

DORAEMON 「タップ & チャージ」 システム提案の可視化

1 序論とコンセプト概要

DORAEMON (Detached On-demand Rapid Absorption Energy Mechanism for Optimized Networks: 最適化ネットワークのためのオンデマンド分離型高速吸収エネルギーメカニズム) は、50~200 ms 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を移送する無接触「タップ & チャージ」システムを目指す提案である。本質は、エネルギー移送フェーズと使用フェーズを分離することにある。すなわち、高出力の無バラストでオンボードのエネルギー貯蔵(スーパキャパシタによる「エネルギーキャビティ」)を急速に充電し、その後はデバイスのバッテリーへ時間をかけて放電・充電する。無接触的な結合を必要とする従来の無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注入により解放する構想である(例: voltpackenergy.com)。

このアイデアを確かなものにするには、以下を包含する緻密な理論的組みが必要である。

- 短時間パルス中の高効率な電磁結合(短時間接触で高い電力をどう達成するか)
- 中間貯蔵(スーパキャパシタ)の高速吸収ダイナミクス(容量、ESR、リク等の回路物理による限界)
- バッテリーへの最適放電制御(充電速度と寿命の両立)

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で再現・可視化できる形に整理する。

2 瞬時エネルギー移送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値計算が必要だが、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。結合係数は $k = M/\sqrt{L_1 L_2}$ 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 (τ 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 $R_{L,\text{opt}} \approx R_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}$ のスケリングにう（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なことが多い。

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、 $\text{MHz} \cdot Q \sim 10^2$ では μs オダ。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ティ設計や冷却も重要である（例: $100 \text{ W} \times 50 \text{ ms} = 5 \text{ J}$ ）。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である。

3 スパキャパシタ群による高速吸

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、まずスパキャパシタ (SC) 群に取りまれる。バッテリーは化学反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_{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）ではインダクタは無視でき、支配的損失は ESR である。瞬時蓄積率は

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

従って、 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 の素子選定、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ーパー/ラン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。問題には最適制御（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 中盤で増加 終盤でタップ）やテーパーランプが効果的である。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昇せず、累積管理で十分である。

4 最適放電とバッテリー充電理論

SC に貯えたエネルギーは、分離後にバッテリーへ数十分かけて移される（2 段階充電：50 ms で SC 充電 30 分でバッテリー充電）。Randles モデル（OCV(SOC)、 R_{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 コシッドによる FEM フレームワーク

- 電磁結合：幾何・位置ズレ・距離・周波数に依存する 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 損失関みで数値積分し、定電流 vs テーパー電流の効率を比較。最適化で波形を探索。

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

6 実現性と推定

- 高性能部品: 高 Q コイル (リットル等) と低 ESR SC (ミリオーム級) 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、近接感知・インタロックを装備。
- アライメント補助: ガイドや磁吸着で再現性を確保。
- スケール感: 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電数タップが前提。
- 段/列構成: 列受電 直列放電などの構成切替で電圧レベル最適化 (要安全設計)。
- 適応制御: 可変マッチング (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・効率・寿命の優先度に依りてモード切替 (ブースト/エコ)。

結論として、DORAEMON のタップ & チャージは厳密な理論・数値に照らして実現可能である。高周波共振結合で短時間・高効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、コードに基づき小規模プロトタイプ of 構築が推定される。

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).
- Volfpack 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](https://github.com/saehong)。