

# DORAEMON 「タップ & チャージ」 システム提案のF化

## 1 序論とコンセプト概要

DORAEMON (Detached On-demand Rapid Absorption Energy Mechanism for Optimized Networks: 最適化ネットワ<sup>rk</sup>のためのオンデマンド分離型高速吸<sup>er</sup>エネルギー<sup>mechanism</sup>) は、50<sup>ms</sup>程度の短時間接触によってデバイスへほぼ瞬時にエネルギー<sup>を</sup>移送する無<sup>wireless</sup>「タップ & チャージ」システムを目指す提案である。本質は、エネルギー<sup>移送</sup>フェ<sup>ezes</sup>と使用フェ<sup>ezes</sup>を分離することにある。すなわち、高出力の無<sup>wireless</sup>バ<sup>st</sup>でオンボ<sup>ard</sup>のエネルギー<sup>貯</sup>貯<sup>er</sup>(ス<sup>pace</sup>パ<sup>ck</sup>キャパシタによる「エネルギー<sup>キャビティ</sup>」)を急速に<sup>に</sup>充電し、その後はデバイスのバッテリ<sup>へ</sup>へ時間をかけて放電・充電する。<sup>物理的</sup>的な結合を必要とする<sup>に</sup>来の無<sup>wireless</sup>充電が抱える可動性の制約を、瞬間的な接触でのエネルギー<sup>注入</sup>により解<sup>決</sup>する<sup>に</sup>想である(例: volfpackenergy.com)。このアイデアを確かなものにするには、以下を包含する<sup>に</sup>密な理論<sup>組み</sup>が必要である。

- 短時間パルス中の高<sup>率</sup>な電磁結合(短時間接触で高い電力をどう達成するか)
- 中間貯<sup>er</sup>(ス<sup>pace</sup>パ<sup>ck</sup>キャパシタ)の高速吸<sup>er</sup>ダイナミクス(容量、ESR、リ<sup>l</sup>ク等の回路物理による限界)
- バッテリ<sup>への</sup>最適放電制御(充電速度と寿命の<sup>立</sup>)

以下では各要素を数理的に詳細化し、理論主張が物理的に妥当であることを示す。さらに、MATLAB/Simulink や Python によるソフトウェア<sup>で</sup>再現・<sup>できる形に</sup>整理する。

## 2 瞬時エネルギー<sup>移送</sup>のための電磁結合理論

### 2.1 相互インダクタンスと共振結合

送電・受電の 2 つの共振コイルは、結合した誘導システムを形成する。相互インダクタンス  $M$  は、送電コイルの磁束が受電コイルにどれほど結合するかを定量化する。一般形は次式で与えられる:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2}{\|\vec{r}_1 - \vec{r}_2\|}.$$

幾何形状によっては数<sup>値</sup>計算が必要だが、コイル間距離が小さいほど、また重なり面積が大きいほど  $M$  は大きくなる。結合<sup>数</sup>は  $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$  と定義される ( $L_1, L_2$  は自己インダクタンス)

ス)。本提案のプロトタイプでは、ISM の  $f_0 = 6.78 \text{ MHz}$  に同調し、 $d \approx 12 \text{ mm}$  で  $k \approx 0.42$  を達成している。短時間で大電力を移送するには結合が重要である。

共振動作では、各コイルにコンデンサ ( $C_1, C_2$ ) を組み合わせ、 $\omega_0 = 2\pi f_0$  に同調させる。准静近傍場近似の下、ギャップ中の時刻調和磁界は  $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \Re\{\mathbf{H}_0(\mathbf{r})e^{j\omega_0 t}\}$  と書ける。2つのタンクが同一周波数で安定に同調している限り、エネルギー移送は最大化される。デタニング  $\Delta\omega$  は、 $1/[1 + (\Delta\omega\tau)^2]$  の因子で率を大きく劣化させる ( $\tau$  は  $Q$  に依存)。したがって、タップ中に素早く同調を確立し、保持することが不可欠である。

## 2.2 送受率と最適負荷

等回路モデルでは、 $R_1, R_2$  を各コイルの損失、 $R_L$  を負荷抵抗（整流・蓄電側で見む有負荷）とする。結合共振リンクの最大率は、よく知られるように  $k^2 Q_1 Q_2$  に依存する ( $Q_i = \omega_0 L_i / R_i$ )。最適負荷下での理想最大率は

$$\eta_{\max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2}.$$

例えば  $k^2 Q_1 Q_2 \approx 0.42^2 \times 200 \times 150 \approx 5290$  とすると  $\eta_{\max} \approx 94.7\%$  が得られ、提案と整合する。これは市販無充電より高率で、配充電にも迫る。最適負荷は概ね  $R_{L,\text{opt}} \approx R_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}$  のスケーリングに合う（受信側損失とのバランス）。なお、最大電力点と最大率点は一般に一致しない。短時間での捕獲エネルギーを最大化するには、高率点近傍で運用する方が有利ことが多い。

## 2.3 50 ms をたす答性

6.78 MHz で 50 ms は約 34 万サイクルに相当し、定常移送には十分な周期数である。立上りは  $\tau \sim \frac{2Q_1 Q_2}{Q_1 + Q_2} \omega_0^{-1}$  によりまり、MHz ·  $Q \sim 10^2$  では  $\mu\text{s}$  オーダ。よって、50 ms の大半を率的な移送に充てられる。電源側は所望のパルス電力を供給できる必要があり、熱ストレス抑制のためデューティ設計や冷却も重要である（例：100 W × 50 ms = 5 J）。アライメント誤差は  $k$  を低下させ率を損ねるため、機械的ガイドや磁吸引などで位置再現性を高める設計が有効である。

## 3 スパッタによる高速吸収

### 3.1 充電ダイナミクスとエネルギー式

短時間パルスで受けたエネルギーは、まずスパッタ（SC）群に取り込まれる。バッテリは化学反応がくスパイク電流に不向きだが、SC は非常に高い出力密度で瞬時充放電

が可能（ただしエネルギー密度は低い）。有効容量  $C_{\text{eff}}(V_c)$  と ESR  $R_{\text{ESR}}$  を用いると、

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{I_{\text{in}} - I_{\text{leak}}(V_c)}{C_{\text{eff}}(V_c)}$$

$$E(V_c) = \int_0^{V_c} C_{\text{eff}}(V) V dV$$

短時間（50 ms）ではリクルートは無視でき、支配的損失は ESR である。瞬時蓄積率は

$$\eta_{\text{stor}}(I) = \frac{V_c I}{V_c I + I^2 R_{\text{ESR}}} = \frac{1}{1 + \frac{I R_{\text{ESR}}}{V_c}}.$$

さて、 $V_c$  が小さい初期に大電流を流すと  $I^2 R$  損失が卓越し非効率となる。低 ESR の素子選択、初期は中電流から開始して  $V_c$  の上昇に合わせて電流を高めるテラップ波形が有利である。

### 3.2 最大捕獲のための最適電流波形

目的は  $T_c$  内に  $E(V_c(T_c))$  を最大化すること。制約は  $0 \leq I(t) \leq I_{\text{max}}$ 、電圧・温度上限など。効率には最適制御（Pontryagin の最小原理等）で解けるが、短時間ではバンバン制御に近い解（初期は抑えめ 中盤で加熱 終盤でタップ）や調ランプが用意である。数値最適化（例：fmincon）でも同様の傾向が得られる。熱はパルスでは大きく上げせず、累積管理で十分である。

## 4 最適放電とバッテリ充電理論

SC に貯えたエネルギーは、分離後にバッテリへ數十分かけて移される（2段階充電：50 ms で SC 充電 30 分でバッテリ充電）。Randles モデル（OCV(SOC)、 $R_{\text{int}}$ 、RC 分枝）を用いると、端子電圧は

$$V_{\text{bat}}(t) = \text{OCV}(\text{SOC}) + I_{\text{bat}}(t) R_{\text{int}} + V_{RC}(t), \quad \tau_{RC} \dot{V}_{RC} + V_{RC} = I_{\text{bat}} R_{RC}.$$

実務的には CC–CV（定電流 定電圧）が最適制御の解と整合し、温度制約に達するまで最大許容電流で充電し、その後は制約（電圧/温度）に沿って電流を絞る。モデル予測制御（MPC）や簡易クランプで実装可能である。

### 5 コードによるフレームワーク

- 電磁結合：幾何・位置ズレ・距離・周波数に基づく  $k$  と効率を FEM (COMSOL, Maxwell) または相互インダクタンス素子の回路モデルで走査。
- SC 充電： $V_c(t)$  の ODE を ESR 損失のみで数値積分し、定電流 vs テラップ電流の効率を比較。最適化で波形を探索。

- ・バッテリ放電: SC 初期電から DC-DC を介して CC-CV 充電を模擬し、SOC 上と温度を評。
- ・システム統合: 相互インダクタ+整流+DC/DC+熱のシミュレーションでエッジケースを評。

## 6 現性と推

- ・高性能部品: 高  $Q$  コイル (リップ等) と低 ESR SC (ミリオム級) で  $\eta_{\text{link}} \sim 95\%$ 、 $\eta_{\text{stor}} \sim 90\%$  を狙う。
- ・安全と規制: 6.78 MHz · 100 W 級でも近接結合とシールドで放射を抑え、近接知・インターロックを装。
- ・アライメント補助: ガイドや磁吸着で再現性を確保。
- ・スケル感: スマホ・ウェアラブル等の中小電力で即応性が高い。EV 等の大容量はパワーや数タップが前提。
- ・段/列構成: 列受電 直列放電などの構成切替で電レベル最適化 (要安全設計)。
- ・適制御: 可マッチング (バラクタ等) や学習で波形・同調を最適化。
- ・多目的最適化: 時間・率・寿命の優先度にじてモード切替 (ブースト/エコ)。

結論として、DORAEMON のタップ & チャージは密な理論・数に照らして現可能である。高周波共振結合で短時間・高率のエネルギー移送が可能で、SC がそれを損失少なく捕獲し、バッテリへ安全に移送できる。次段階として、コドロに基づく小規模プロトタイプの構築が推される。

## 参考文献 (Sources)

- Kurs, A. ほか, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, 317(5834), 83–86 (2007).
- Wang, X. ほか, "Time-varying systems to improve the efficiency of wireless power transfer," *Phys. Rev. Applied*, 21, 054027 (2024).
- Volppack Energy Blog, "Wireless Charging with Supercapacitors –The Future of Fast, Convenient Energy Transfer," 2023 年 3 月 [1] [2] [3]。
- ABB Press Release, "ABB demonstrates flash charging electric bus in 15 seconds," 2013 年 6 月 3 日 new.abb.com。

- Park, S. ほか, “Optimal Control of Battery Fast Charging Based on Pontryagin’s Minimum Principle,” *Proc. IEEE CDC*, 2020 saehong.github.io。