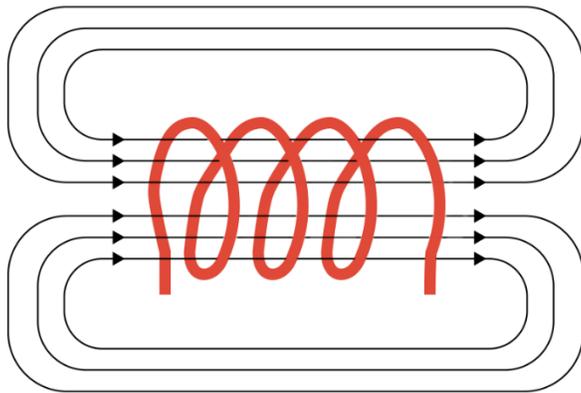
透磁率

磁束密度を上げる素材の能力

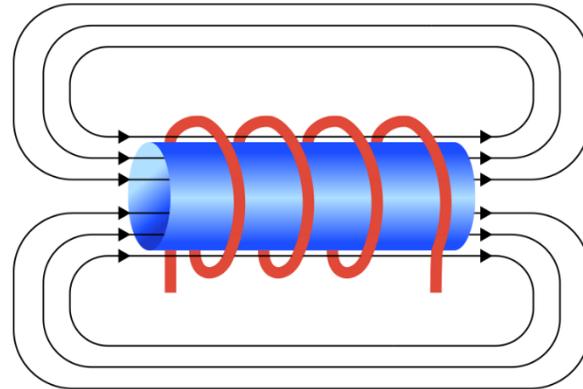


透磁率

物質	比透磁率 μ_r
空中	~1
鉄 (FEベース)	50~150
ニッケル - 亜鉛	40~1500
マンガン - 亜鉛	300~20000



$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$



$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

磁界は変わらず

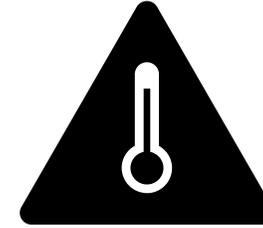
磁束密度は高透磁率のコア材料を使用することで強化可能

損失

銅損失

DC損失

インダクタ巻線 R_{DC} の放熱



AC損失

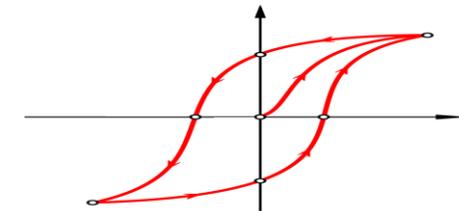
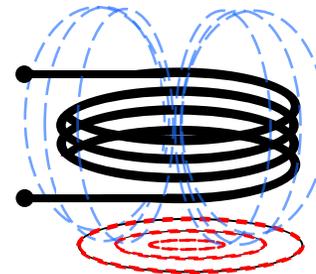
周波数による巻き構造損失
近接効果
表皮効果

コア損失

磁性材料損失

渦電流

ヒステリシス損失



銅損失

P_{DC} 銅損失

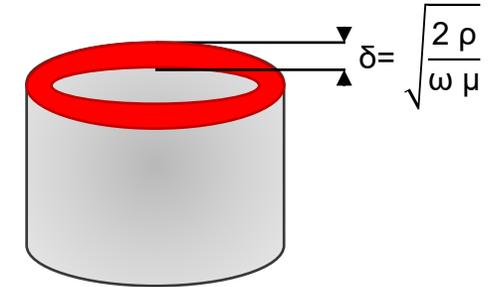
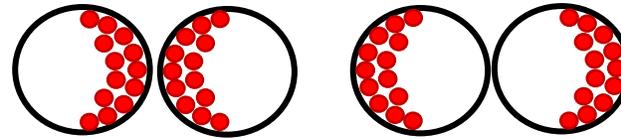
インダクタ巻線 R_{DC} の放熱

より高い放熱、電力損失、効率の低下
ベストな巻線というのは、最小 R_{DC} のこと
コア材料も影響あり (少ない巻き数の場合)

P_{AC} 銅損失

近接効果
表皮効果

逆方向での電流 同方向での電流



周波数に依存; 周波数が高いほど P_{AC} 損失は増加
有効断面積を減らすと巻線内の電流分散が減る

銅損失

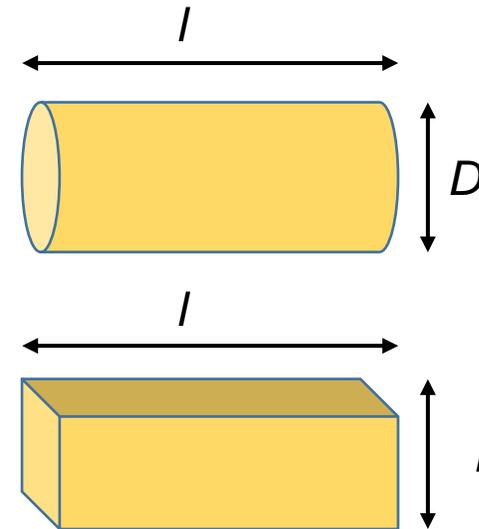
P_{DC} 銅損失
インダクタ巻線 R_{DC} の放熱

$$P_{DC} = I_{DC}^2 R_{DC}$$

$$R_{DC} = \rho \frac{l}{A}$$

ρ 抵抗率 (Cu)
 l 長さ
 A 断面積

ラウンドワイヤ (丸線)	フラットワイヤ (平角線)
より高いインダクタンス	巻線エリアが限定されがちで、最大インダクタンスが小さくなる
より大きな抵抗 (R_{DC})	より少ない抵抗 (R_{DC})
より少ない断面積	巻線窓を完全に使用
多く巻ける傾向	あまり巻けなくなる傾向
低電流向き	大電流向き

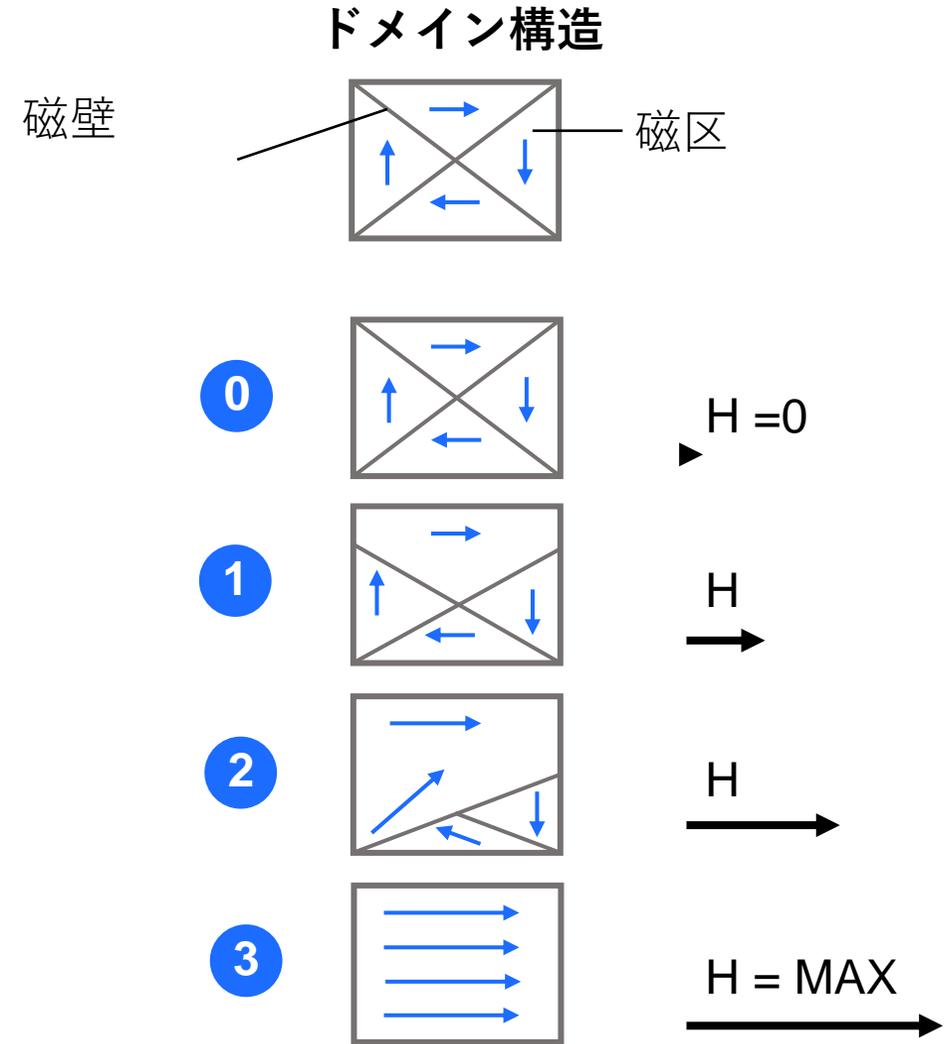
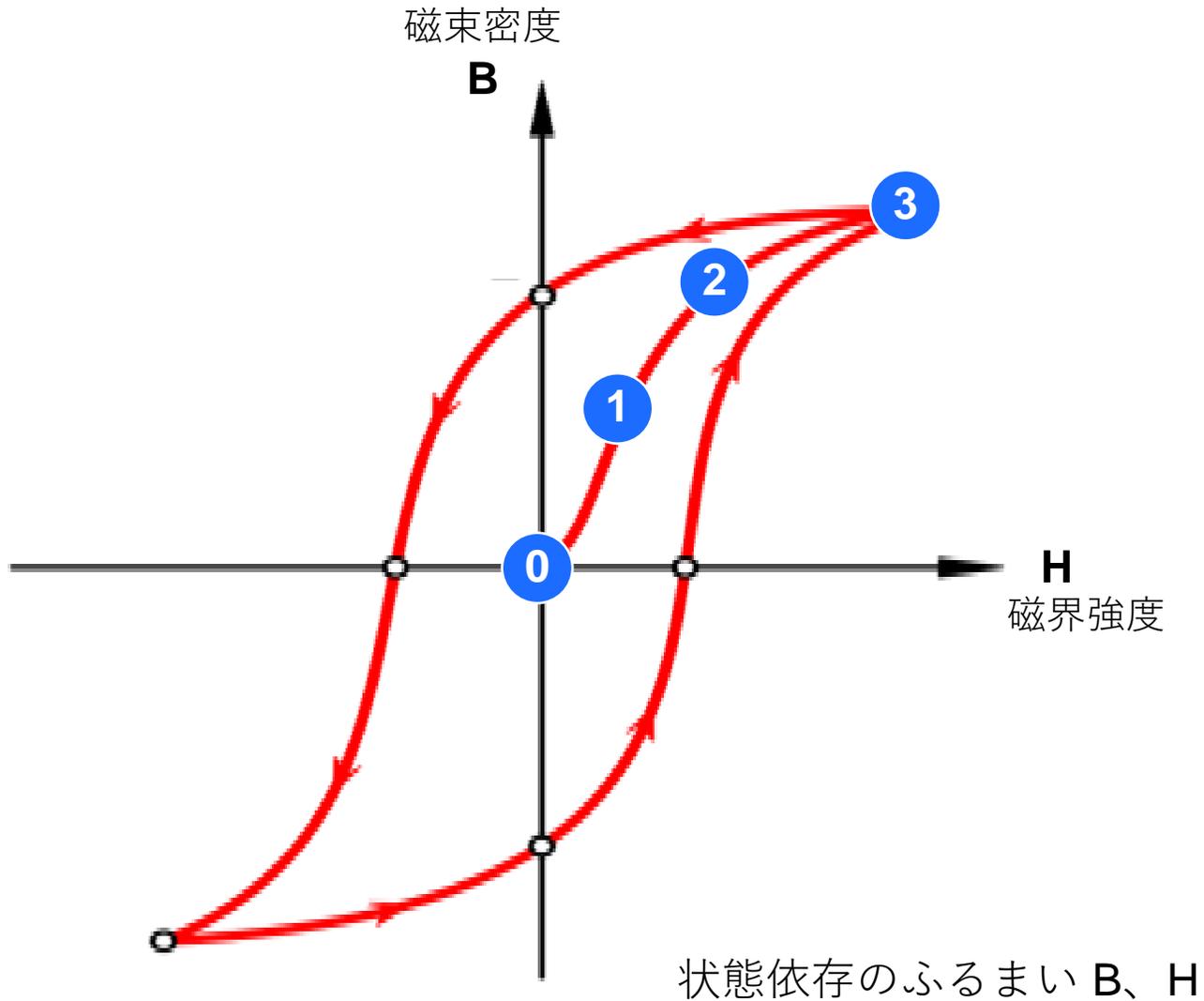


$$A = \pi r^2 = 0.785 \text{mm}^2$$

$$A = \text{長さ} \times \text{高さ} = 1 \text{mm}^2$$

低 R_{DC} であればあるほど、システムの高効率化と高い放熱性を実現可能

コア損失 – ヒステリシス損失



定格電流

部品の自己発熱は、巻線の R_{DC} により発生
温度上昇は標準的なものではなく、メーカーによって差がある。

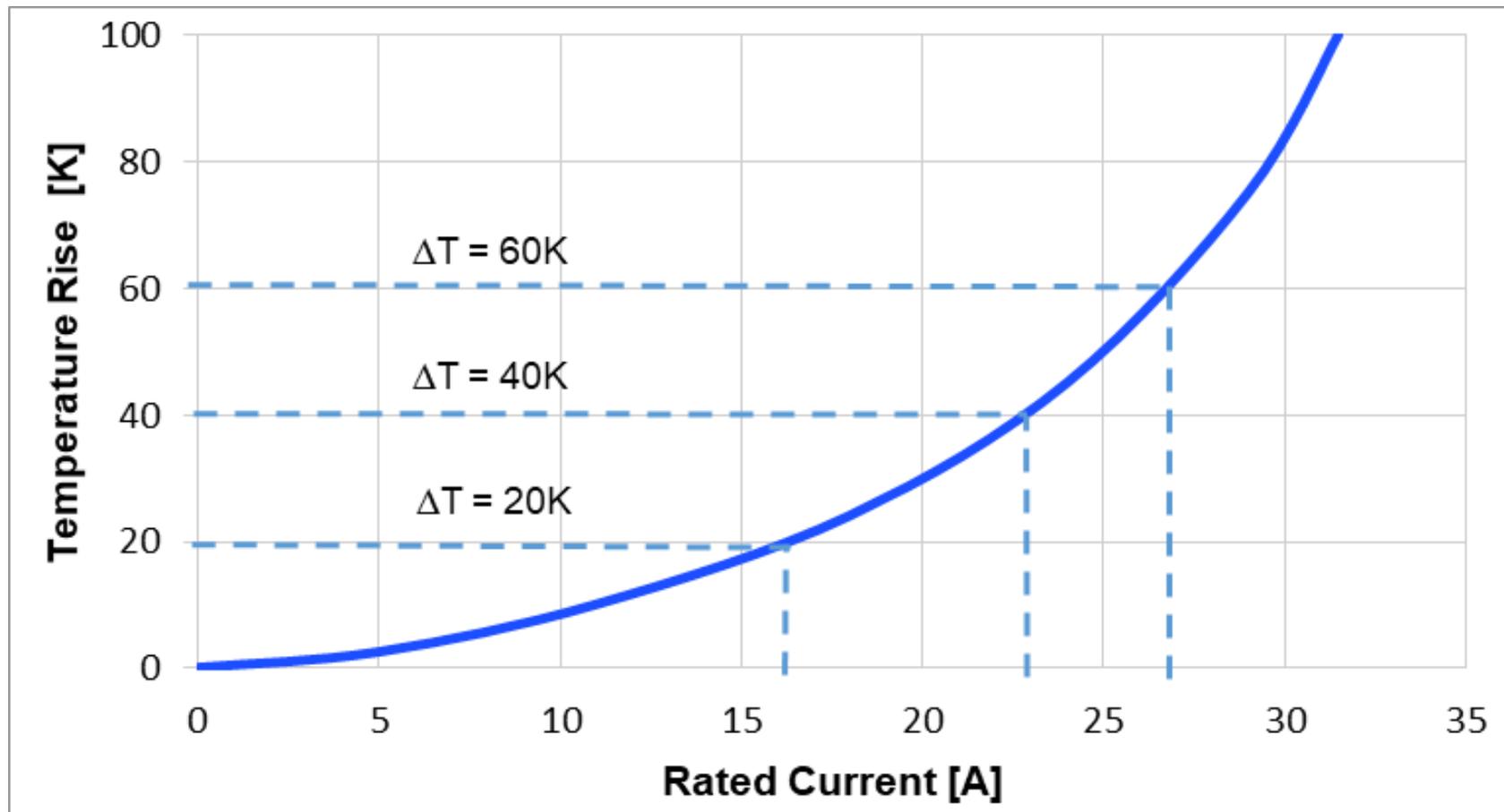
$$T_{OP} = T_{AMB} + \Delta T$$

T_{AMB}	周囲温度	:	-40°C ~ 85°C / -40°C ~ ?°C
ΔT	温度上昇 (自己発熱)	:	20K / 30K / 40K / ?K
T_{OP}	動作温度	:	データシートに記載された最大数値

最大動作温度 T_{OP} を超えない

- 高温環境下で ΔT (自己発熱) を調整する
- より大きな部品を使用する

定格電流



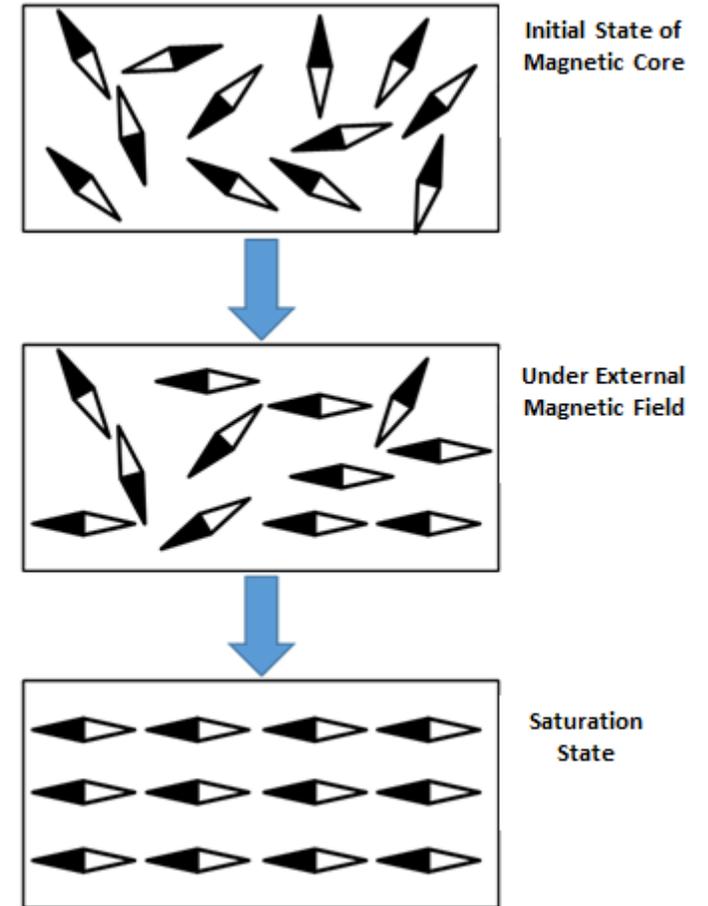
最大動作温度の状態に注意する。
周囲温度も同様に考慮する。

飽和電流

コイルに電流が流れると、コイルは磁界を生成します。

磁性コアは磁場によって磁化され、内部の磁区がゆっくり回転します。

磁性コアが完全に磁化されると、磁区方向が磁界に一致するようになります。

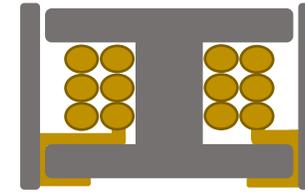


磁場 H が強いほど、磁束 B は強くなる
エアギャップが飽和レベルを決める

飽和電流

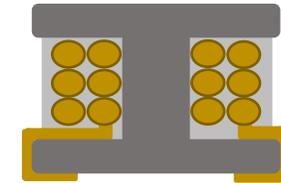
ドラムコアシールドリング型 (閉磁路)

最小飽和



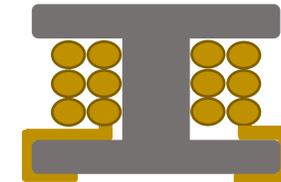
セミシールド型

小～中飽和



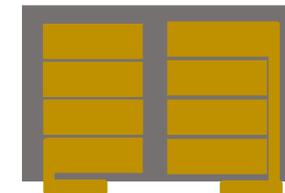
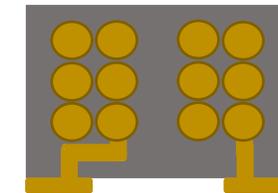
ドラムコア シールド無し型 (開磁路)

中飽和



成形型

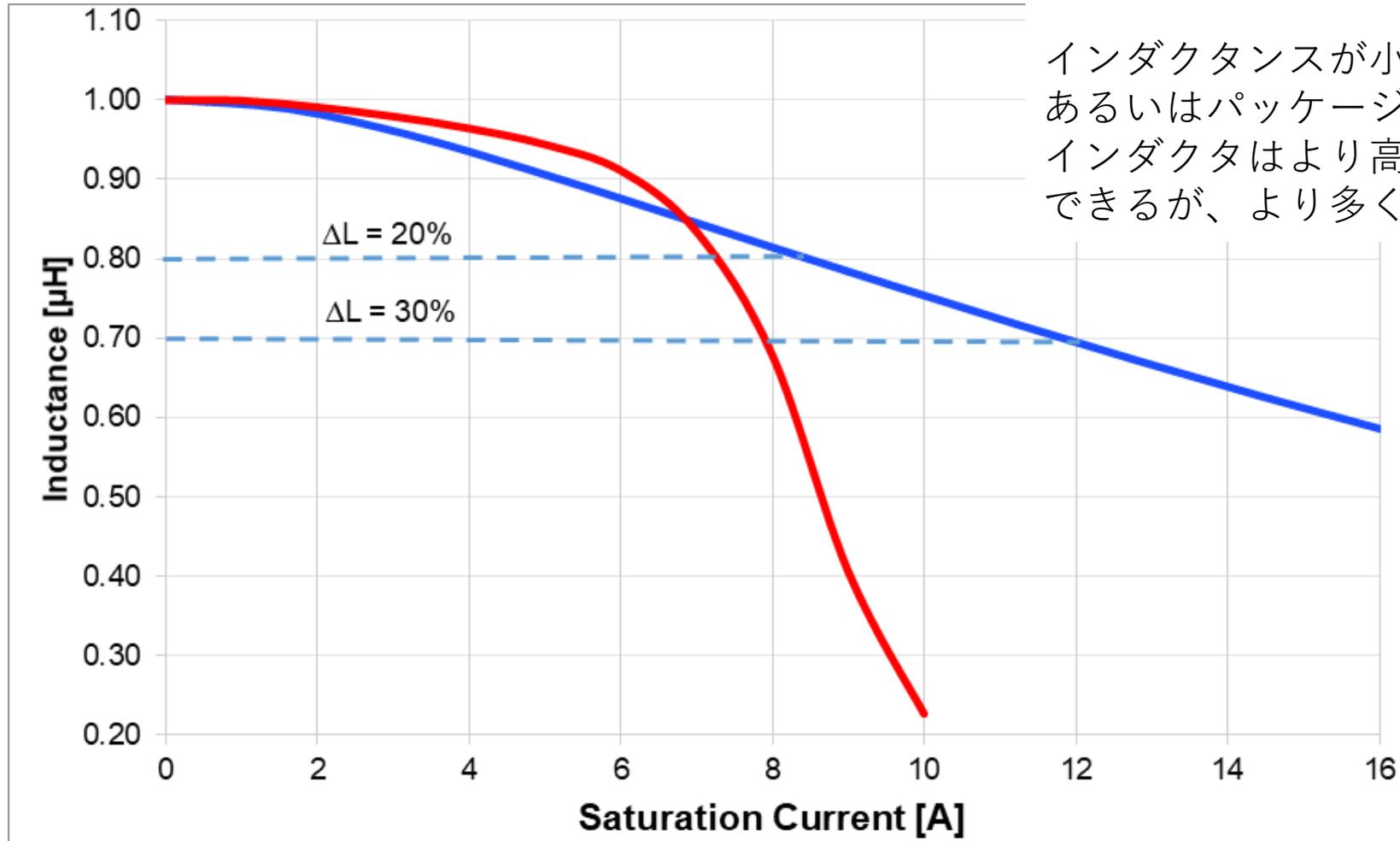
最大飽和



- 飽和電流ポイントはエアギャップが増えると拡張
- 成形インダクタではエアギャップが分散される

飽和電流

定格電流 = インダクタンス値 30%低下した電流

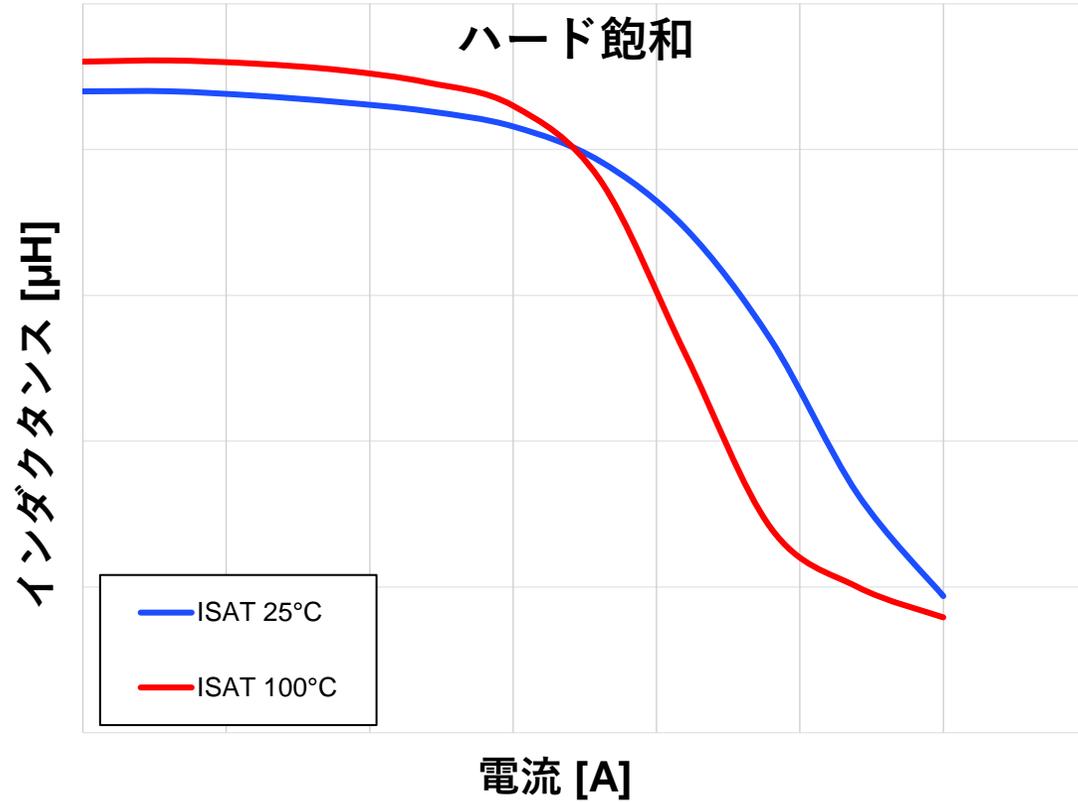


インダクタンスが小さいほど、
あるいはパッケージ・サイズが大きいほど、
インダクタはより高い飽和電流を扱うことができ
るが、より多くの熱を放散する。

飽和電流

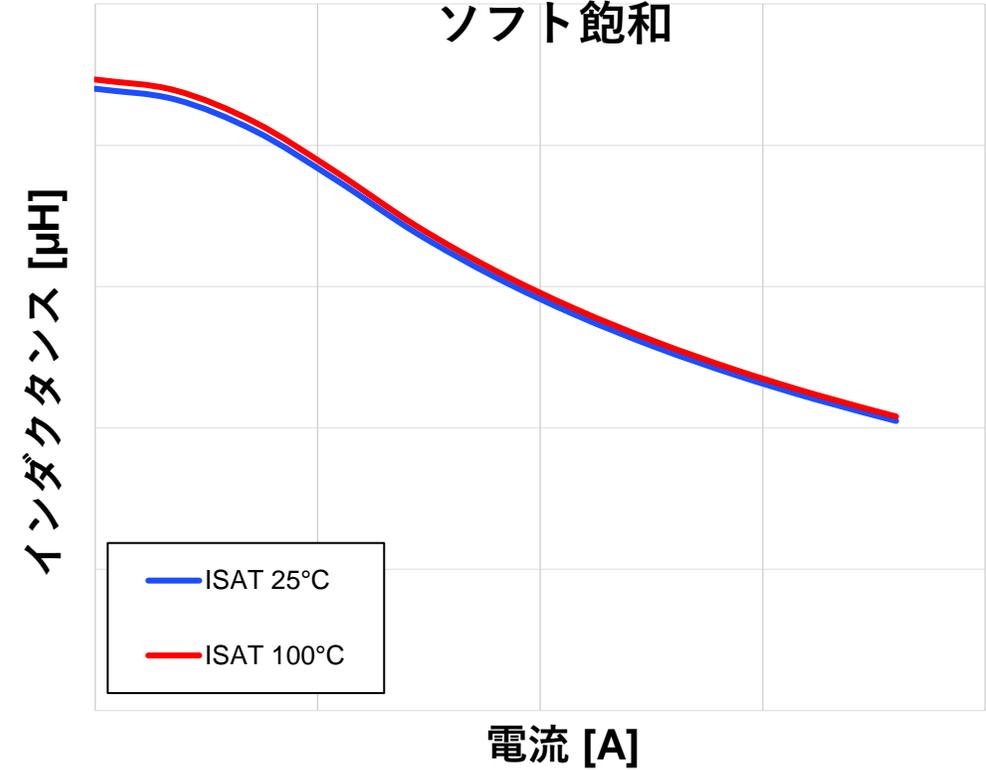
フェライトドラムコア

ハード飽和

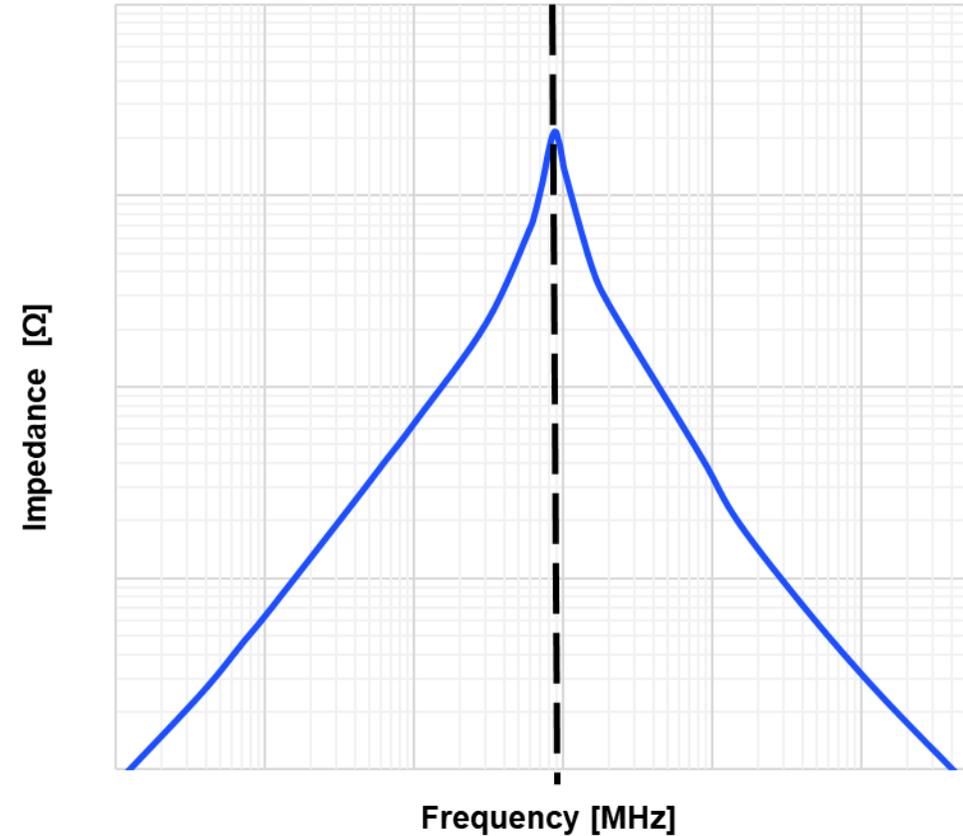
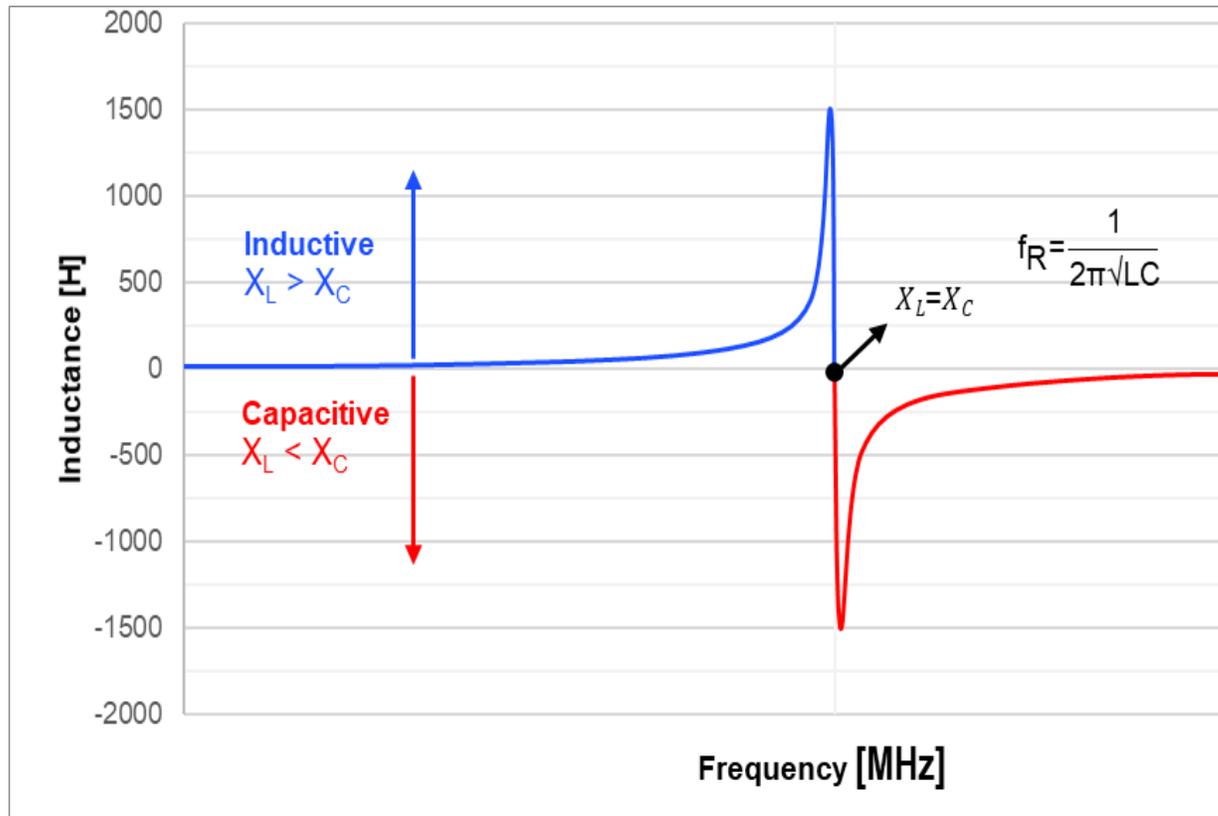


コンポジット成形

ソフト飽和



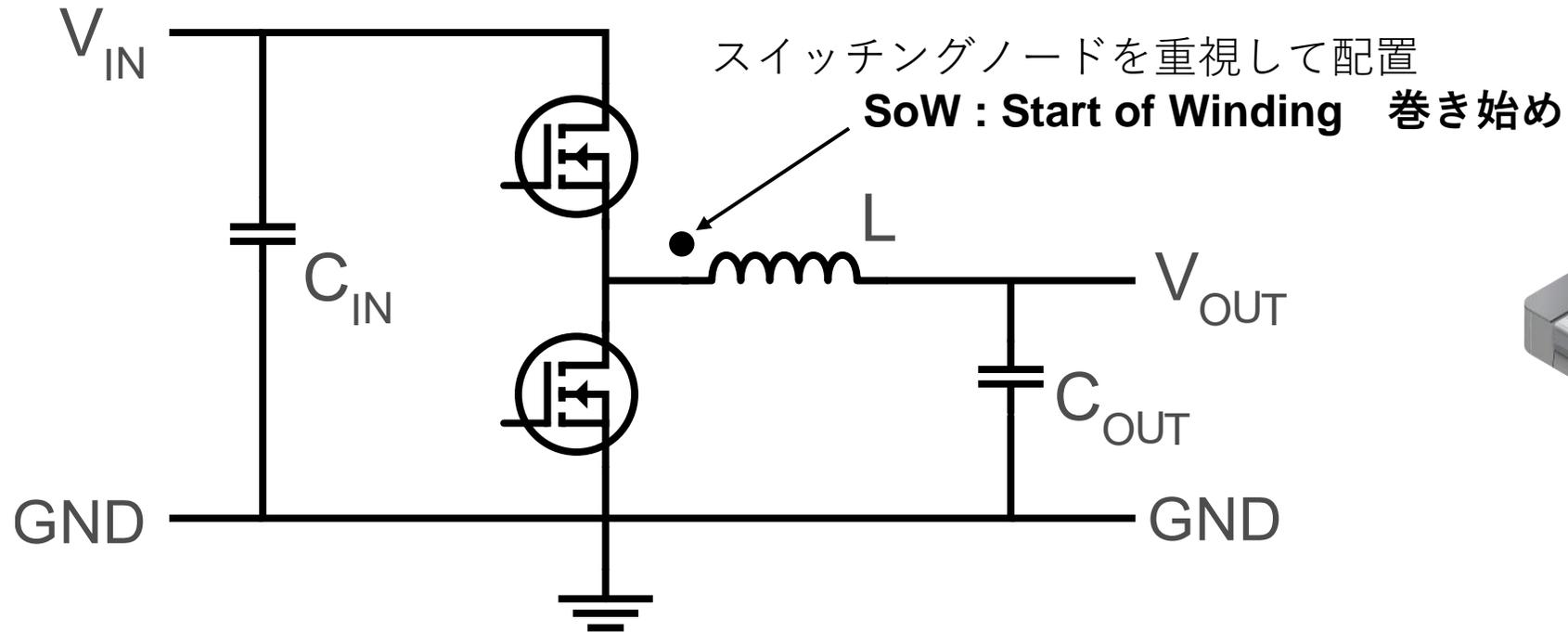
共振周波数



自己共振周波数は
スイッチング周波数よりもかなり高い

巻き始め

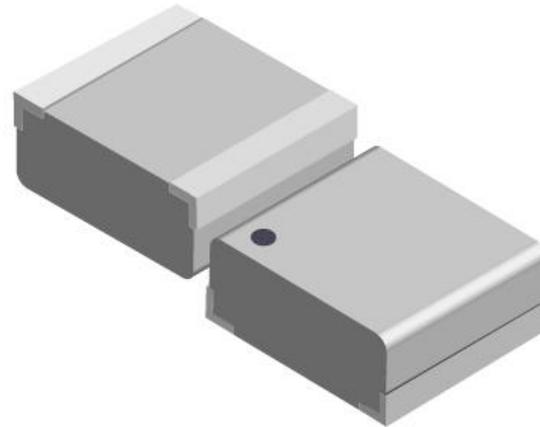
コイルの巻き始め側 (ポッチ) をコンバータのスイッチ・ノード側に置く。



- 高調波からの可聴ノイズを避ける
- インダクタから発生するエミッションを減らす

MPL-ATシリーズ

- **MPL-AT (小型の成形インダクタ)**
 - 巻き始め表示
 - 薄型インダクタ
 - 低DCR
 - 高飽和電流
 - ソフト飽和
 - 全温度範囲で安定
 - 最大動作温度: 125° C
 - サイズ: 2010 / 2512 / 2514



MPL-AYシリーズ

- **MPL-AY (成形インダクタ)**

- 巻き始め表示
- 低DCR
- 高飽和電流
- ソフト飽和
- 全温度範囲で安定
- 最大動作温度: 125° C/155° C
- サイズ: 3020 / 4020 / 1050 / 1265



MPL-ALシリーズ

- **MPL-AL (低抵抗成形インダクタ)**

- 巻き始め表示
- フラットワイヤ構造
- 最小DCR
- 高性能
- 高飽和電流
- ソフト飽和
- 全温度範囲で安定
- 最大動作温度: 155° C
- サイズ: 4020 / 5030 / 5050 / 6050 / 6060



フラットワイヤ、低DCR、高性能

MPL-SEシリーズ

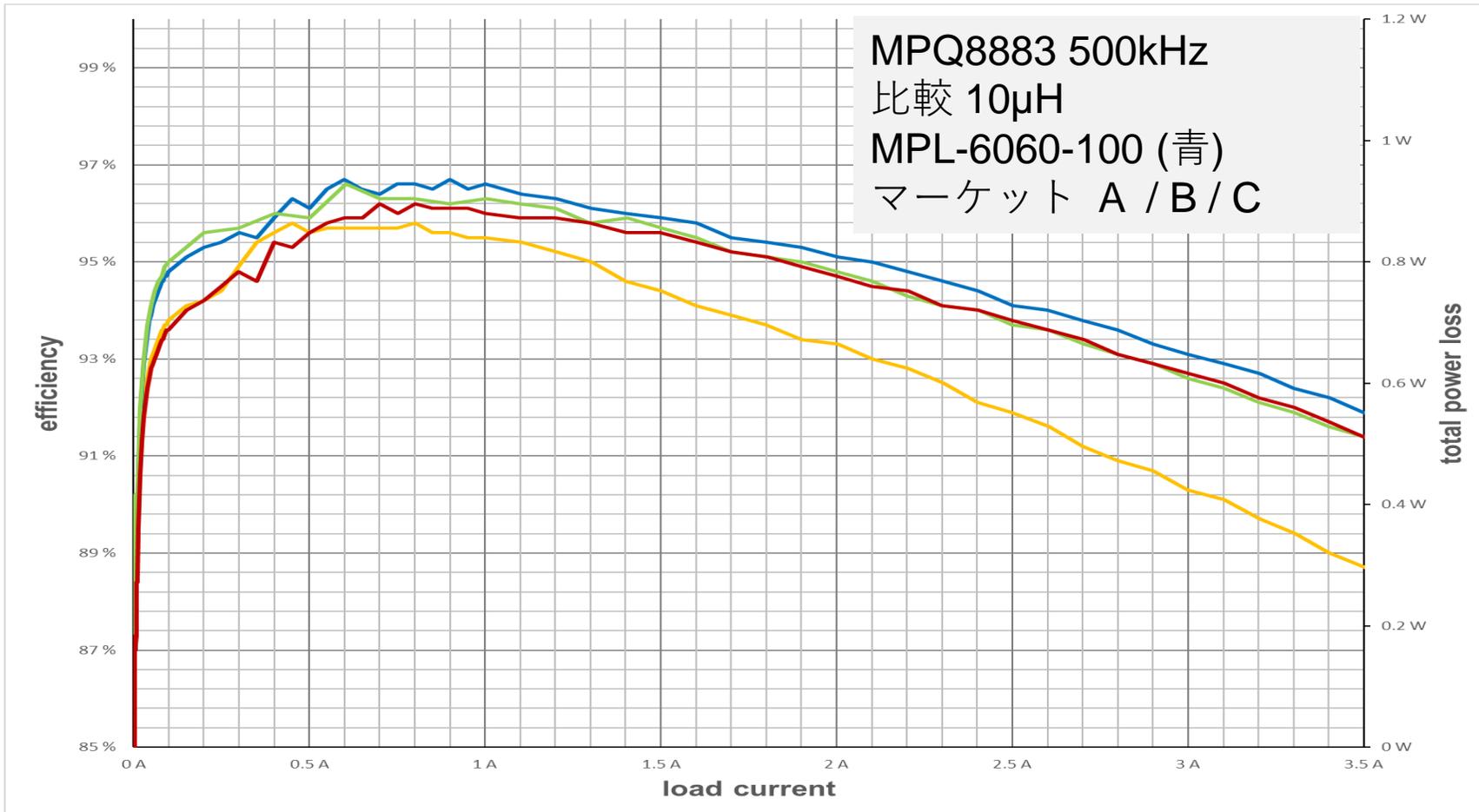
- **MPL-SE (セミシールドインダクタ)**

- 磁気特性を向上させる外部エポキシ樹脂
- 磁気シールド
- 低DCR
- 大電流
- 最大動作温度: 125° C
- サイズ: 2512 / 4030 / 5040 / 6040



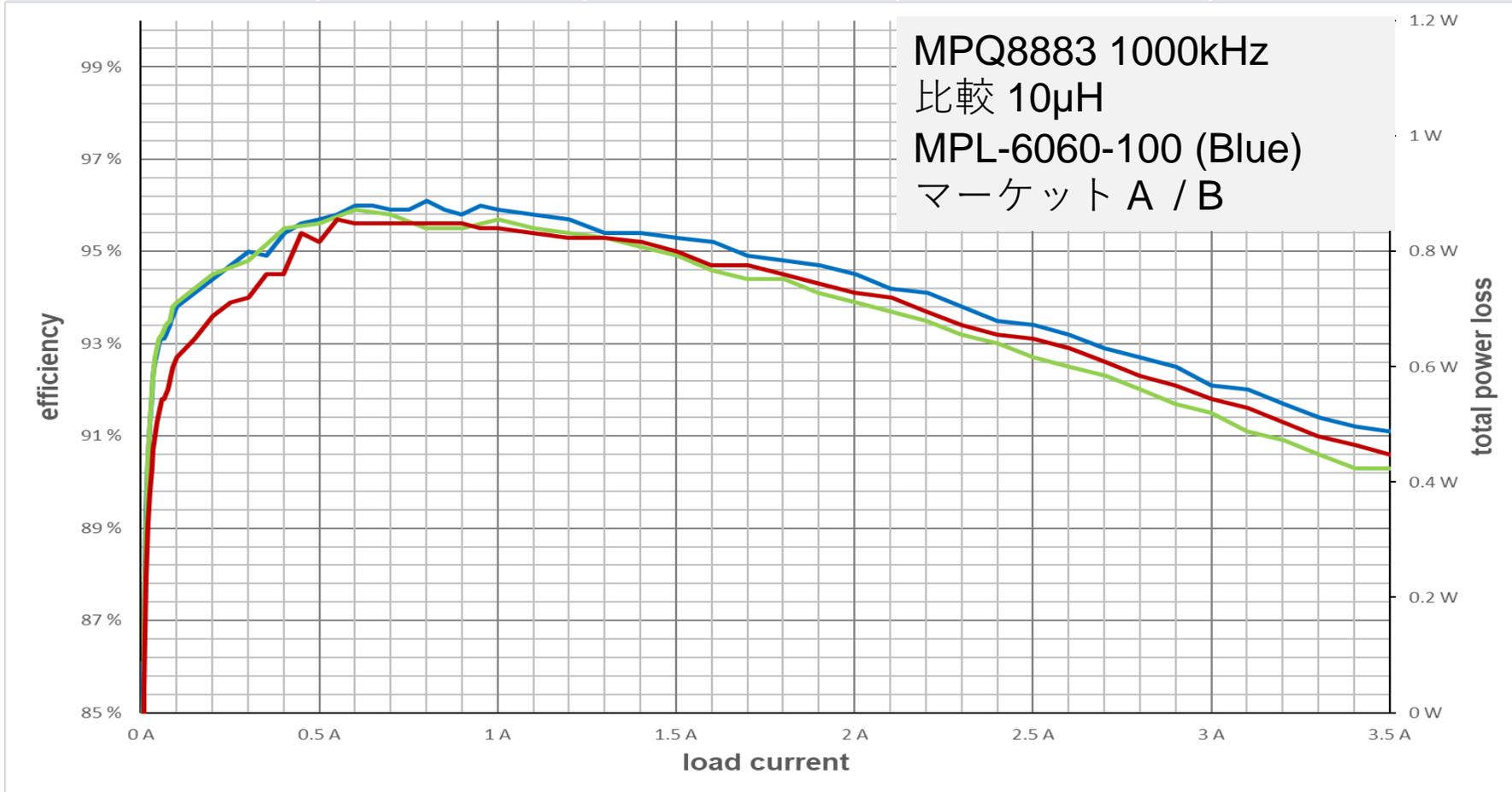
効率

製品型番	L	R _{DC}	I _{DC}	I _{SAT}
MPL-AL6060-100	10 μ H	24m Ω	6.9A	6.6A



効率

製品型番	L	R _{DC}	I _{DC}	I _{SAT}
MPL-AL6060-100	10μH	24mΩ	6.9A	6.6A



サマリー

- インダクタは電流の変化に反応
- 誘導電気エネルギーを磁気エネルギーとして蓄える
- インダクタンスはコア材料の特性と巻数に依存する
- 透磁率の高いコア材で磁束密度を高められる
- 損失
- 定格電流
- 飽和電流
- スイッチングノードに巻線の巻き始めを配置する
- 高性能な**MPS**のインダクタ
 - インダクタを搭載した**MPS**のリファレンスデザインを提供可能
 - **MPS**のコンバータは**MPS**のインダクタに最適
- インダクタ計算ツール