ANALOG DEVICES

想像を超える可能性を

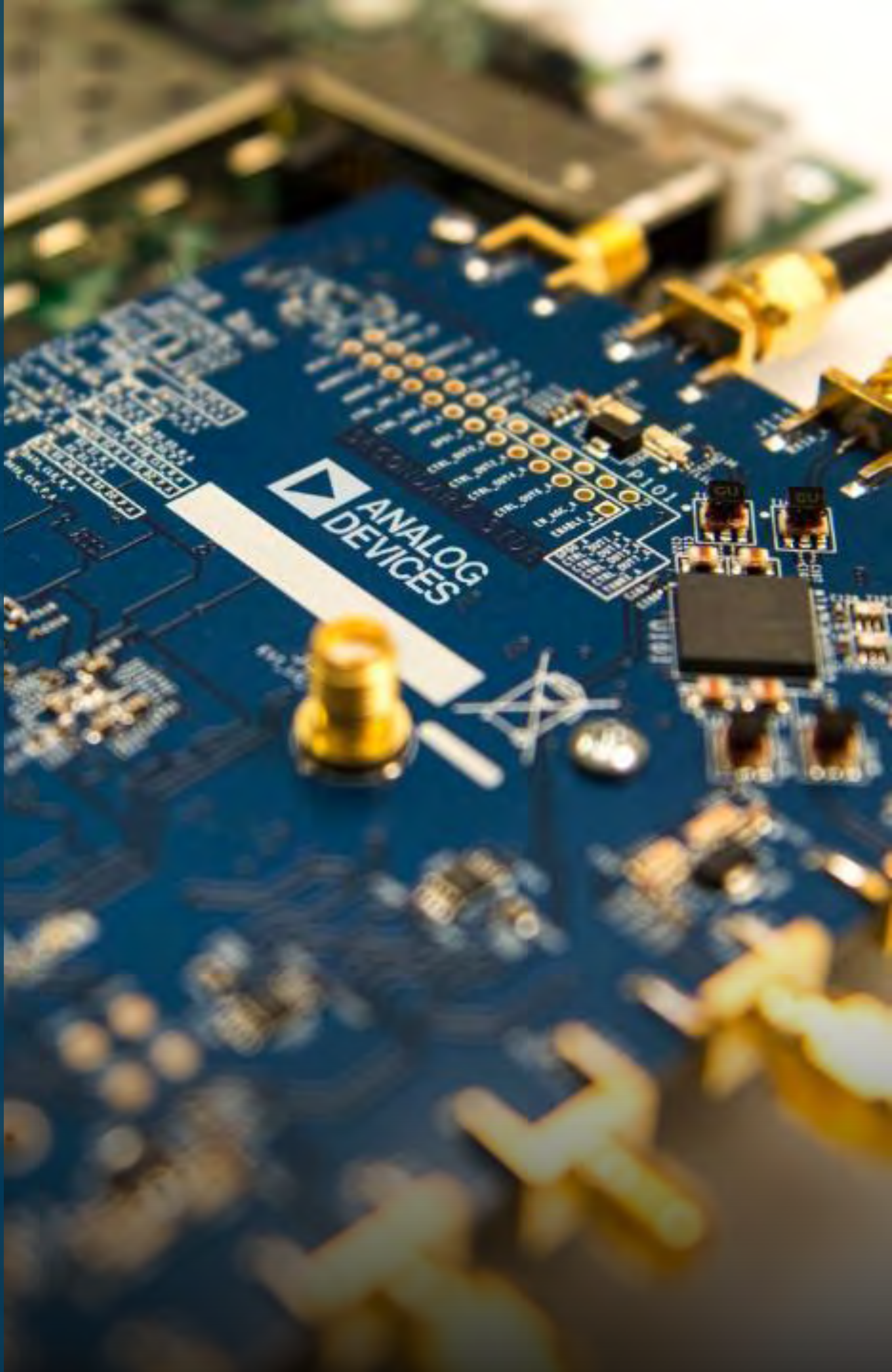
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

IoTセンサーノード用電源 エナジー・ハーベスティング 電源ICの設計入門

アナログ・デバイセズ株式会社

柿沼　淳

Analog Devices Proprietary Information ©



本セミナーの概要と目標

- 概要
  - IoTを活用する社会において重要となる「センサーノード」の電源として、自然エネルギーを活用したエナジー・ハーベスティング技術が注目されています。
  - 本セミナーでは、エナジー・ハーベスティングを使用する機器を設計する際に必要な専用ICを中心に、実際の設計フローに沿った形で、設計に必要となるポイントをご紹介させていただきます。

- 目標
  - エナジー・ハーベスティング電源の動作原理のイメージをつかんでいただく
  - 安定したシステムを設計する上で、検討すべきスペックや注意点について、ご理解いただく

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Agenda

- エナジー・ハーベスティングについて
  - エナジー・ハーベスティングとは
  - エナジー・ハーベスティングを使用するメリット・デメリット
  - 発電素子(ハーベスタ)について

- エナジーハーベスティング電源IC - ADP5091の概要
  - なぜ専用の電源ICが必要か
  - ADP5091の概要

- ADP5091の設計
  - ADP5091の設計仕様
  - ソーラーパネルの選定
  - 二次電池の選定
  - 昇圧スイッチングレギュレータの基礎と周辺回路設計

- 測定装置について
  - 測定装置の構成
  - ソフトについて

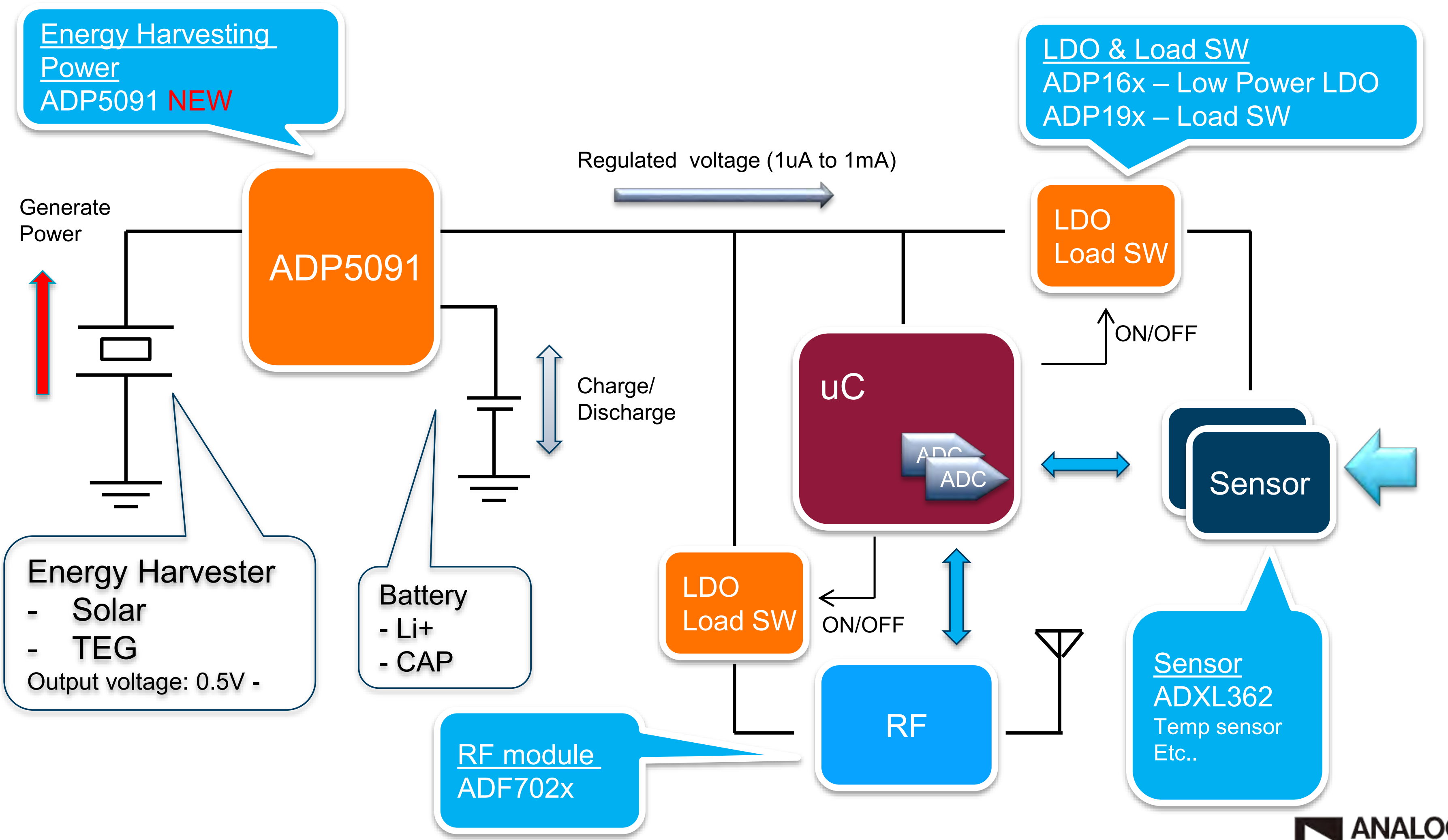
- 実験結果

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

エナジー・ハーベスティング について

Analog Devices Proprietary Information ©

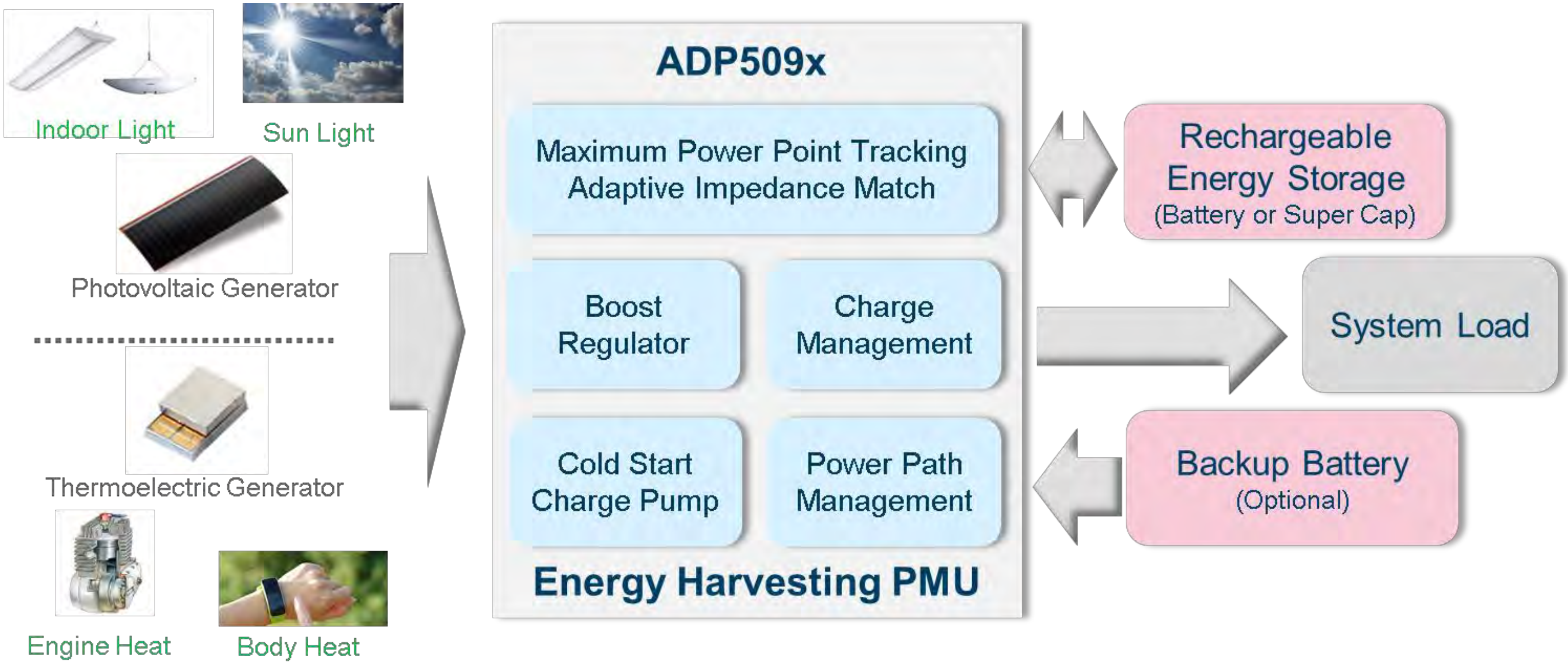
IoTセンサーノードのシグナルチェーン



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

エナジー・ハーベスティングとは



- 微小な自然エネルギー(Energy)を収穫(Harvesting)して電力に変換する技術
  - 環境発電素子を使用して発電した電力を、システムへ電圧を供給することにより、電池の交換や有線での電力伝送のコストを低減します。
  - エナジーハーベスティングには、専用の電源ICを使用することで、最適な電力変換効率を得ることができます。

Analog Devices Proprietary Information ©
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

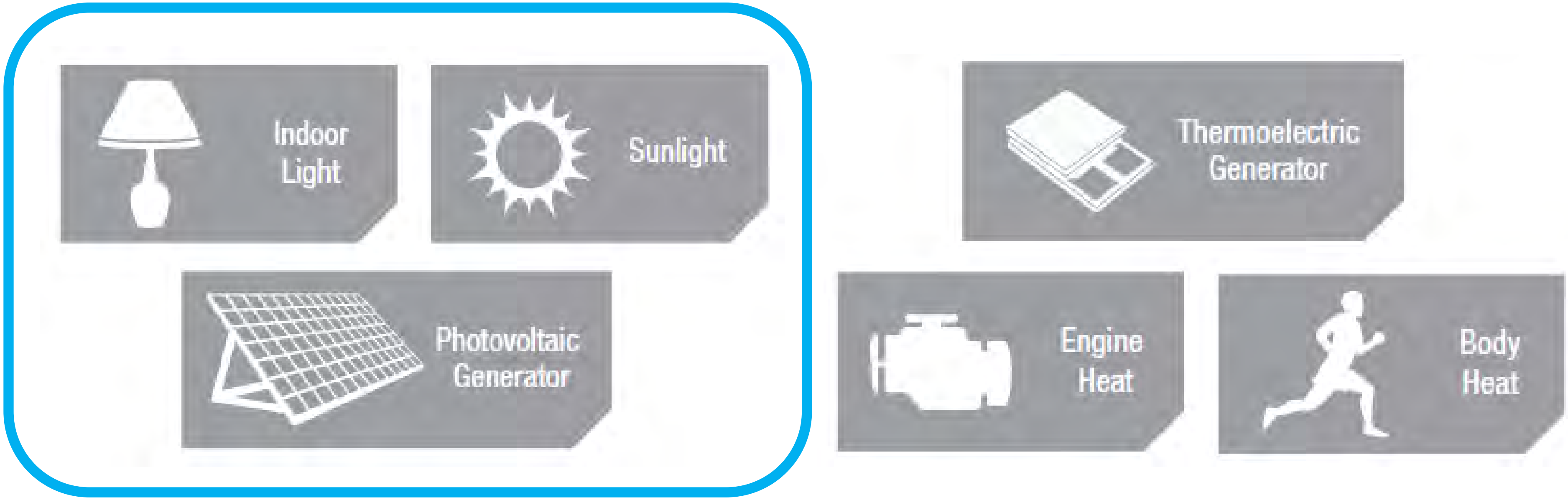
エナジー・ハーベスティングを使用するメリット・デメリット

- **メリット**
  - 有線などで電力を供給しなくて良い
    - 機器を設置する場所に自由度が生じる
  - 電池の交換などが基本不要になる
    - メンテナンスフリー化

- **デメリット**
  - 発電電力が不安定
    - 天候や機器の接地場所で得られる電力が異なる
    - 発電する電力と、負荷で消費する電力を事前に検討する必要がある

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

発電素子(ハーベスタ)について



- 光発電(ソーラー発電)、熱発電(TEG)、振動発電など様々な発電素子があります。
- 本セミナーでは、光発電素子を使った実験をご紹介します。

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

エナジー・ハーベスティング電源IC ADP5091の概要

Analog Devices Proprietary Information ©

なぜ専用の電源ICが求められるのか？

- 発電素子(ハーベスタ)の電力が微小
  - 数uW～数mW程度の発電

➔低消費電力で、効率が良い電源ICが必要

- 無線やセンサーは瞬間的に電力を消費
  - 無線モジュールなどは、瞬間的に数mA～数十mA消費
  - ハーベスタの内部抵抗成分が高い

➔容量の大きいコンデンサが必要 ➔ 二次電池(BAT)コントロール機能が必要

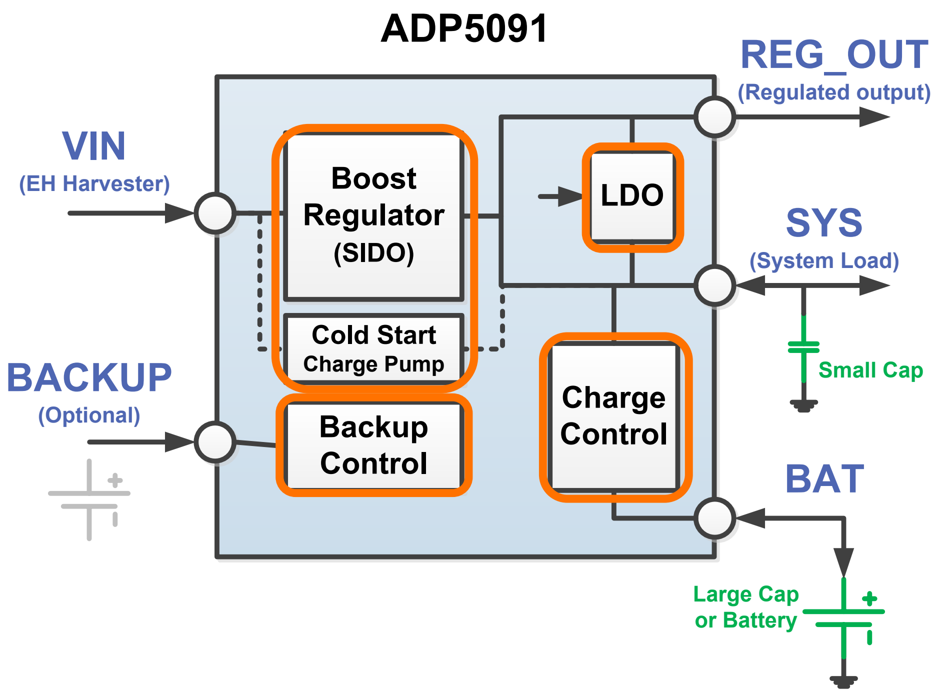
- 発電ができない期間などが存在
  - エナジーハーベスティングでは、安定して発電できないケースがある(夜間など)

➔予備の電池(バックアップ)を使用できる機能が必要

エナジーハーベスティングに特化した専用ICが必要

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

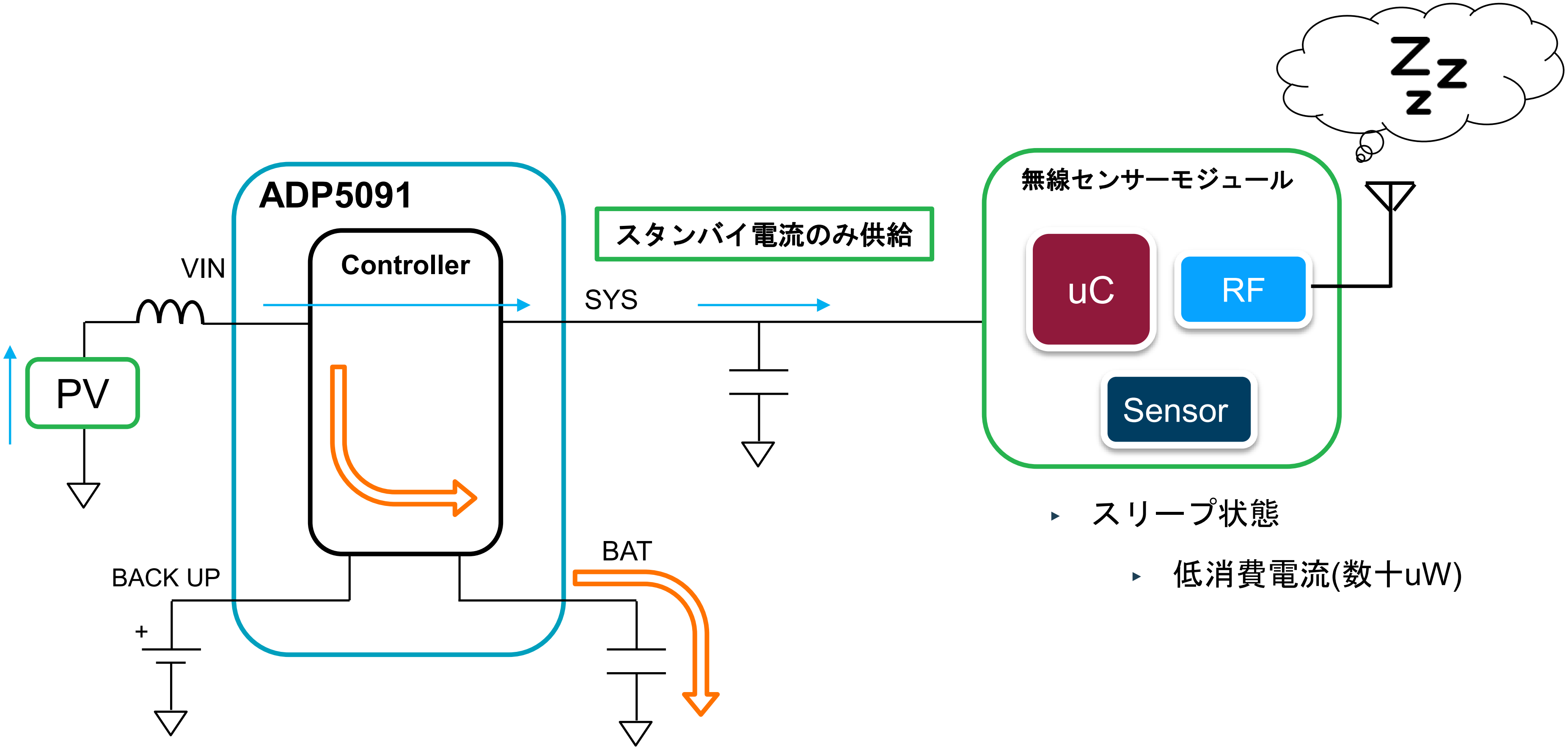
ADP5091に含まれる機能



- 昇圧コントローラー
  - VIN=80mV以上で動作可能
  - ハーベスタの電圧をuCやセンサーを動作させる電圧に変換
- 二次電池コントローラー
  - 負荷に供給する電力を貯めるコンデンサや二次電池の制御
  - 過充電、過放電の設定
- 予備電池制御
- レギュレータ制御
  - 固定電圧(3.3Vなど)出力制御

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の動作について

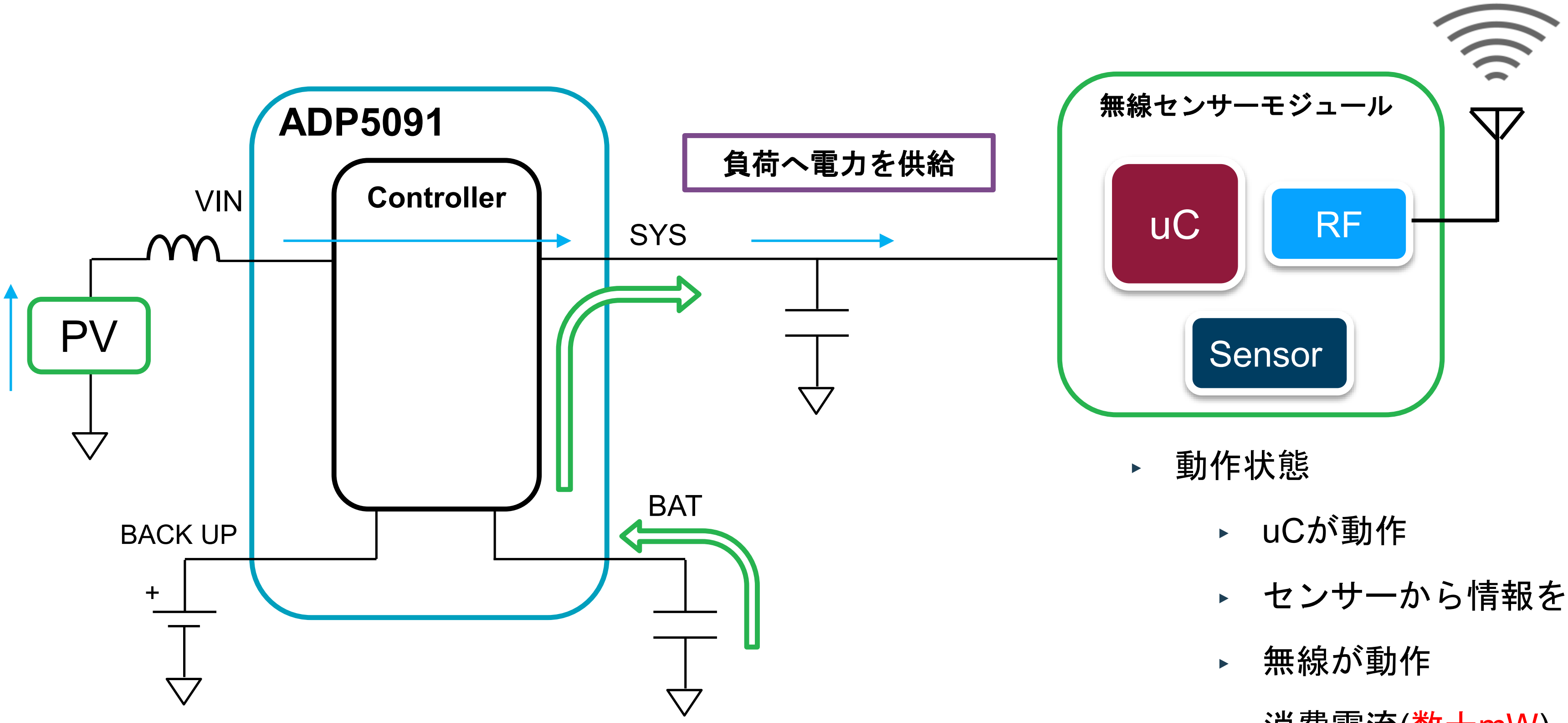


- スリープ状態
  - 低消費電流(数十uW)

- スリープ時は、消費電力が低い為、充電電力>出力電力となり電力をBATのコンデンサ(or電池に)充電

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の動作について

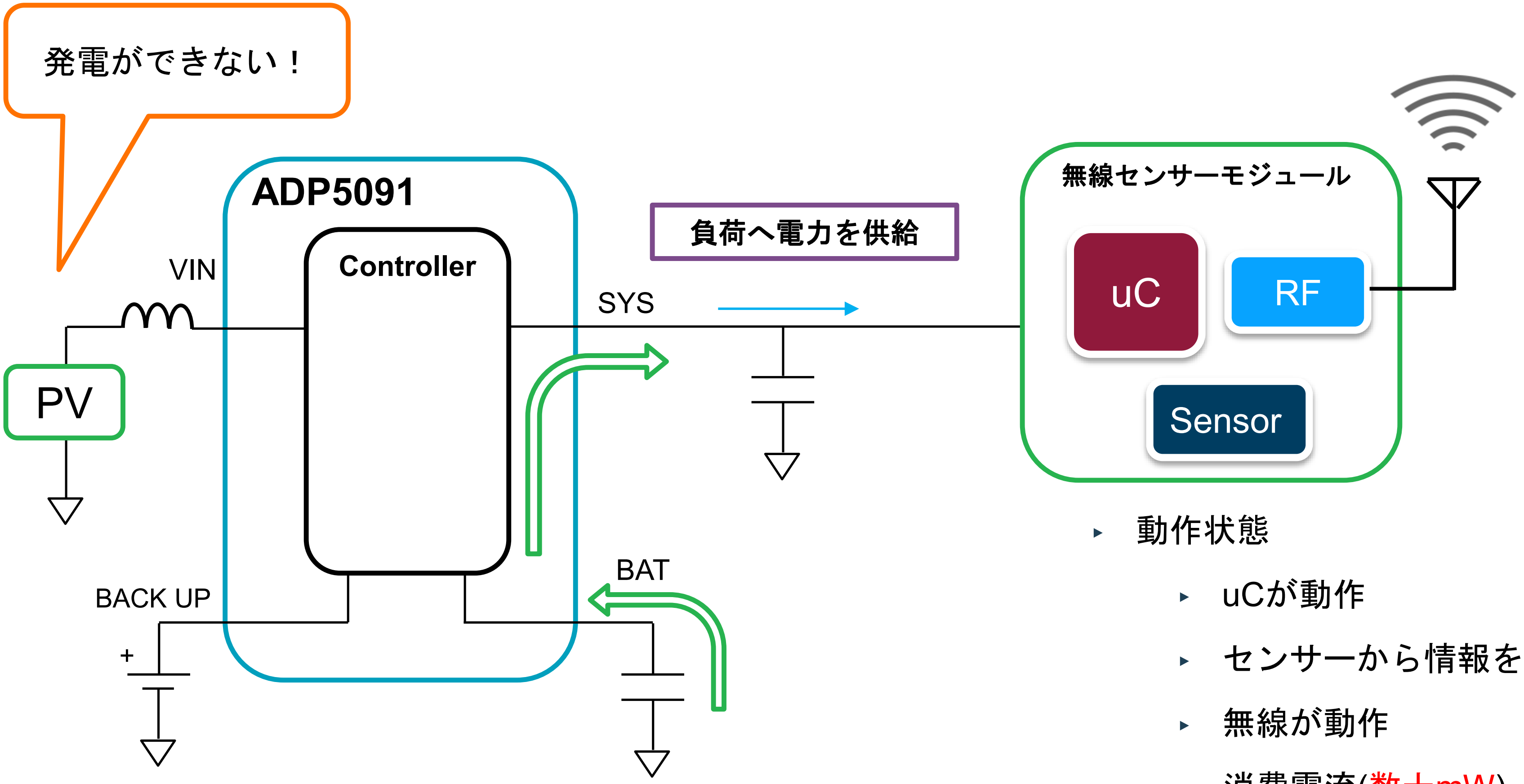


- 動作状態
  - uCが動作
  - センサーから情報を取得
  - 無線が動作
  - 消費電流(数十mW)

- 通常動作時は、充電した電力(BAT)から必要な電力を供給

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の動作について



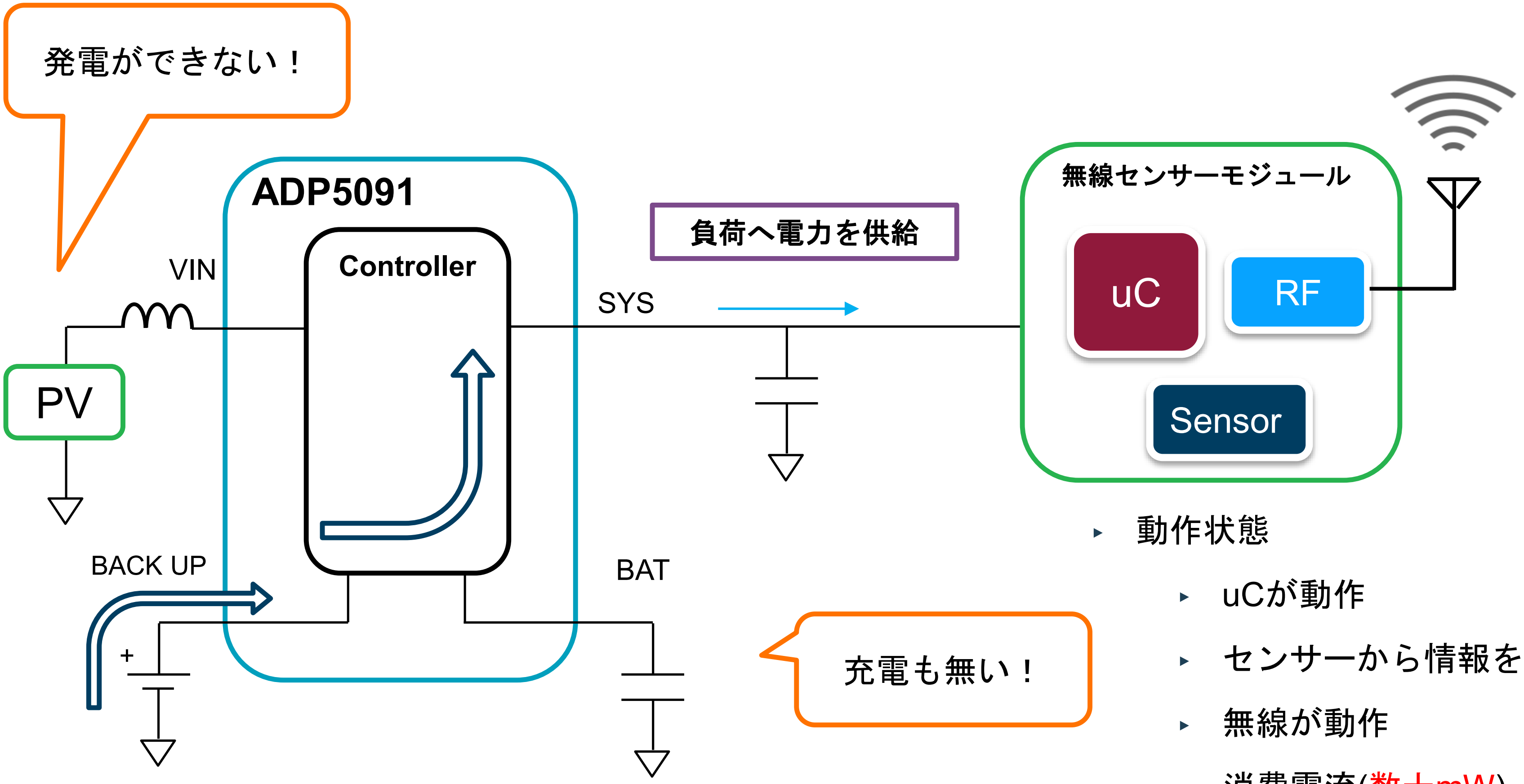
- 動作状態
  - uCが動作
  - センサーから情報を取得
  - 無線が動作
  - 消費電流(数十mW)

- ハーベスタが発電ができていなくても、BATから電源を供給可能

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の動作について



- 動作状態
  - uCが動作
  - センサーから情報を取得
  - 無線が動作
  - 消費電流(数十mW)

- 発電も無く、充電も無くなった場合、Back up(予備電池)を用意することで、負荷に電力を供給することが可能
  - BATには電力供給することはできません。

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091/2 – 超低電力エナジーハーベスティング電源IC

KEY FEATURES

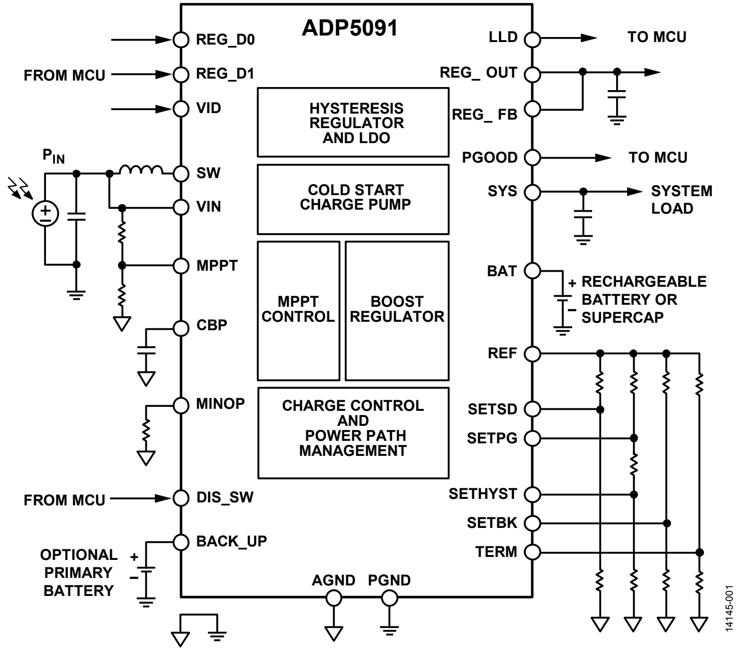
超低消費電力昇圧レギュレータ内蔵

- 低電力ハーベスタに対応したヒステリックコントロール
- 超低消費電流
  - Iq(sys)=510nA (VIN(OCV)>MINI_OP)
  - Iq(sys)=390nA (VIN(OCV)<MINI_OP)
- 高速コールドスタートアップ Vin>380mV
- MPPTを監視するOCV(open circuit voltage)機能
- 低電力時の監視出力機能(MIN_OP)
- 昇圧スイッチングコントロール機能(DIS_SW)

電力ストレージ制御

- ストレージ電圧を可能可能
  - 最大、最低電圧の設定
- バックアップ電池の接続が可能
- ストレージからの出力とLDO出力の2系統をサポート
- 最大150mA出力が可能
- 抵抗1本でLDO出力電圧を設定可能

Functional Diagram

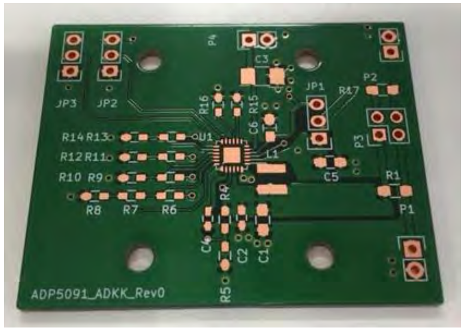


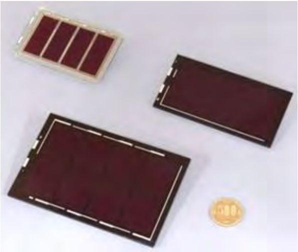
入力電圧範囲	効率(Vin=0.5V; Vout=3V)	出力可変可能	パッケージ	アプリケーション
Minimum 380mV(Vsys<1.8V) 80mV(Vsys>1.8V) **Max- 3.3V**	60% when Iin=10uA >80% when Iin=100uA	外付け抵抗	**24 Pins LFCSP(QFN) (4mm x 4mm)**	エナジーハーベスティング 無線センサモジュール

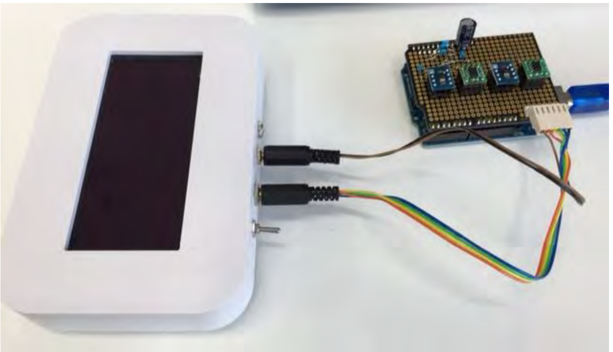
Analog Devices Proprietary Information ©

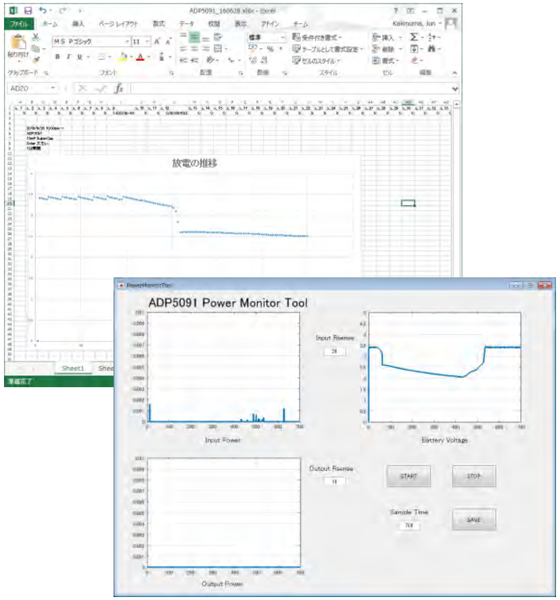
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の設計と計測装置の開発









基板設計開発 → 計測用装置の開発 → 実験・データ解析

- 回路図、基板設計
- 部品選定

- 電力計測部設計

- 自動測定ソフト設計
- 実験結果の検証

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の設計

Analog Devices Proprietary Information ©

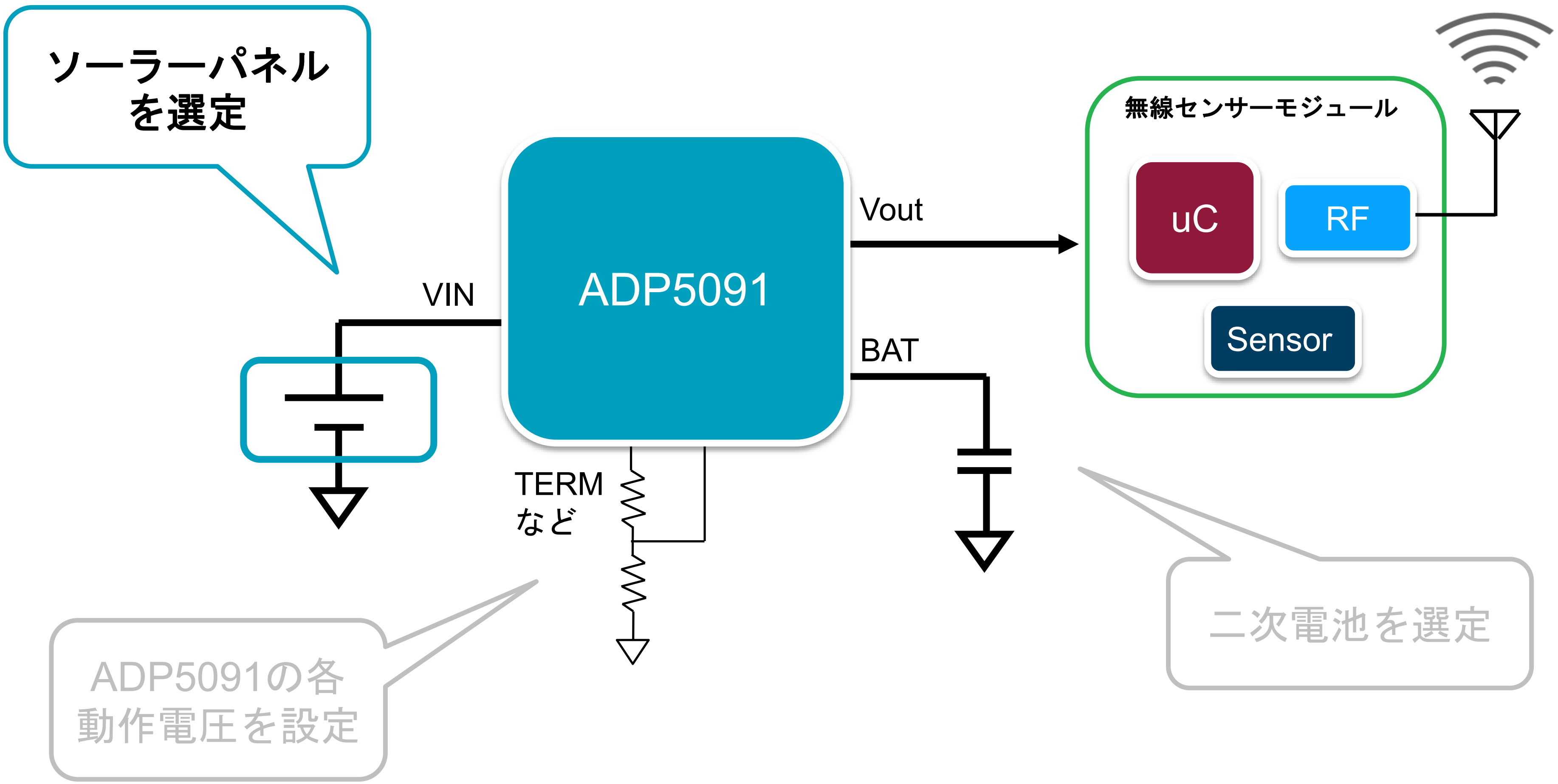
ADP5091の設計仕様

- 小型
  - 持ち運びやデモが可能なサイズ
- 室内での発電が可能
  - オフィスなどでデモや実験が容易
- 無線モジュールを想定して設計
  - IoTセンサーノード負荷を動作

発電 **電圧制御・蓄電** **センサーノード**

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

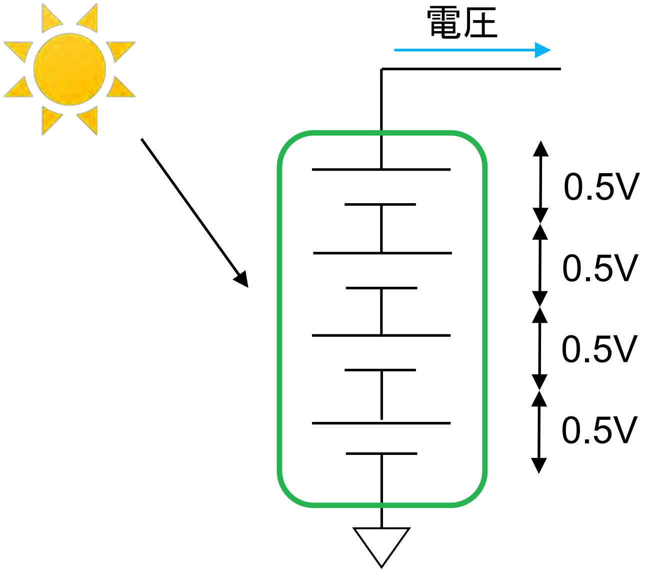
ADP5091の設計



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ソーラーパネルの選定

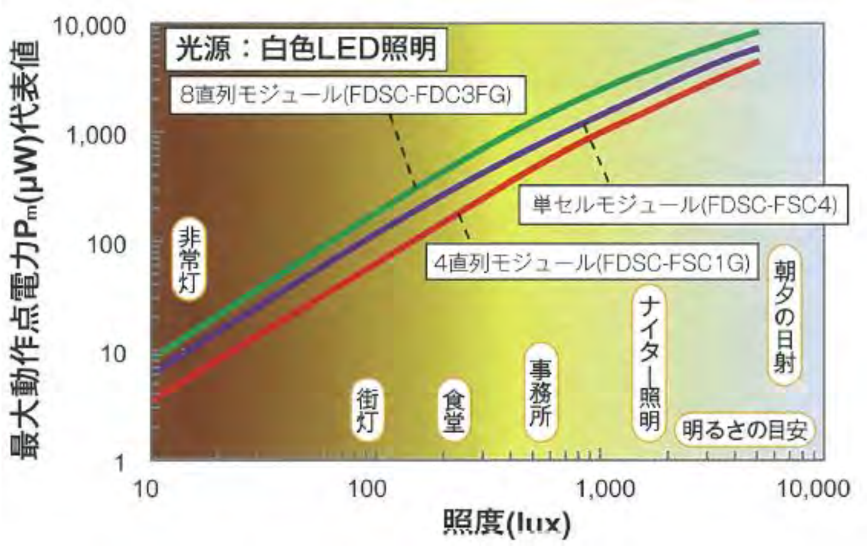


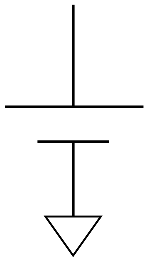
FDSC-FSC4

- 電圧とセルの内部構成
  - 1セルあたり0.5V程度の電圧が出力
- 今回の実験は室内(オフィス)環境を想定し、室内光でも効率の良い太陽光パネルを選定しました。
- 今回は、フジクラ様よりご提供いただいた、色素増感太陽光電池(DSC)を使用しました。

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ソーラーパネルの選定





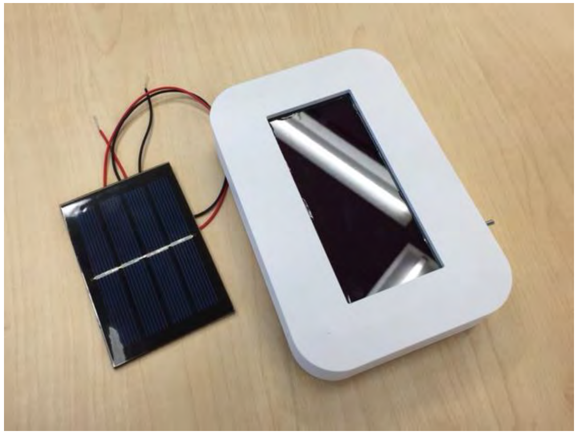
- **FDSC-FSC4**
  - 色素増感型太陽電池
  - 単セル(0.5V)
    - 単セルは、障害物などで"影"が生じても発電電圧を維持
    - 約40cm²
  - 200lux環境下で、255uWの発電
  - 蛍光灯などの環境下でも高効率に発電が可能
  - ADP5091は、単セル(0.5V)に対応する目的で、入力電圧が低い電圧(80mV)まで動作する
  - フジクラ様では、多セルの製品などもラインナップしております。

- 資料: フジクラ様パンフレットより

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

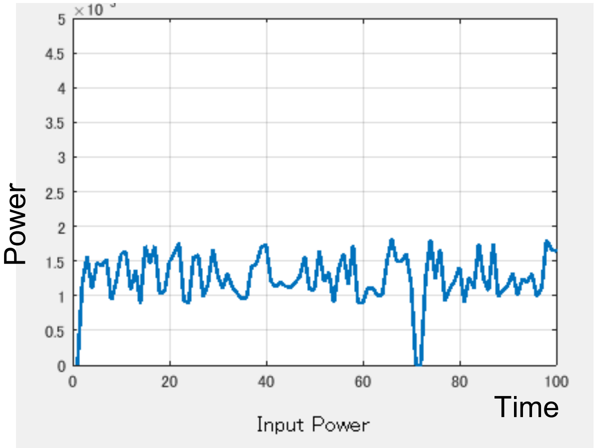
ソーラーパネルの選定

- 発電特性の比較



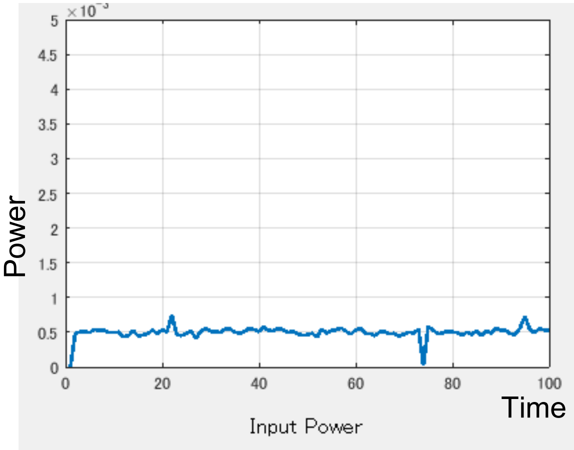
- パネルサイズ(受光部面積)
  - FDSC-FSC4: 38cm2
  - 屋外用パネル: 37.5cm2
- 同じ場所、同じ基板、コンデンサを使用して計測
- 1200lux程度
- 比較対象のパネルは屋外用の太陽光パネル(秋葉原で購入)

FDSC-FSC4



- 約1mW ～ 1.5mWの発電

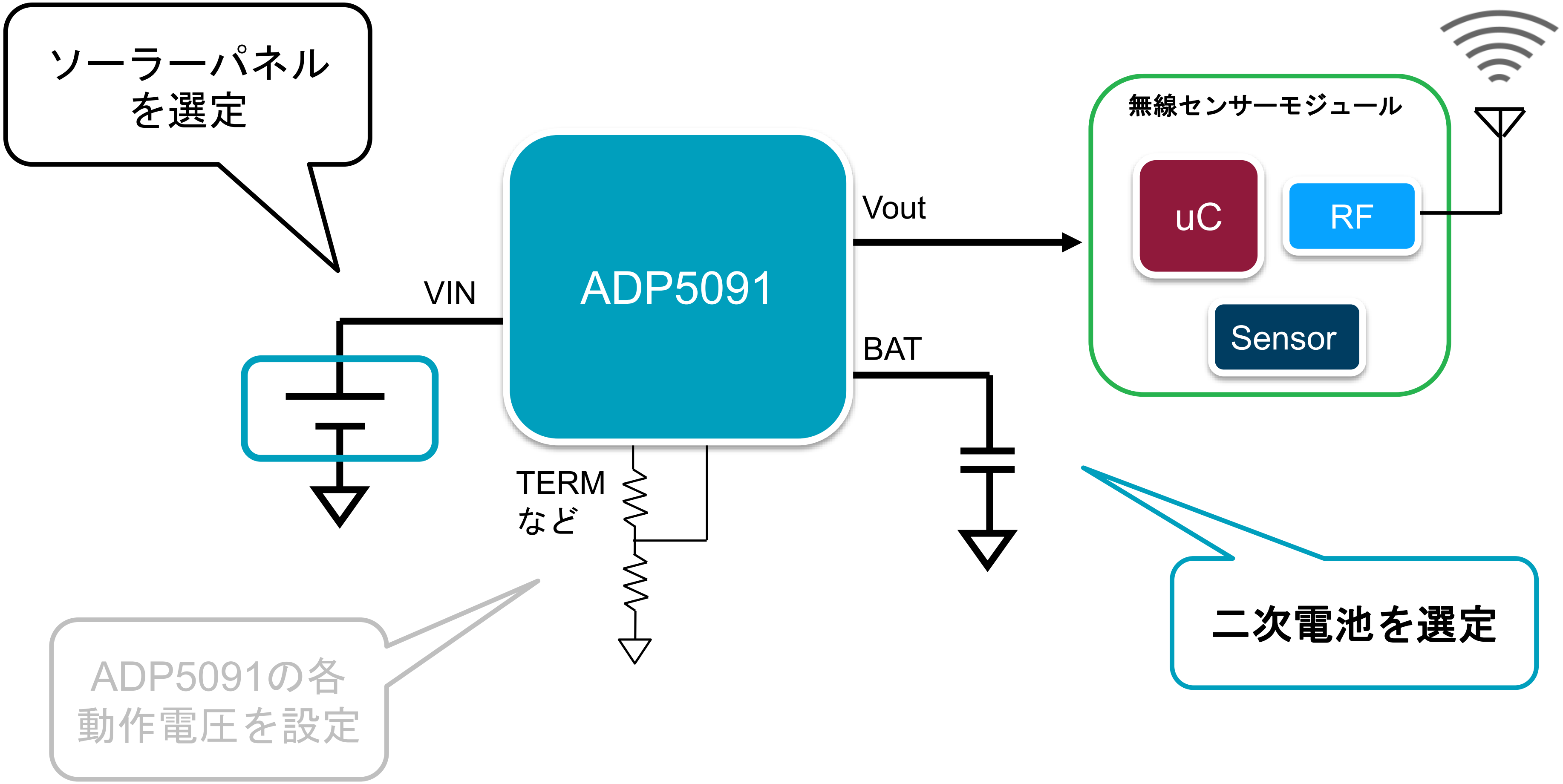
4cell 2Vの太陽光パネル



- 約0.5mW の発電

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の設計



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

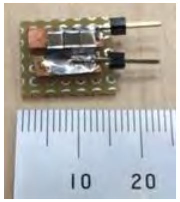
二次電池の選定

- 検討する仕様
  - 容量
    - 容量が少ないと、負荷を動作させるのに十分な電力を引けない場合がある
    - 容量が大きいと、充電に時間がかかる
  - リーク電流
    - 自己放電電流が多いと、充電に時間がかかったり、発電素子が電力を供給できなくなる(夜間など)に電圧が落ちてしまう
  - 内部抵抗値(ESR)
    - RF(無線モジュール)など瞬間的に電流を必要とする場合、負荷電流により電圧降下が発生してしまう
  - その他
    - サイズ　　- 筐体面積と関連
    - 耐圧　　- 出力電圧範囲と関連
    - 温度特性　　- 設置場所(野外、室内、寒冷地など)と関連

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

二次電池の選定

- 今回の実験では、下記の製品を選定
  - セラミックコンデンサ
    - 太陽誘電様よりご提供いただいた、大容量セラミックコンデンサ
    - 6.3V/330uF x 3個並列接続して使用
    - 低ESR、小型(3225サイズ)
  - スーパーキャップ
    - 薄型の大容量コンデンサ
    - 30mF/5.5V
    - 低ESR品
  - リチウムイオンキャパシタ(太陽誘電 : LIC1235R 3R8406)
    - 太陽誘電様よりご提供いただきました
    - 3.8V～2.3Vの範囲で使用(Li+電池と同様に特性に影響あり)
    - 40Fの大容量
    - 低ESR: 150mohm程度
    - 自己放電が小さい
    - 電解コンデンサと同様のパッケージ

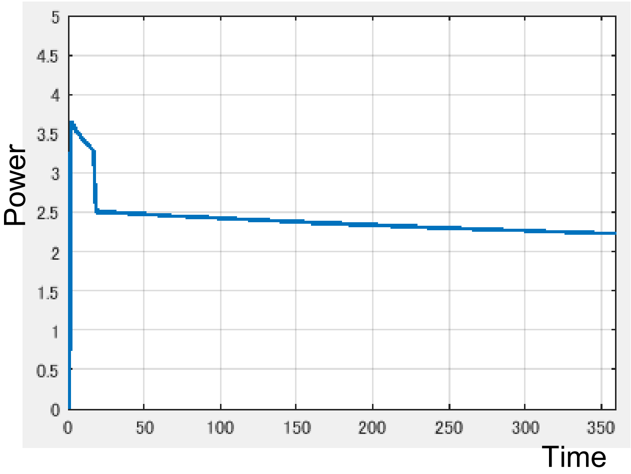


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

2次電池の選定 – 自己放電特性の比較

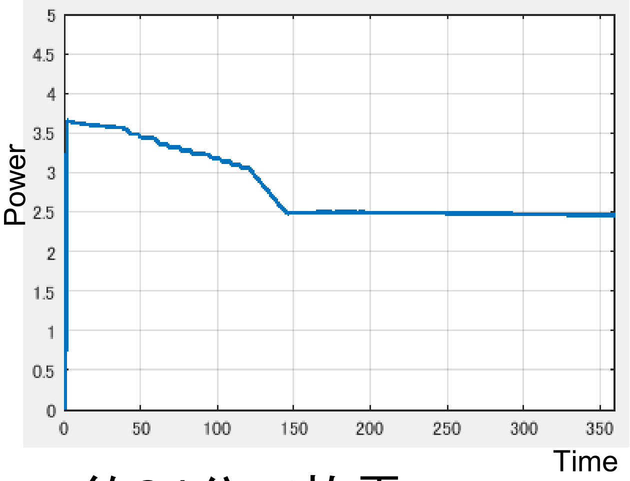
- 測定条件
  - 充電状態からの放電テスト(X軸: Sample回数、Y軸: BAT電圧)
  - 10sごと、360point(1時間)
  - 無負荷(注: OPAMPなどのバイアス電流有り)

Ceramic Cap:330uF x 3



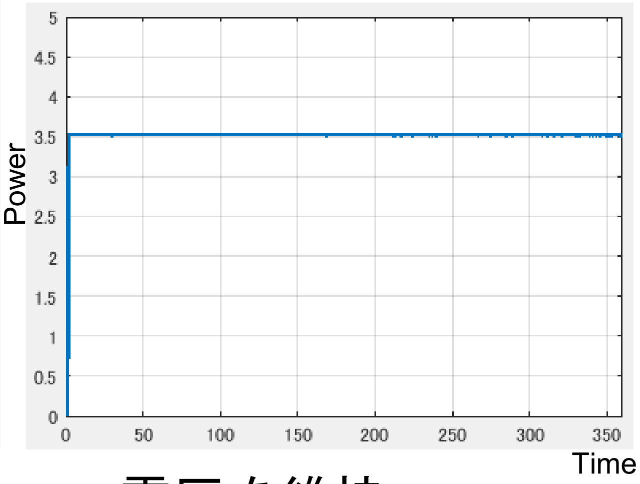
- 約3分で放電

Super Cap:30mF



- 約24分で放電

LIC1235R 3R8406 :40F

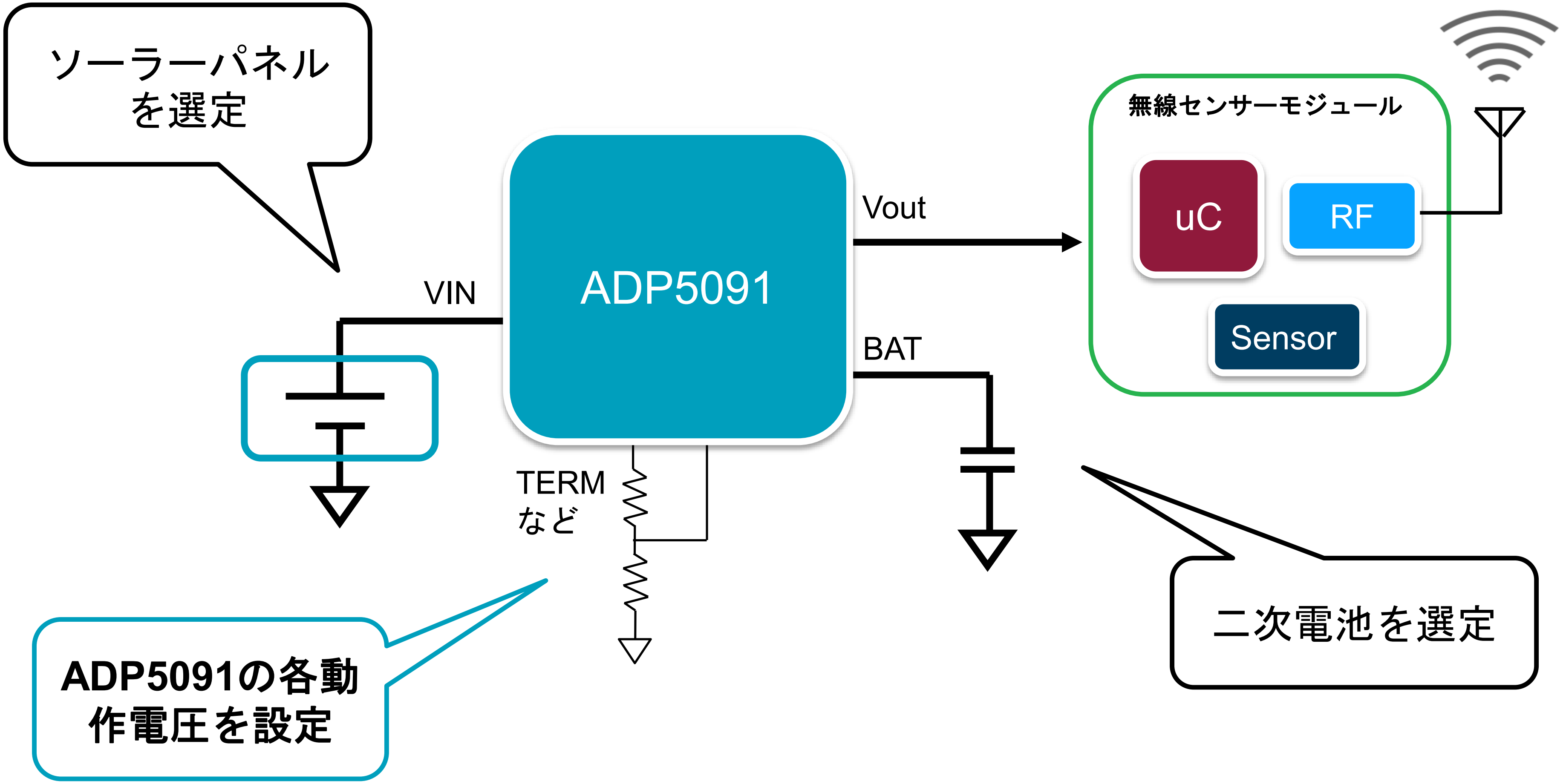


- 電圧を維持
- 開始時電圧: 3.5626V
- 終了時電圧: 3.5603V

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Analog Devices Proprietary Information ©

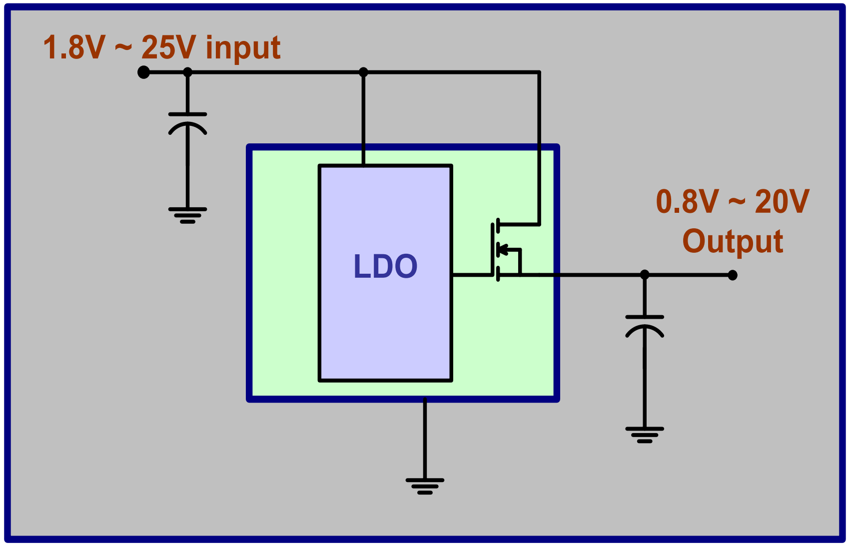
ADP5091の設計

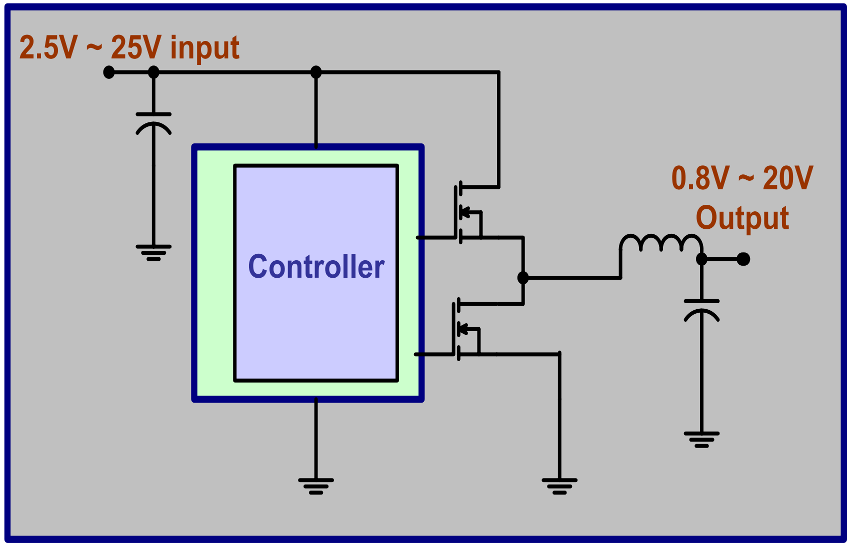


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

リニアレギュレータとスイッチングレギュレータ

- リニアレギュレータ(LDO)
  - 電圧調整をするために、ドロップ電圧を自身で吸収(損失)して出力電圧を調節するタイプの電源
- スイッチングレギュレータ(SW)
  - 電圧調整をするために、トランジスタやMOSFETなどのデバイスをオン、オフ(スイッチング)することで、電圧の安定化を行うタイプの電源

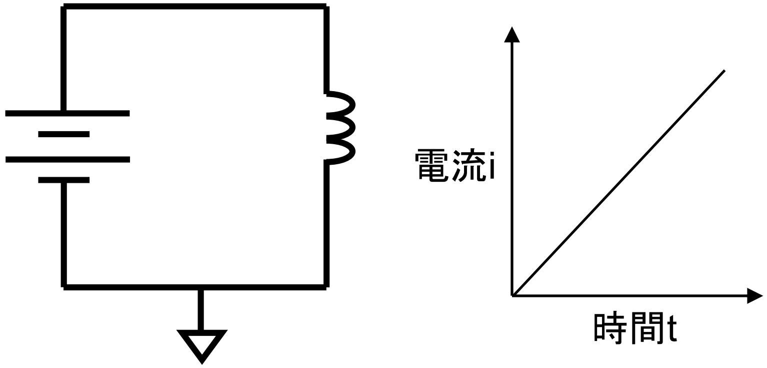




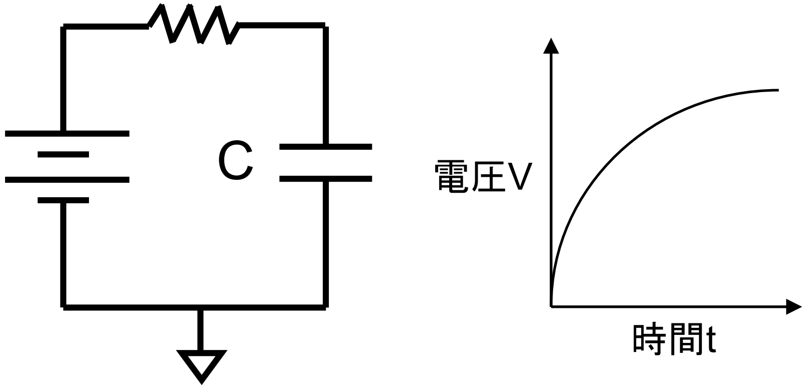
Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

スイッチングレギュレータの基礎 – 受動部品について

- インダクタ
  - 流れる電流によって形成される磁場にエネルギーを蓄えることができる受動素子(ウィキペディアより)
  - インダクタは下記の関係式で表されます。
    - $V = \frac{di}{dt}L$
    - $di = \frac{V}{dt}L$

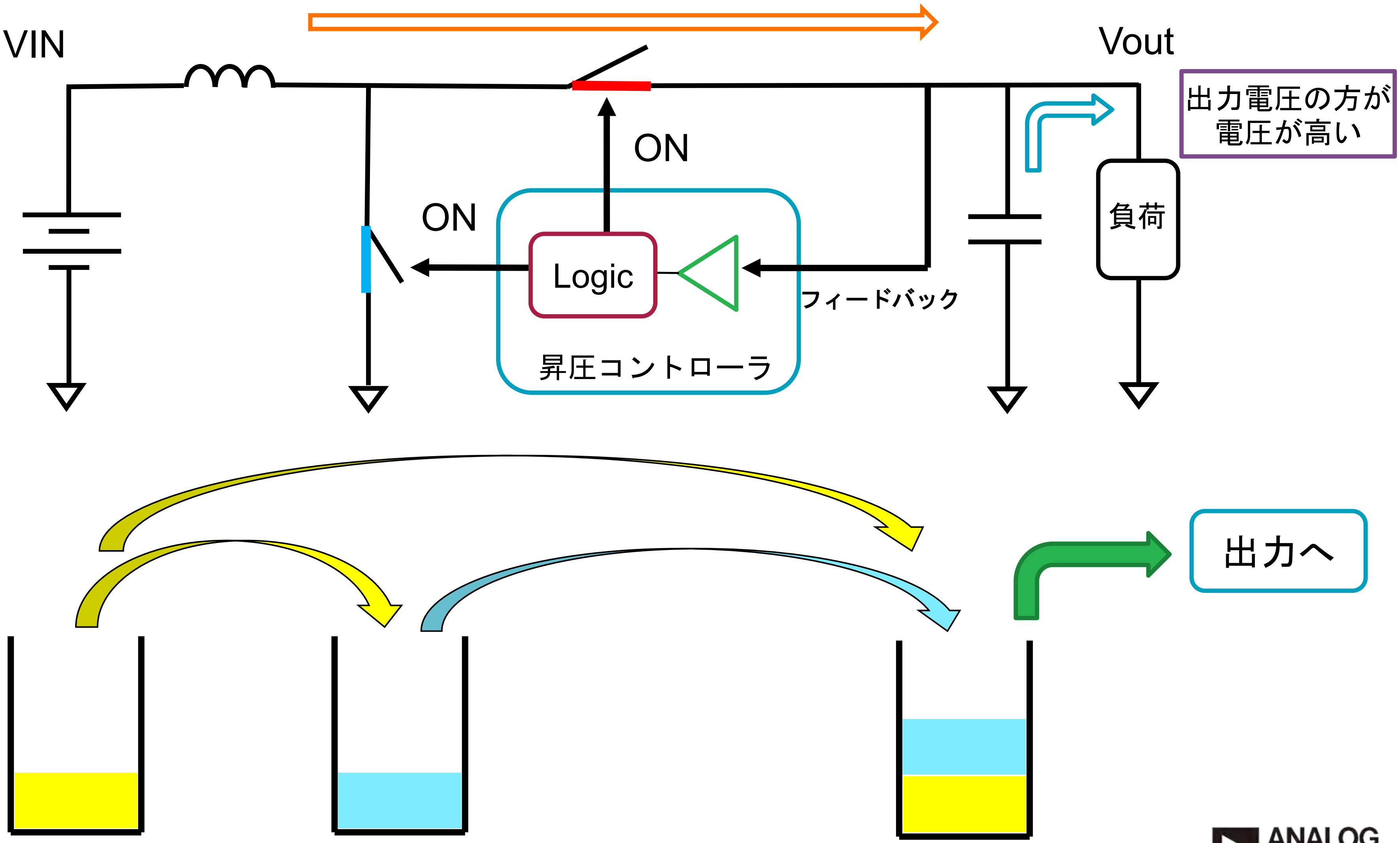


- コンデンサ
  - 静電容量により、電荷を蓄えたり放出したりする受動素子(ウィキペディアより)
  - コンデンサは下記の関係式で表されます。
    - $Q = CV$
    - $I = \frac{dV}{dt}C$
    - $V = Vi(1 - e^{-t/RC})$



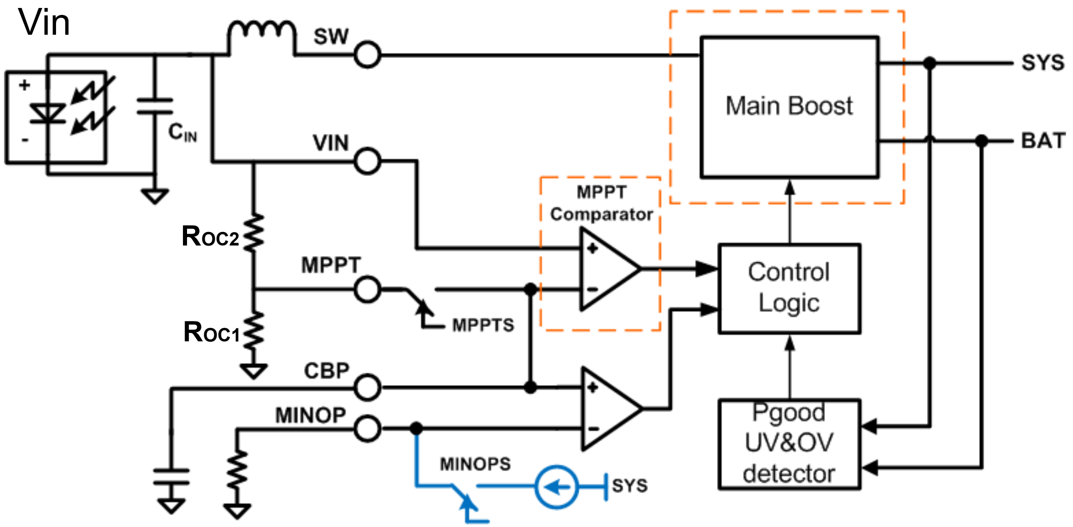
Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

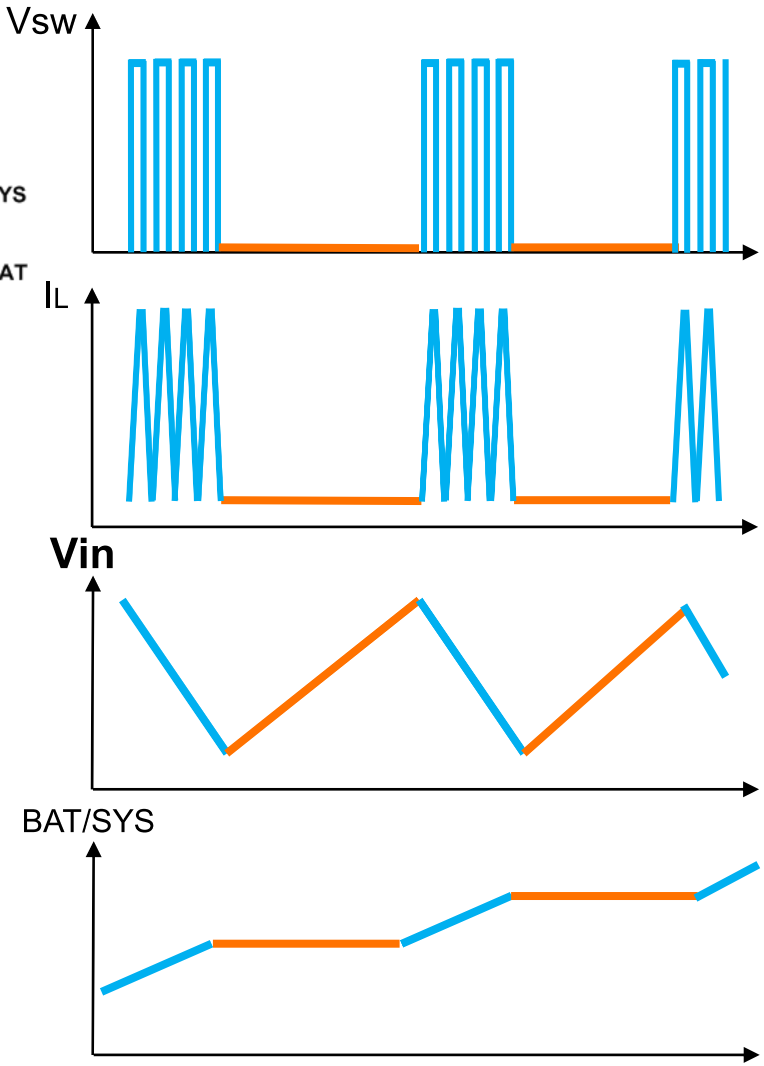
昇圧スイッチングレギュレータのイメージ



Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の昇圧回路の動作 – PFM Mode(DCM mode)





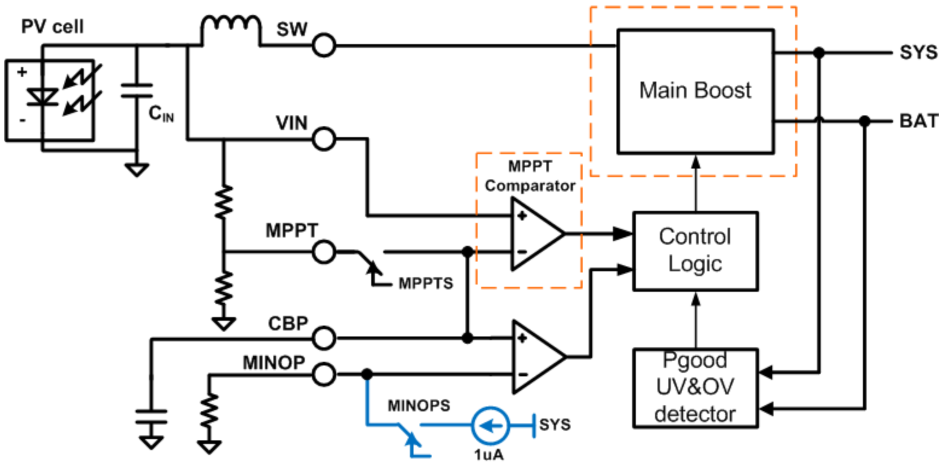
（出力コンデンサ、電池への充電）

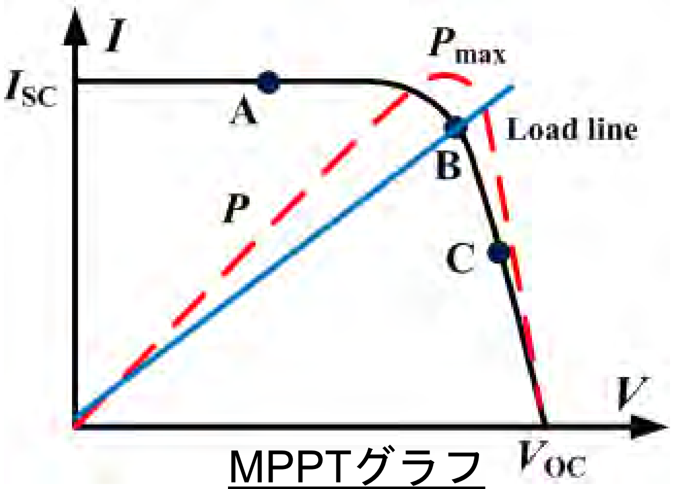
- ADP509xは、一般的な昇圧コントローラのようにに出力電圧をモニターしているのではなく、**入力電圧**をモニターして、スイッチをON/OFFさせ、動作します。

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の昇圧回路の動作 – MPPT





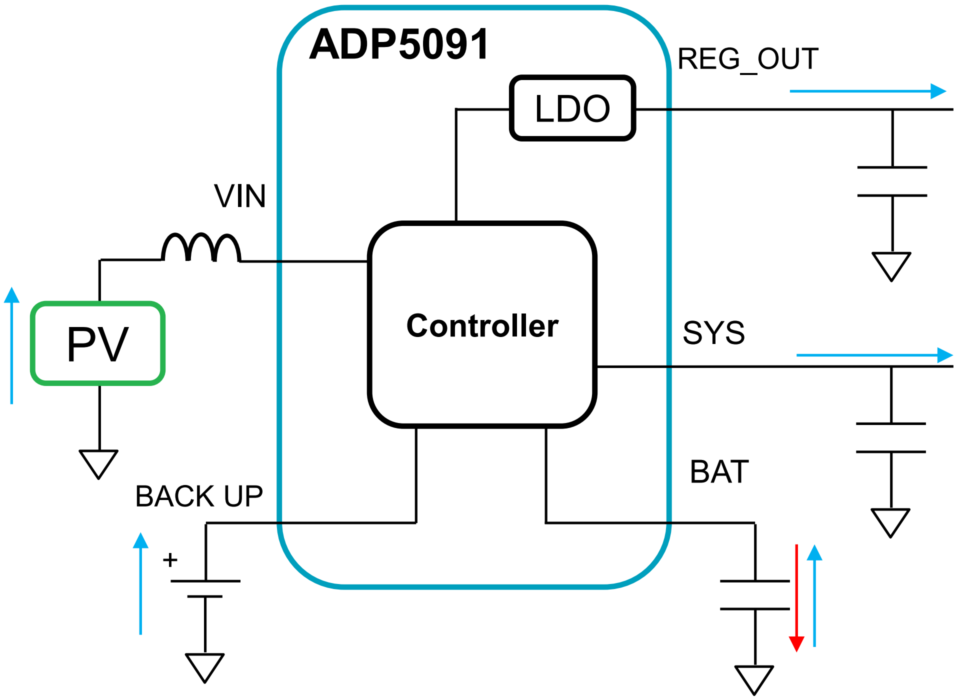
MPPTグラフ

点BがMaximum Power Point

- **MPPT: Maximum Power Point Track**
  - ソーラーパネルなどの発電素子は、環境に応じて電圧(Voc:Open circuit、開放電圧)と最大電流値が変化
  - 発電素子ごとに、電圧(Voc)から得られる最大電力の比率(Vmpp/Voc)があり、その比率を外付けの抵抗で決める(PV:0.8, TEG: 0.5)
  - CBP pinの開放電圧をサンプリングし、サンプリング電圧を基準に、動作をコントロールする

Analog Devices Proprietary Information ©
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の出力端子

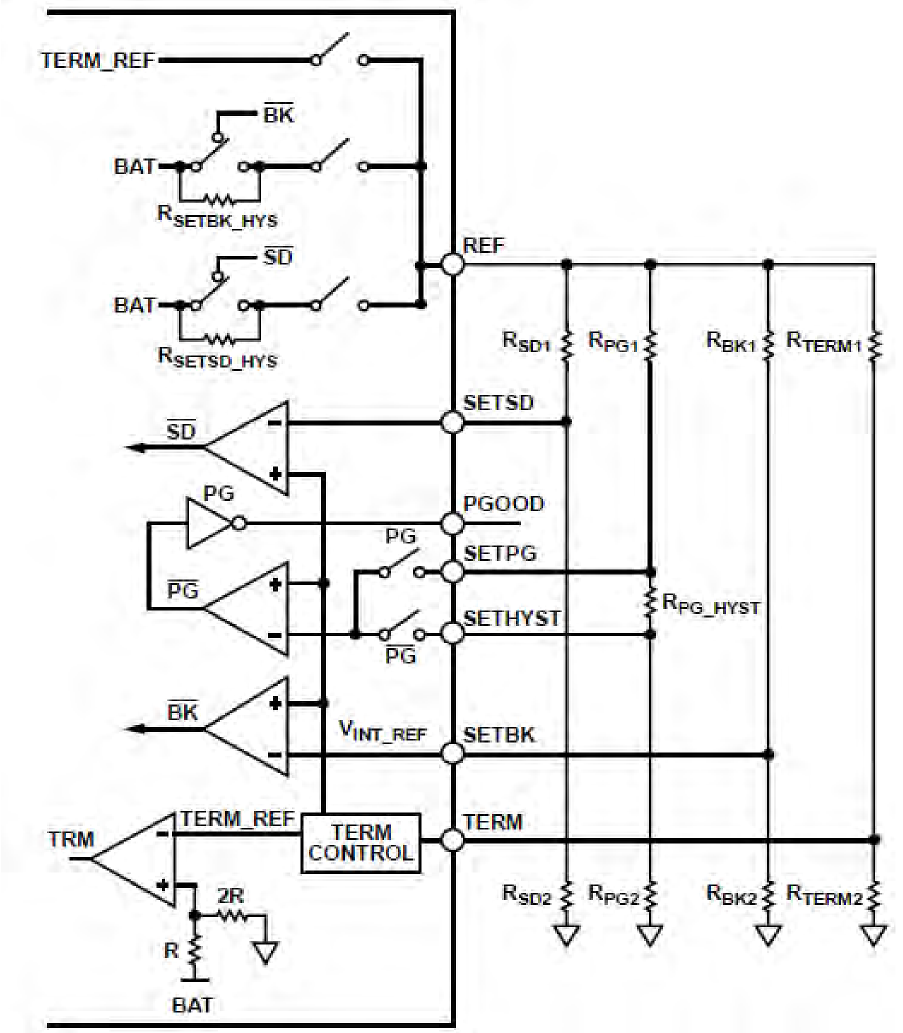


- **2系統の出力**
  - REG_OUT: LDOの出力
    - 可変可能な固定出力電圧
    - ロジック制御によりON/OFF可能
  - SYS: BATの電圧が直接出力
    - BATの充放電状況により電圧が変化
    - ON/OFF制御が不可
- **電池の接続**
  - BAT: 充放電が可能なコンデンサや2次電池などが接続可能
    - コンデンサ、Super Cap, Li+電池など
  - BACK UP: バックアップ用として1次電池が接続可能
    - コイン電池など

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

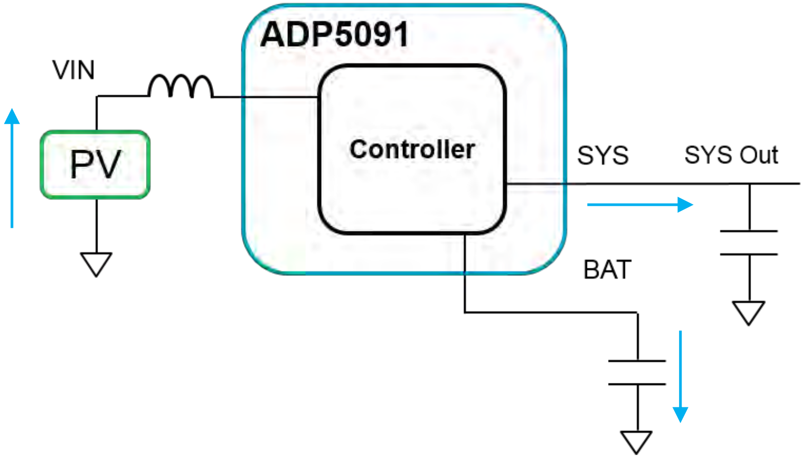
出力電圧、充電電圧の設定

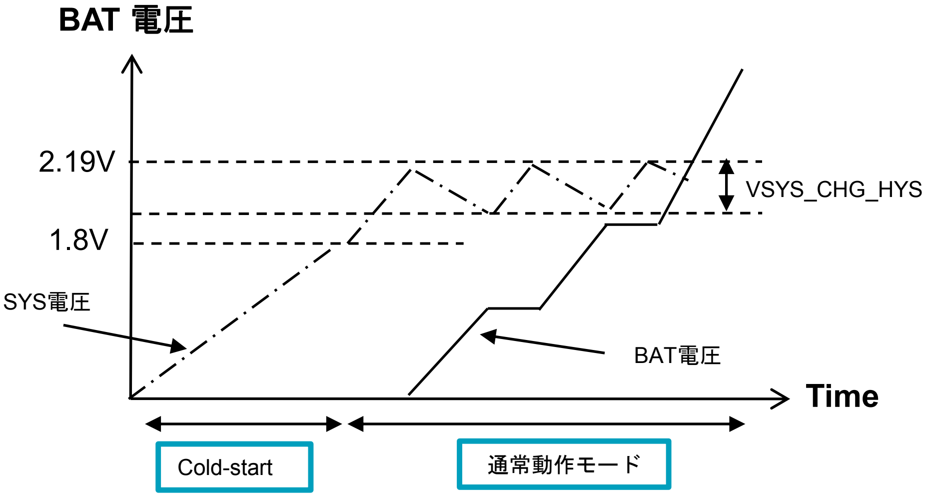


- TERM
  - BAT電圧の最大電圧設定
  - 2次電池の過充電を防ぐ
- SETSD
  - BAT電圧の最低電圧設定
  - 2次電池の過放電を防ぐ
- SETBK
  - BACK UPとBATの切り替え閾値の設定
- SETPG, SETHYST
  - PGOODの出力電圧閾値設定
  - SETHYSTでヒステリシスを決定
- 各電圧のヒステリシスを調整可能
  - ピンによって設定方法が異なるので注意
- 設定には、3Mohm以上の高抵抗を使用(リーク低減)

Analog Devices Proprietary Information ©
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

FAST COLD START(立ち上がりシーケンス)





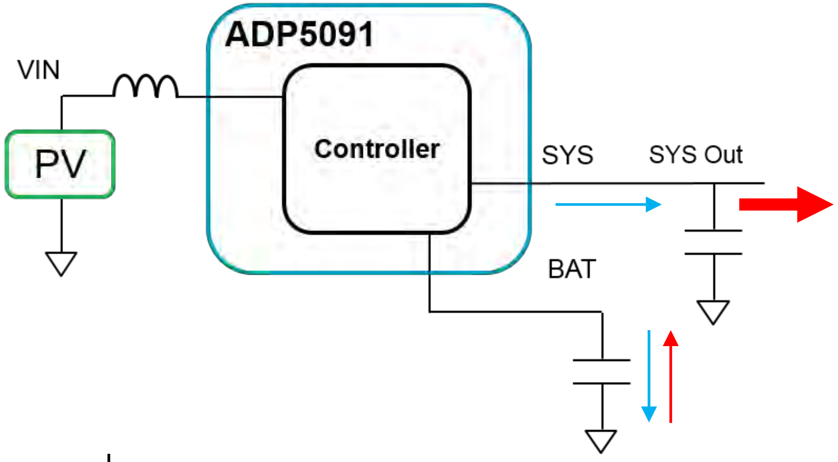
- BATの充電状況による2つのモード
  - COLD-START: SYS電圧(VSYS_TH) <1.8V(Typ)
    - COLD-START時は、VINが380mV(Typ)以上で動作開始
    - 内部のチャージポンプ回路で動作(低効率)
  - 通常動作モード: SYS電圧(V_{SYS_TH})>1.8V
    - VINが80mV(Min)以上で動作開始
    - スイッチング昇圧コントローラが動作(高効率)

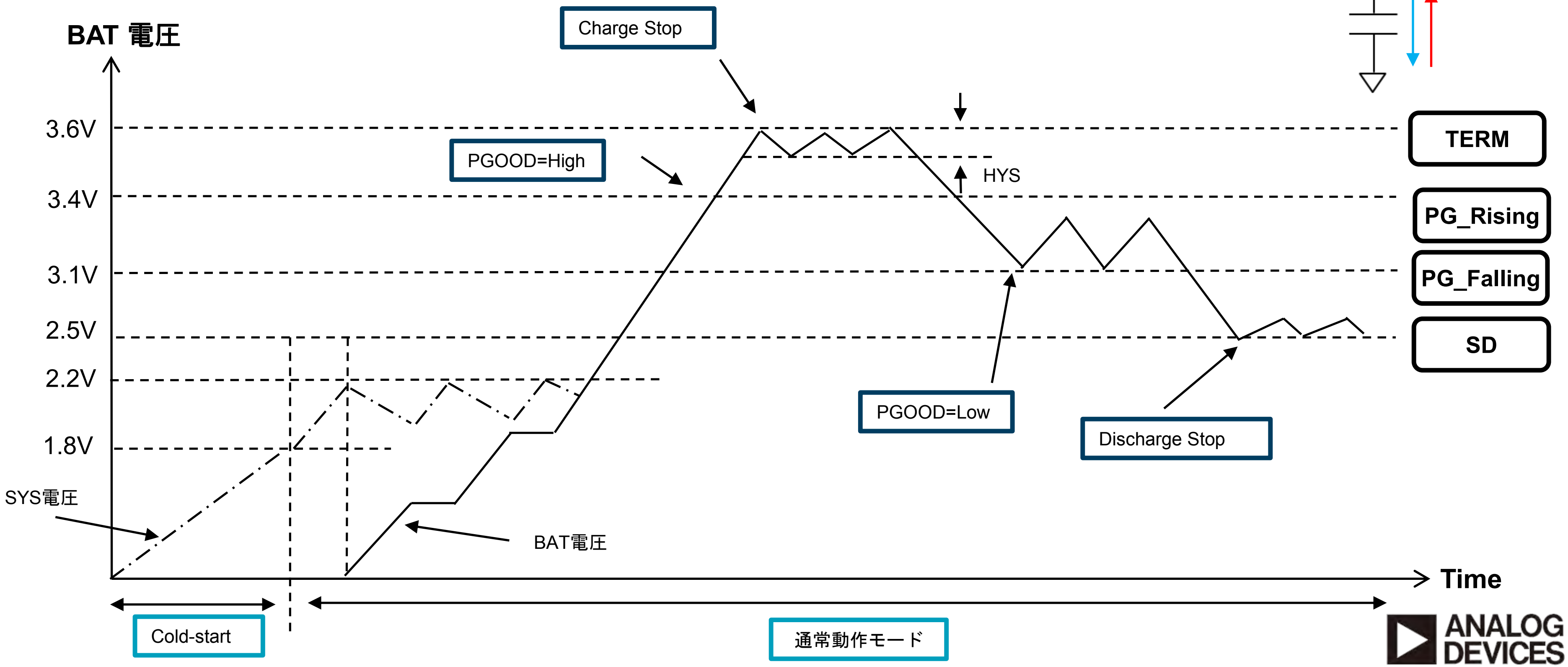
- 立ち上がりシーケンス
  1. VIN>380mVでコールドスタート開始
  2. SYS pinのコンデンサに電圧を充電
  3. Cold-Startより高い電圧V_{SYS_CHG}(2.19Vtyp)まで充電
  4. BAT pinの2次電池へ充電開始
  5. SYS電圧(V_{SYS_TH})を下回らない電圧をキープし通常動作モードを維持
  6. 高効率に充電をキープ

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

出力電圧、充電電圧の設定

- 電圧設定の例
  - TERM電圧 :3.6V
  - SD電圧 :2.5V
  - PG_Rising電圧 :3.4V
  - PG_Falling電圧 :3.1V

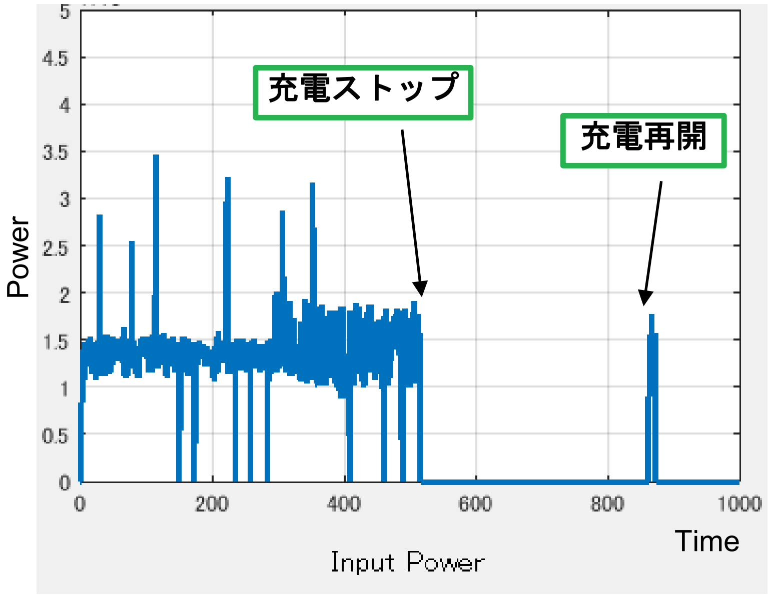


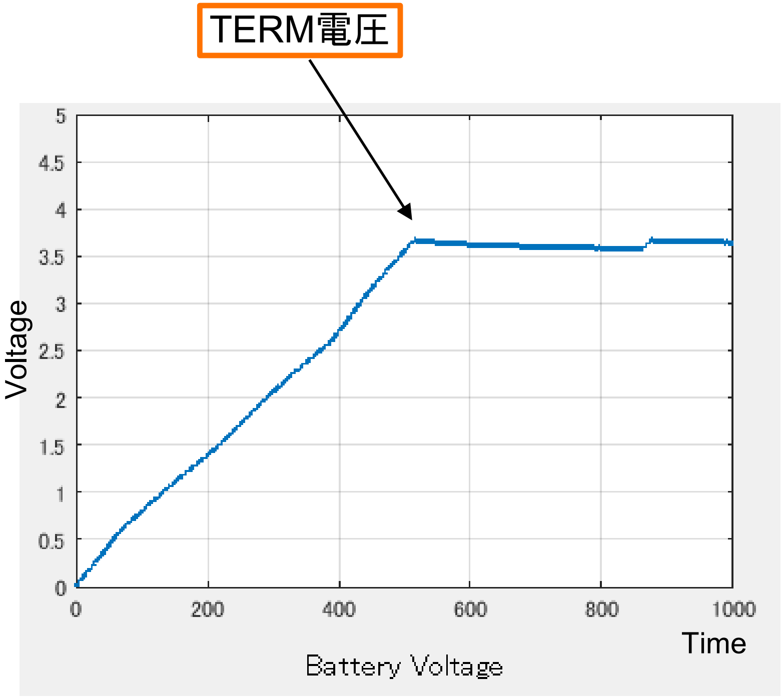


Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

実際の波形 - 立ち上がりテスト(30mF Super Cap)

- テスト条件
  - 30mF Super Capを使用
  - 0.5sごと / 1000point測定
  - 無負荷



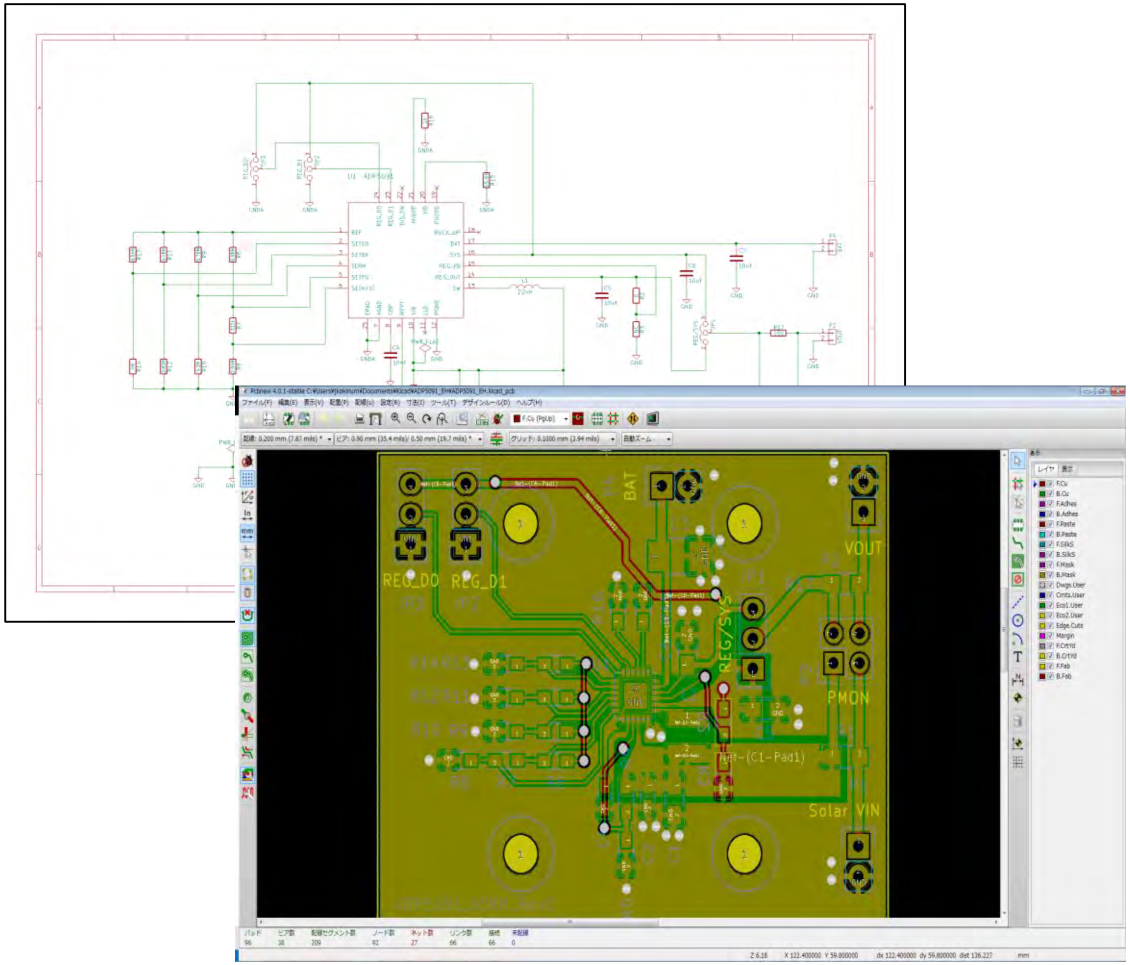


- 約4分程度で満充電(約1200luxの環境下)

Analog Devices Proprietary Information ©

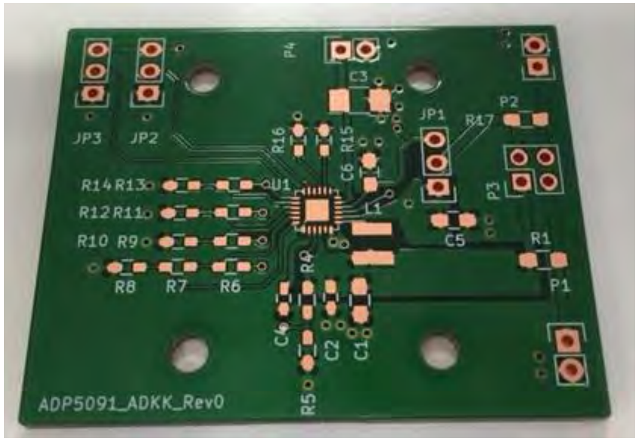
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の設計と基板の製造



KiCADを使用

P板.com様のご協力で製造



作成した小型基板

- 評価ボードを参考に小型化
- 40mm x 50mm

Analog Devices Proprietary Information ©

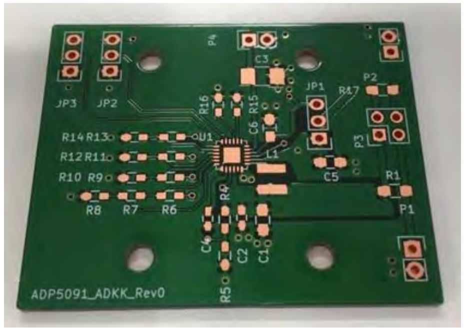
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

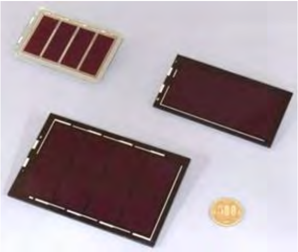
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

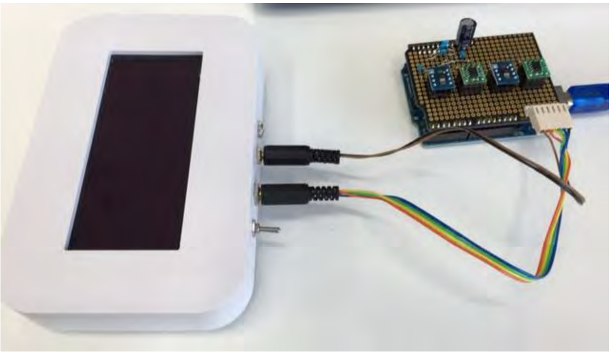
測定装置について

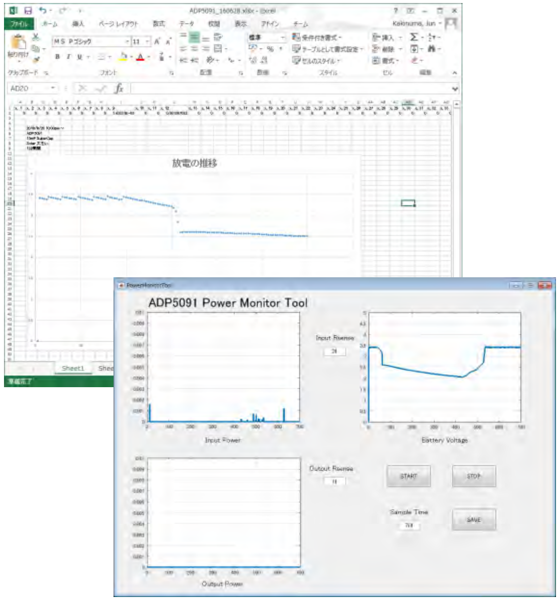
Analog Devices Proprietary Information ©

エナジー・ハーベスティング電源IC - ADP5091









基板設計開発 → **計測用モジュール開発** → **実験・データ解析**

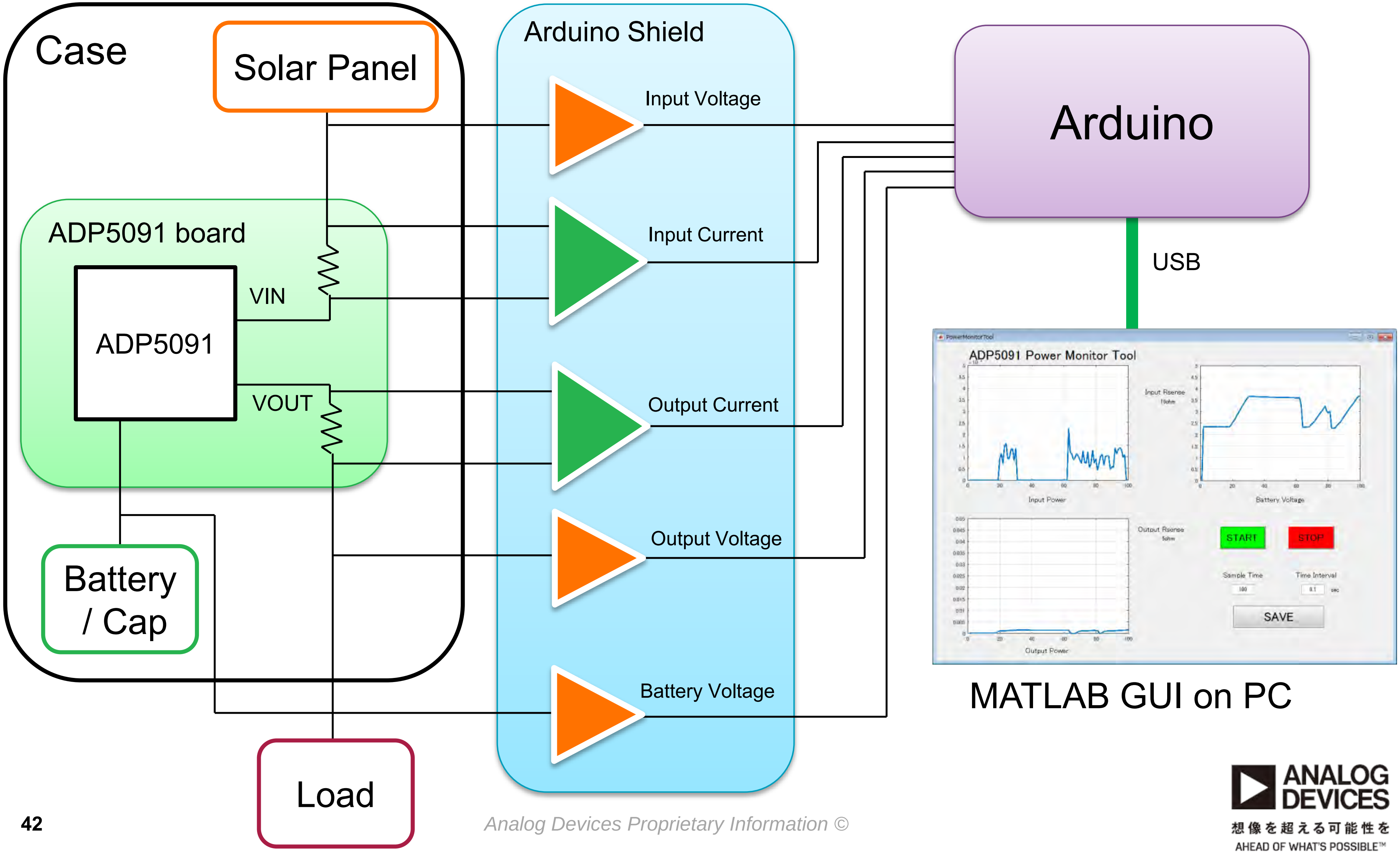
基板設計開発
- 回路図、基板設計
- 部品選定

計測用モジュール開発
- 電力計測部設計

実験・データ解析
- 自動測定ソフト設計
- 実験結果の検証

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

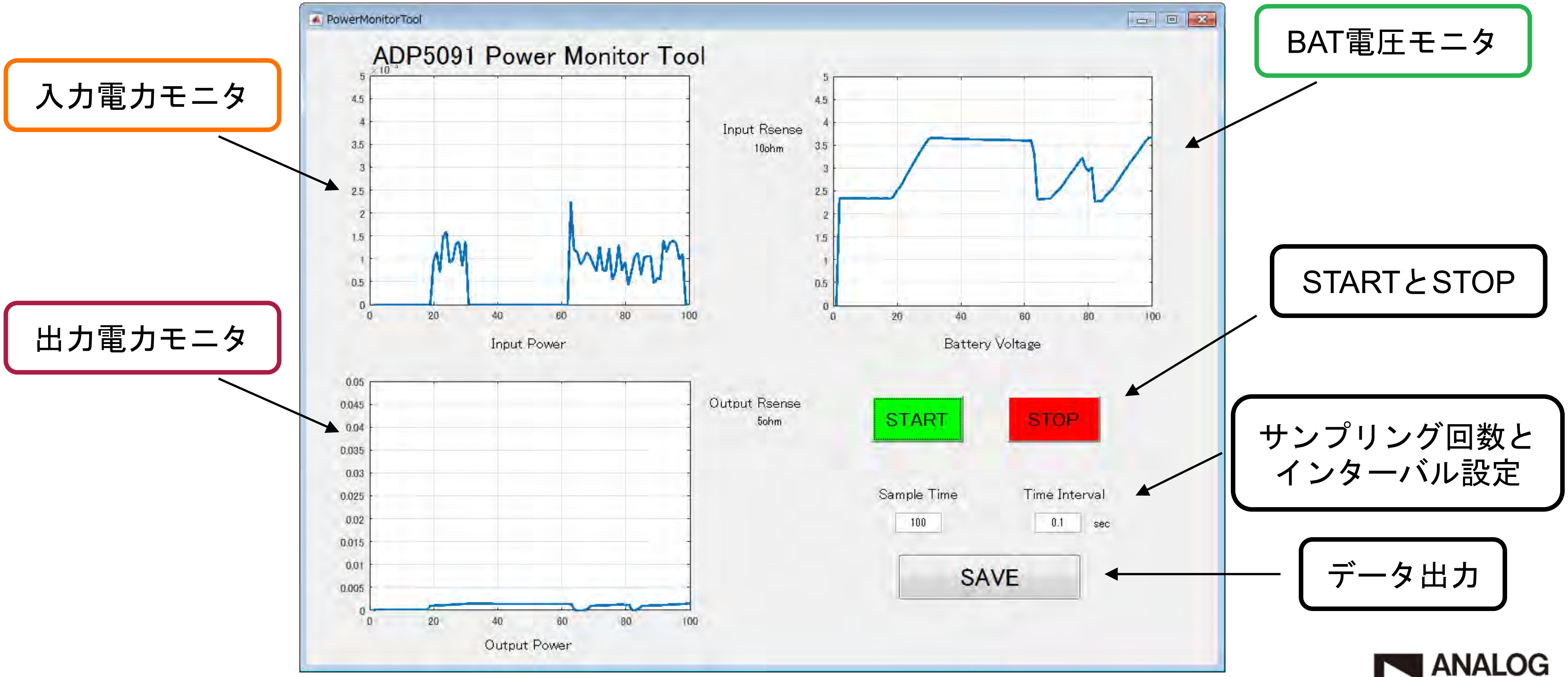
測定装置の構成



Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ソフトについて

- MathWorks社様のMATLABを使用してGUIを設計
  - MATLAB上からArduinoを制御できるパッケージを使用
  - MATLABのGUIDE(GUI作成ツール)を使用して、自動計測ソフトを構築



Analog Devices Proprietary Information ©

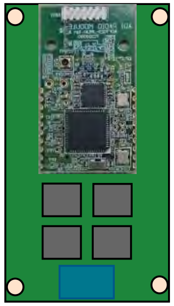
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

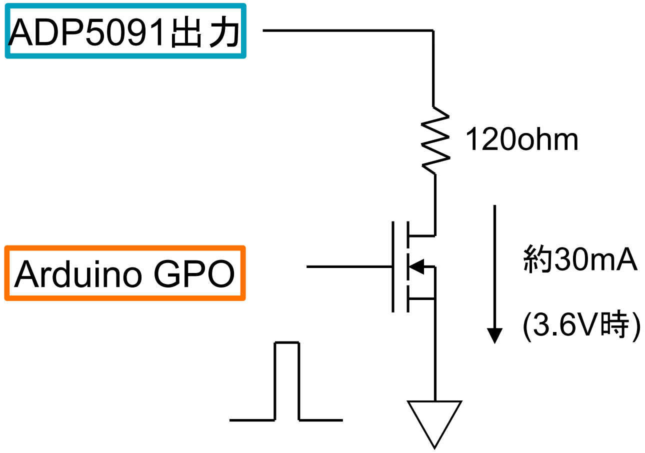
実験結果

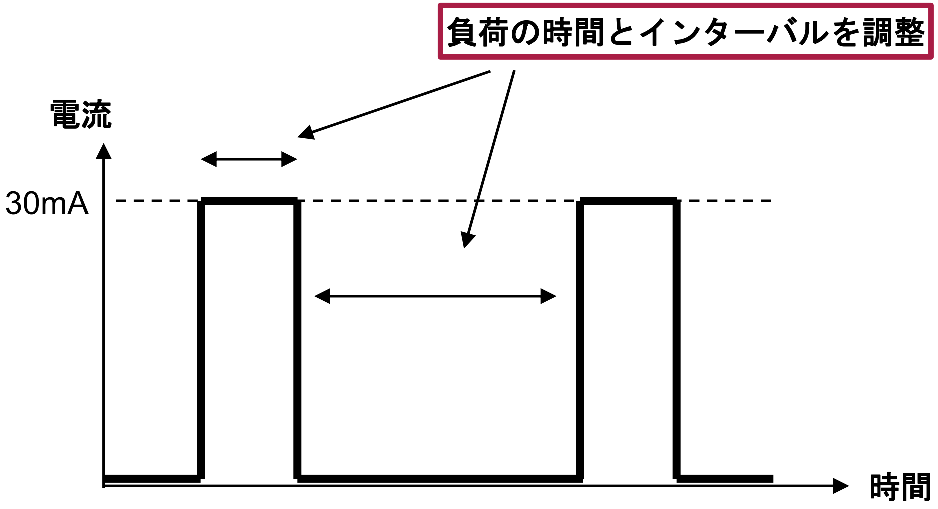
Analog Devices Proprietary Information ©

エナジー・ハーベスティングの実験

- 無線モジュールを含むセンサーノードを想定した負荷を使用
  - ADIの無線製品の仕様に近い30mA peakを基準に実験を行いました
  - 負荷は、Nch MOSFETのGateをArduinoで制御
    - 負荷が流れる時間や、インターバルを変更可能
    - 実験する場所を変えて実験(照度計で明るさも一緒に記録)







Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

セラミックコンデンサ 330uF x 3

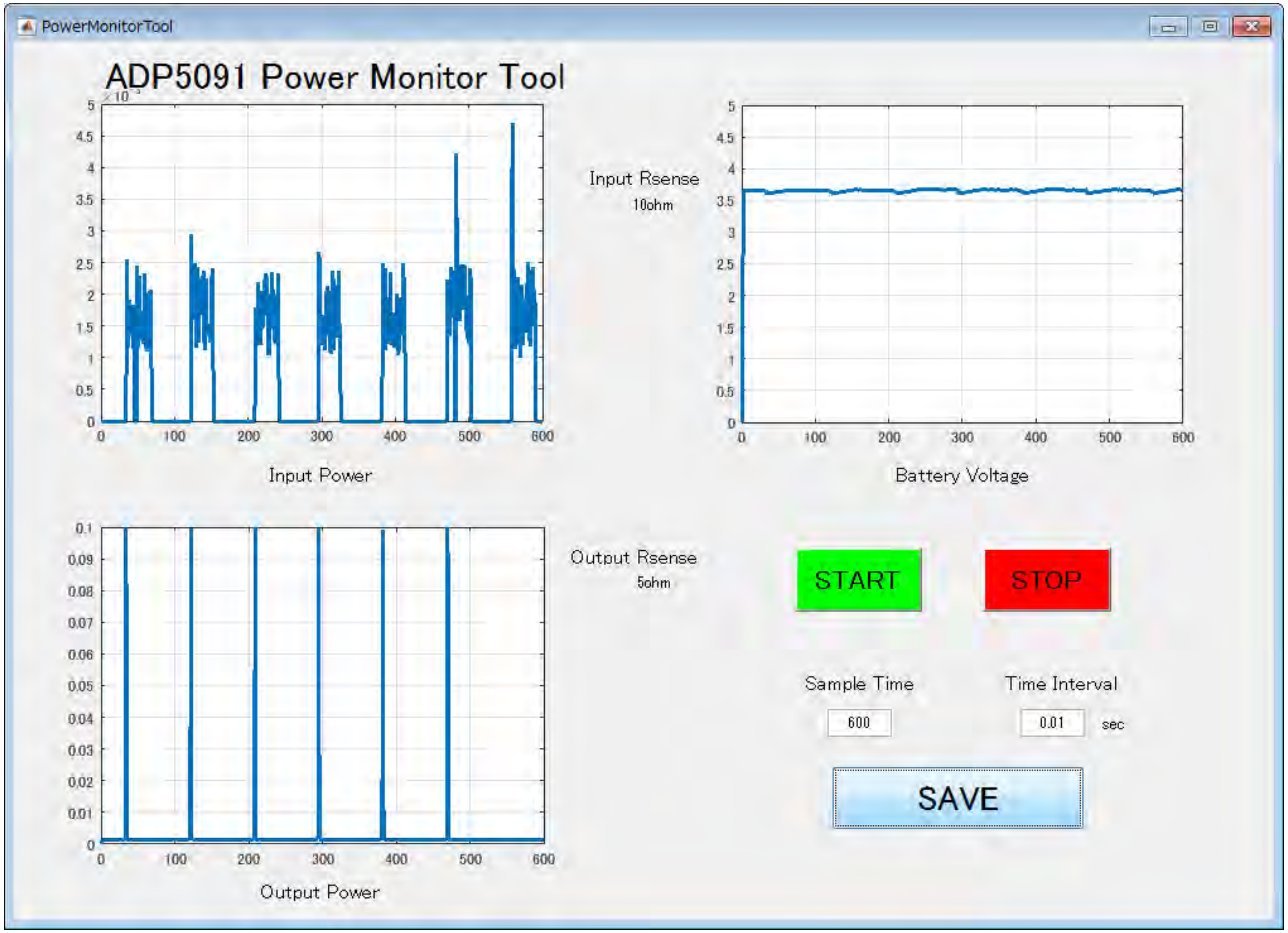
- 30mA負荷 – 50ms
- 10秒インターバル
- 1200Lux環境下

- 容量が足りず、負荷に対応することができていない
- 容量が少ないので充電は早い

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Super Cap 30mF – 10秒インターバル



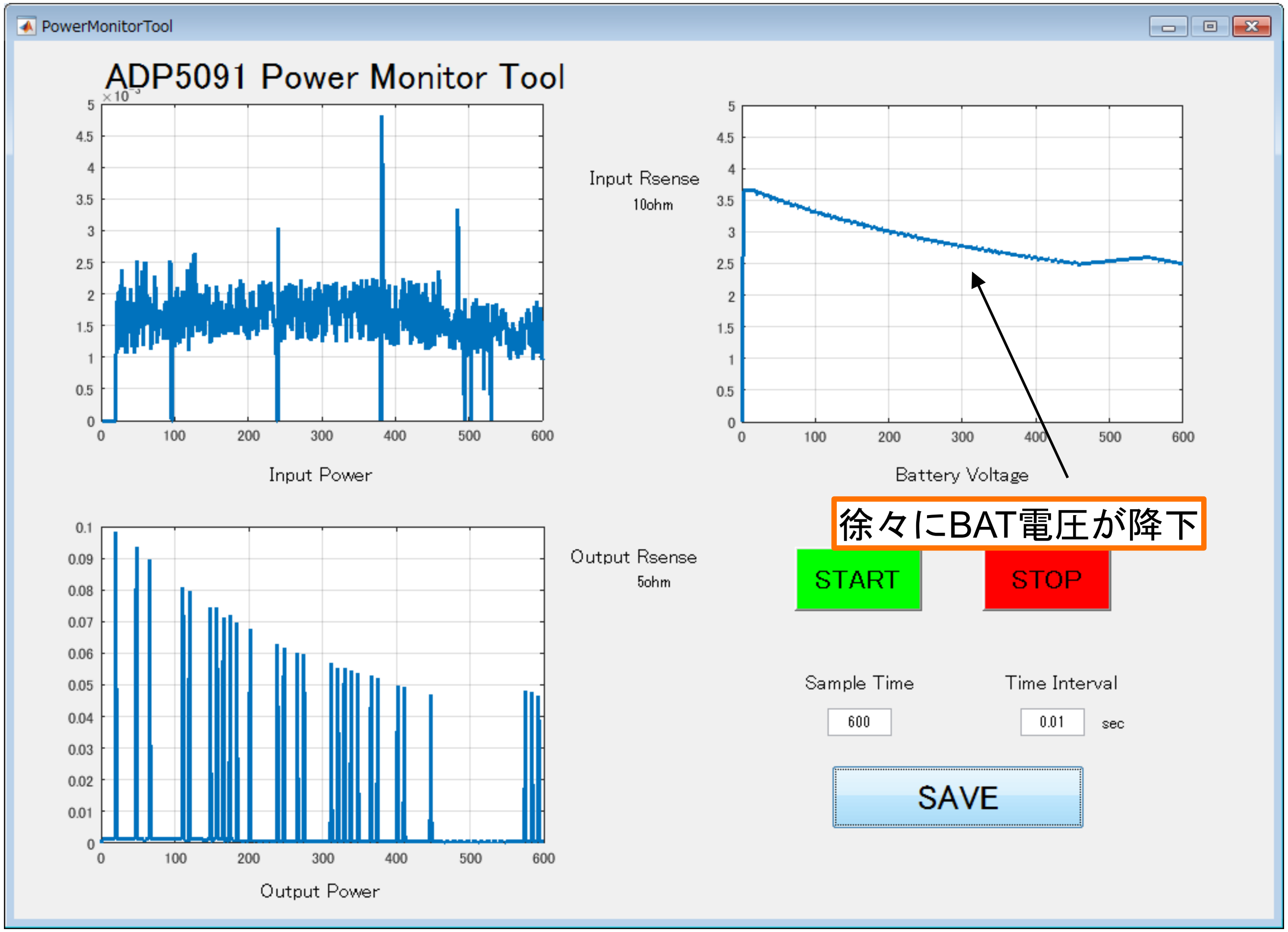
- 30mA負荷 – 50ms
- 10秒インターバル
- 1200Lux環境下
- 容量が負荷に十分対応
- 再充電も行われBAT電圧が安定している

充電 > 負荷

この条件下では、エナジー・ハーベスティングシステムは安定している

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Super Cap 30mF – 1秒インターバル



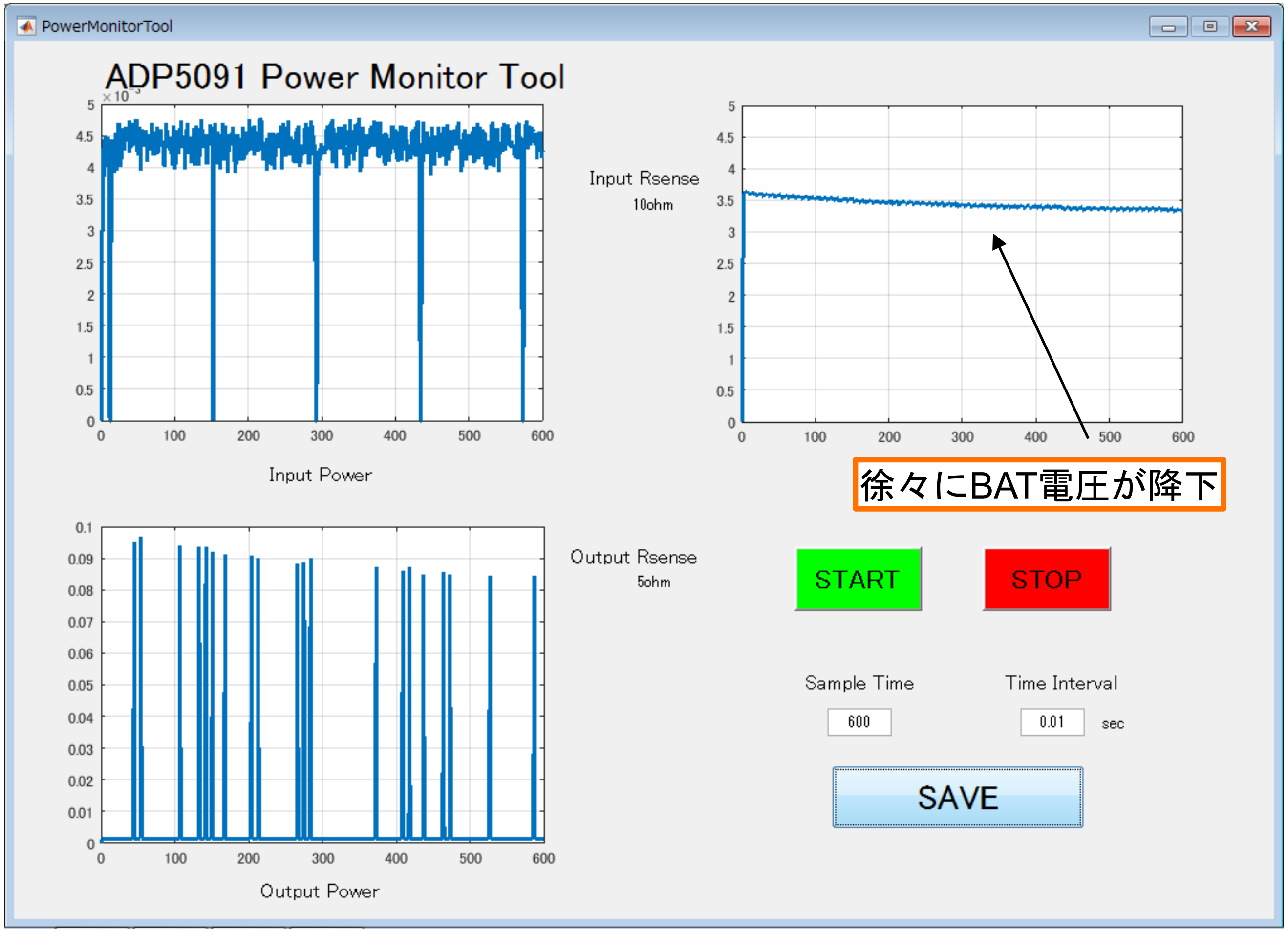
- 30mA負荷 – 50ms
- 1秒インターバル
- 1200Lux環境下
- 充電が間に合わずBAT電圧が徐々に低下している
- トータルの負荷が充電電力を上回っている

充電 < 負荷

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Super Cap 30mF – 1秒インターバル at 窓際



- 30mA負荷 – 50ms
- 1秒インターバル
- 20000Lux環境下(窓際に移動) ➔ 発電電力が倍増
- 充電が間に合わずBAT電圧が徐々に低下している
- トータルの負荷が充電電力を上回っている

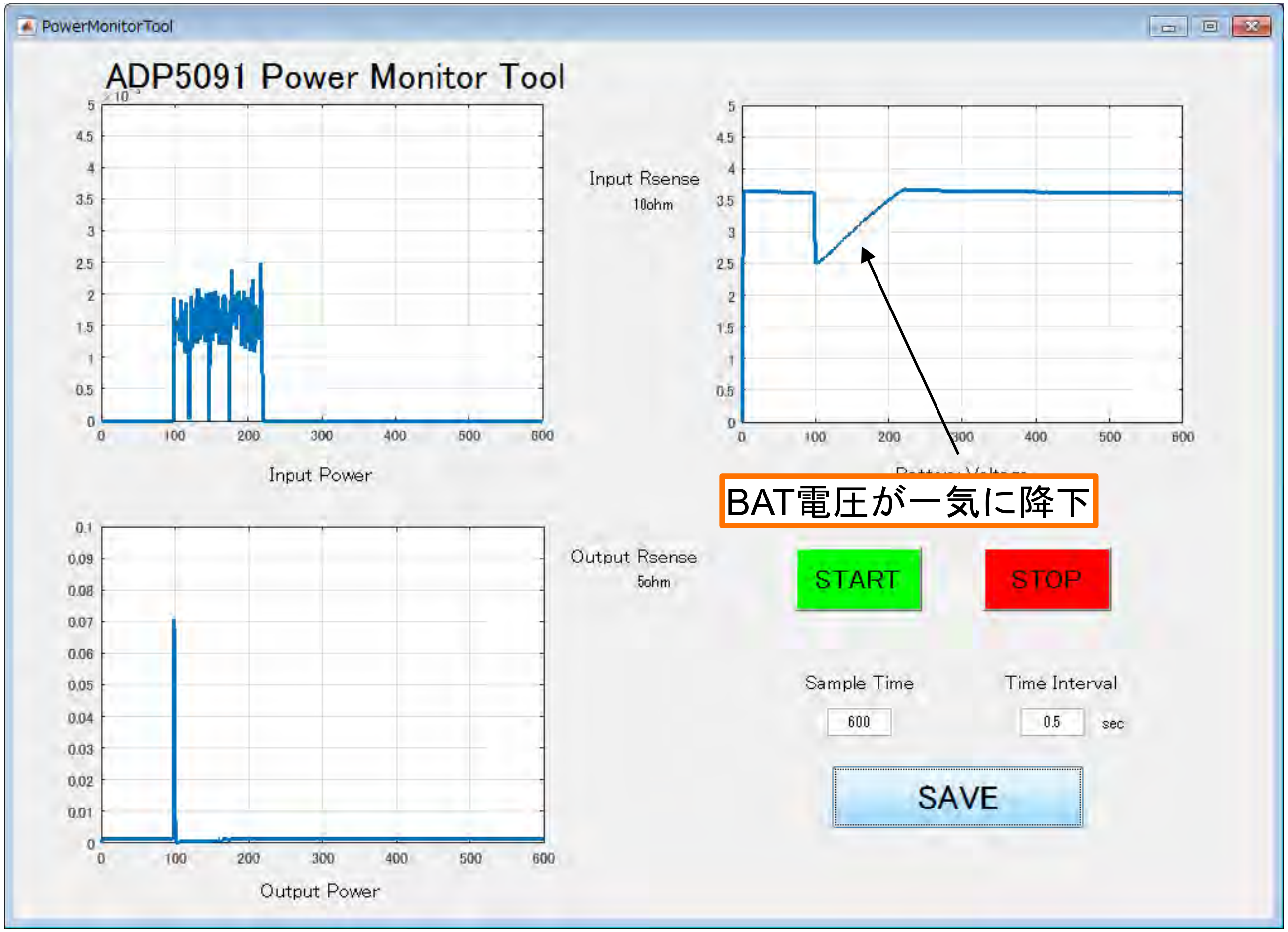
充電 < 負荷

インターバルを減らす or PV選定の再検討が必要

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Super Cap 30mF – 5秒連続した負荷



負荷に耐えることができていない

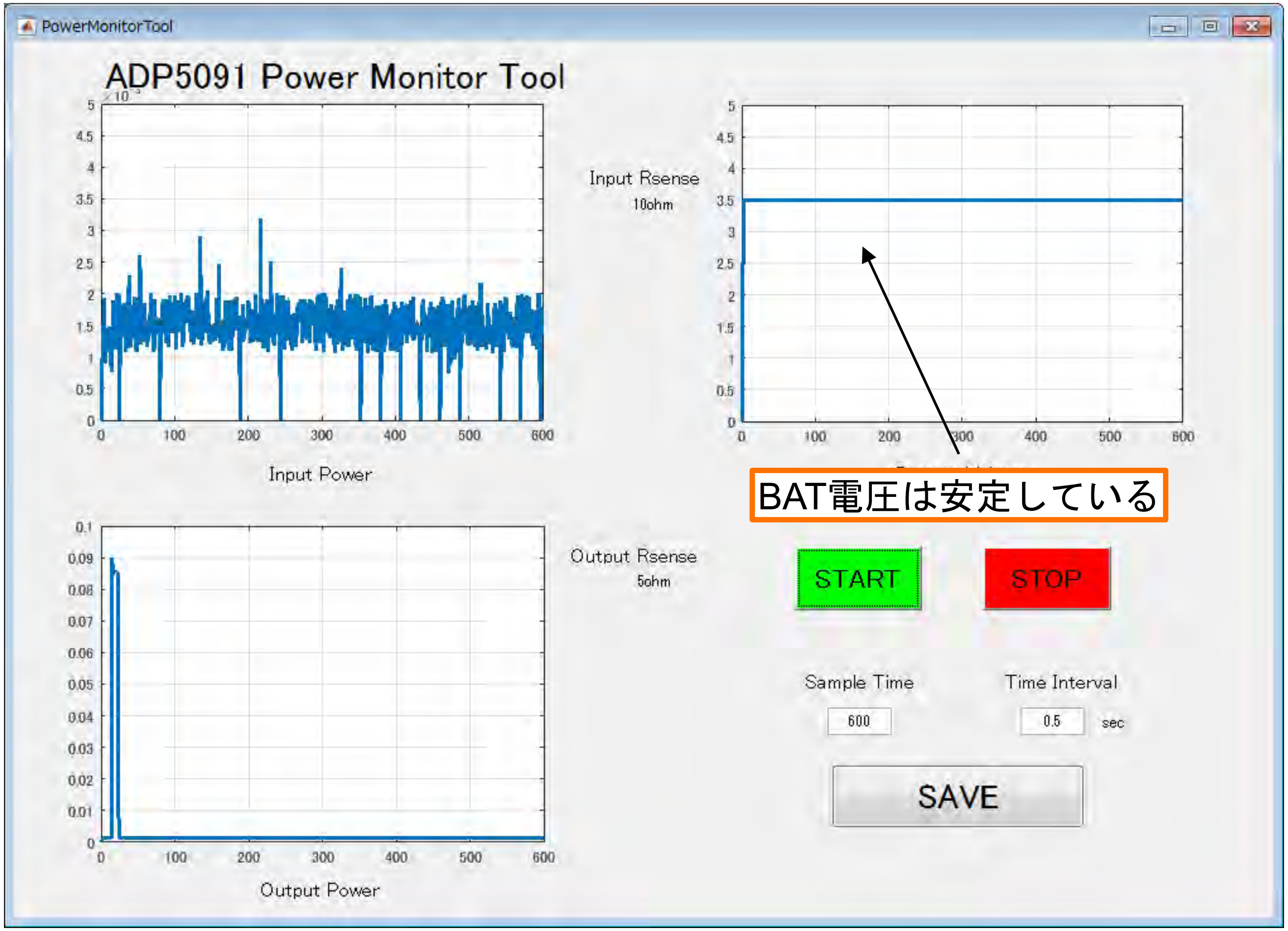
- 30mA負荷 – 5s
- 10分インターバル
- 1200Lux環境下

- 瞬間的に必要な負荷が大きく、BAT電圧が下限電圧まで降下

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

LiC 40F(LIC1235R 3R8406) – 5秒連続した負荷



安定したBAT電圧が保たれている

- 30mA負荷 – 5s
- 10分インターバル
- 1200Lux環境下

- 容量が大きく負荷に十分耐えている

- 発電する電力が増加するわけではないので、インターバルを長くとるなどの対応が必要な点に注意

Analog Devices Proprietary Information ©

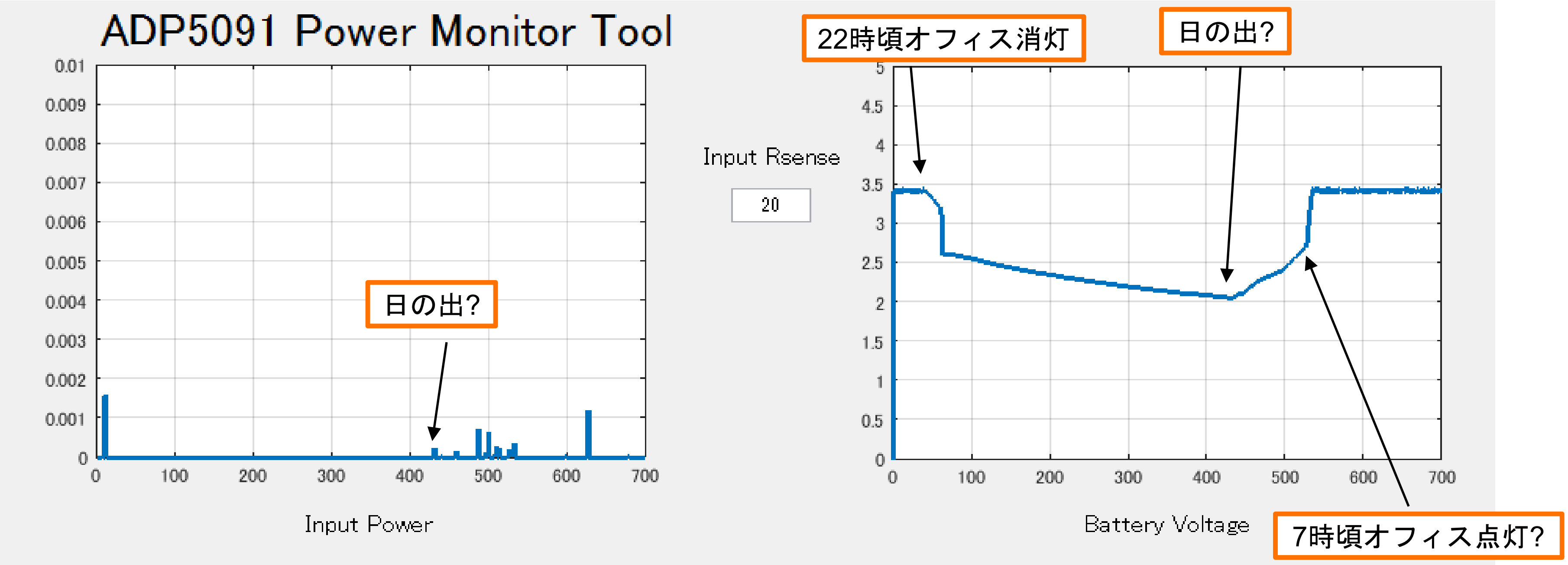
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

まとめ

- エナジー・ハーベスティングを設計するには、どのような仕様を構築するのかが非常に重要
  - 設置する環境と、センサーの動作条件(センシングや通信)の見極めが重要
  - 仕様は、太陽光パネル、コンデンサなどの二次電池、予備電池の有無などの設計仕様に大きな影響がある
- 実験検証も、動作環境を知る上で重要となる
  - 温度や照度など、発電に影響を与える要素を事前に知ることで対策が可能
- 十分に条件を検討することで、安定したエナジー・ハーベスティングシステムを構築することが可能
- エナジー・ハーベスティングの情報が、ビックデータの一部になる可能性がある

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

エナジー・ハーベスタの情報解析の例



- 21時からのオフィスでの1分ごとの記録(約10時間実験)
  - 充電データより明るさの情報がわかる
    - オフィスの消灯時刻
    - 日の出？(明るくなり始める時刻)

- **オフィスや会議室の使用状況**
- **夜間における室内の人の有無**
- **照明の点灯による電気料金の解析**

Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ご協力いただいた企業様

- **株式会社フジクラ様**
  - 色素増感型太陽電池FDSC-FSC4などのご提供
- **太陽誘電様**
  - リチウムイオンキャパシタLIC1235R 3R8406のご提供
  - セラミックコンデンサのご提供
- **P板.com様**
  - プリント基板製造のご協力
- **MathWorks様**
  - MATLABのサポートなどのご協力
- **村田製作所様**
  - セラミックコンデンサなどのご提供

Analog Devices Proprietary Information ©
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

参考文献

- 書籍
  - Switch-Mode Power Supplies – Christophe P. Basso 著
  - 合点!電子回路超入門 – 石井聡 著
  - MATLABプログラミング入門 – 上坂吉則 著
  - Learning to Program with MATLAB – Craig S. Lent 著
  - トランジスタ技術SPECIAL 一人で始めるプリント基板作り – CQ出版

- Web
  - MathWorks – MATLAB Example(Matlab, Arduino, GUI関連の使用例)
    - http://jp.mathworks.com/examples/
  - Youtube – Arduino and Matlab GUI Tutorial – Dejan Nedelkovski
    - https://www.youtube.com/watch?v=udIyzonx9-A
  - Kicad.jp公式Twitterアカウント - @kicad_jp
  - Arduino - https://www.arduino.cc/

- データシート
  - ADP5091
  - AD8226
  - ADA4500
  - IRLB8721PbF

Analog Devices Proprietary Information ©
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Appendix 1
使用部品の詳細

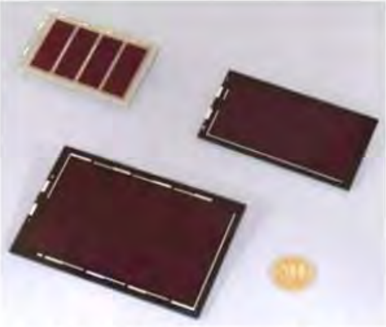
Analog Devices Proprietary Information ©

色素増感太陽電池（DSC : Dye-Sensitized solar Cell）

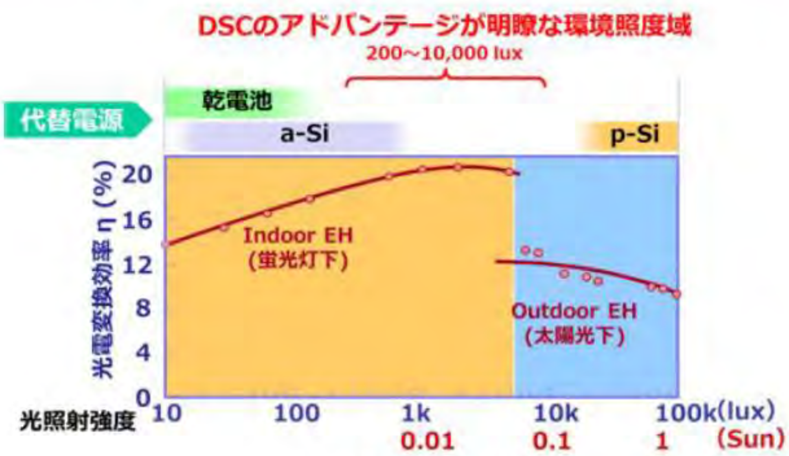
エネルギーハーベスティングに最適な発電デバイス

特徴

- 屋内外を問わず弱い光や拡散光でも高効率に発電
- 色素増感型でトップクラスの耐久性，長期信頼性
- サイズ，形状などデザインの自由度が高い



標準DSCモジュールパネル



DSCの照度依存性

室内の照度イメージ

DSCに関する Web / お問い合わせ先アドレス

http://www.fujikura.co.jp/products/infrastructure/dsc/01/2052192_13684.html

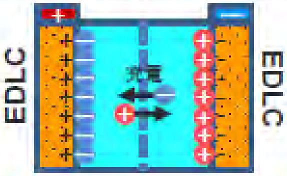
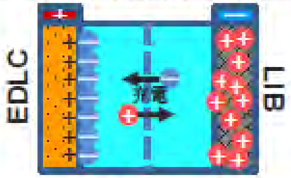
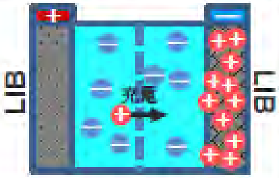
ask-dsc@jp.fujikura.com

Fujikura

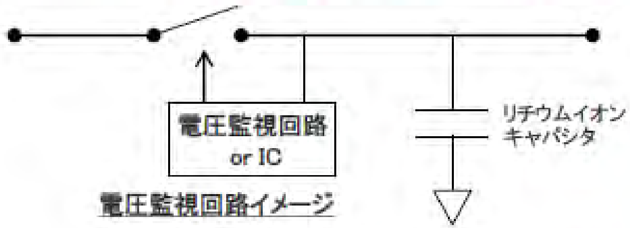
Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

太陽誘電株式会社 リチウムイオン キャパシタ

特性比較	EDLC	TAIYO YUDEN ポリアセンキャパシタ	TAIYO YUDEN リチウムイオンキャパシタ (ハイブリッドキャパシタ)	LIB
電極				
内部抵抗	◎ 低	◎ 低	○ 中	△ 高
使用温度範囲 [℃]	-40 to +70	-40C to +85℃	-25℃ to +85℃	-20 to +60℃
最大定格電圧 [V]	2.3 to 2.7	2.5 to 3.0	3.8	4.1 to 4.3
下限電圧 [V]	0	0	2.2	2.5
容量 / 体積	△ 1	△ 1	○ 2 to 3	◎ 100
充放電サイクル	◎ (100K cycle times)	◎ (100K cycle times)	◎ (100K cycle times)	△ (500 to 1K cycle times)
自己放電	×	×	◎	◎
安全性	◎	◎	◎	△
電圧監視の必要性	無	無	必要	必要

太陽誘電のスーパーキャパシタは高温環境下で高い信頼性を実現できます。



電圧監視回路イメージ

・リチウムイオンキャパシタは下限電圧を下回ると特性が劣化します。

・下限電圧(2.2V)の監視が必要です。

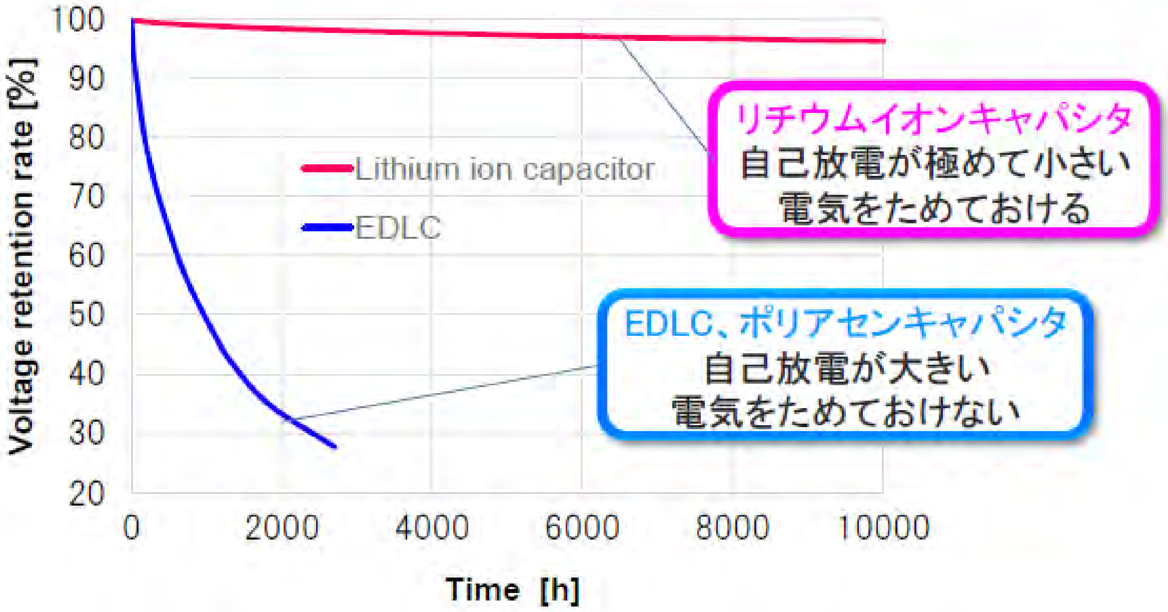
TAIYO YUDEN

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Analog Devices Proprietary Information ©

リチウムイオンキャパシタの自己放電特性

リチウムイオンキャパシタとEDLCの自己放電特性比較



リチウムイオンキャパシタはためた電力を**長期間保持**することができます。

TAIYO YUDEN

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

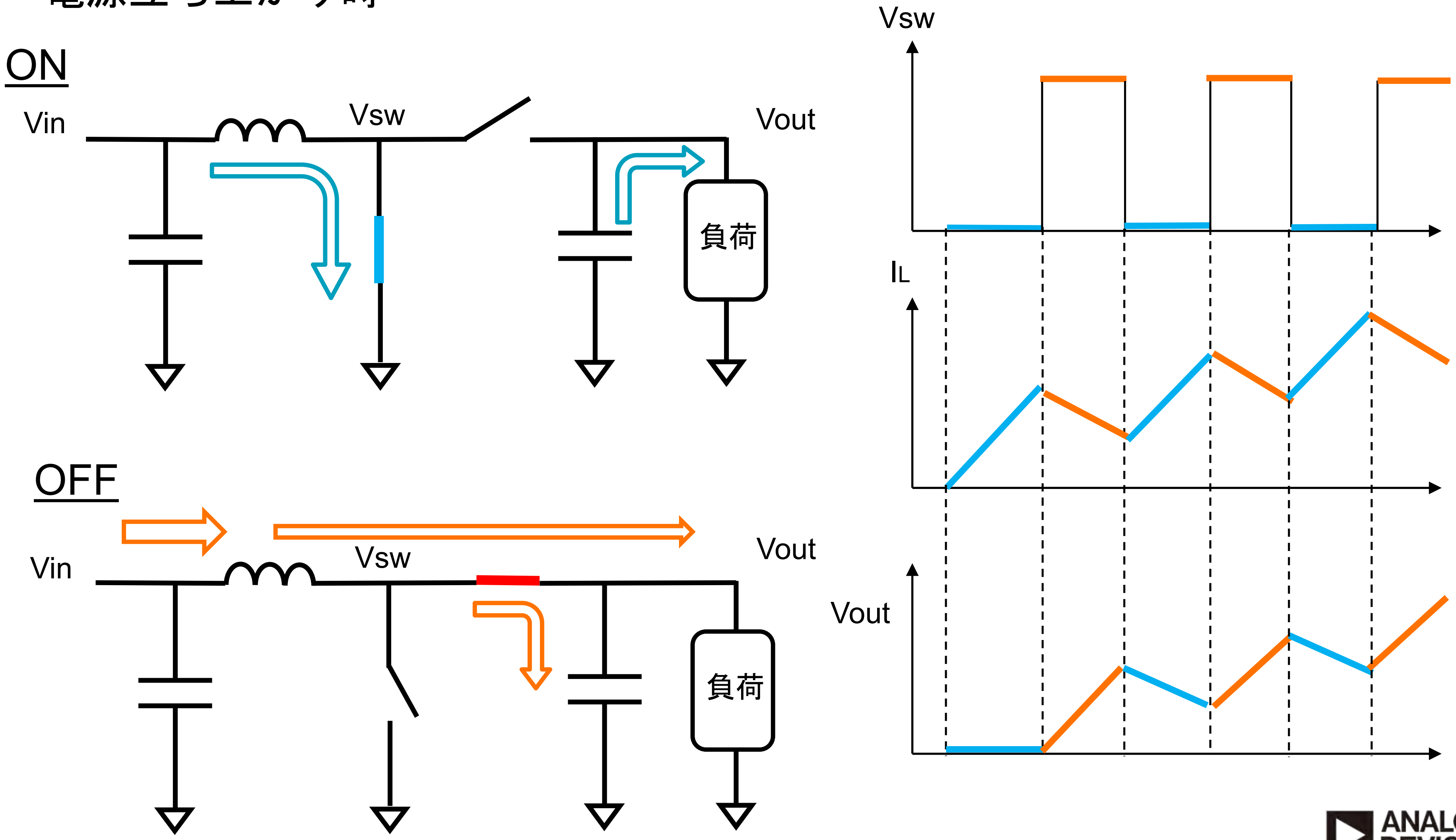
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Appendix 2
ADP5091設計の補足資料

Analog Devices Proprietary Information ©

昇圧スイッチングレギュレータの基礎 – 立ち上がり時

- 電源立ち上がり時



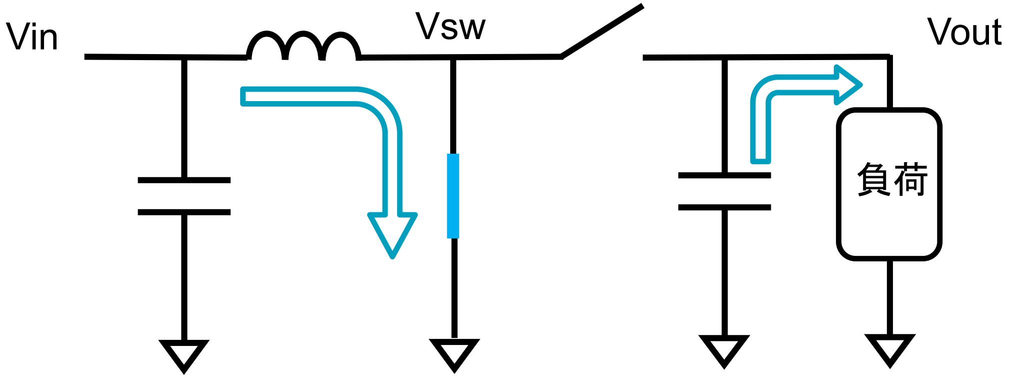
Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

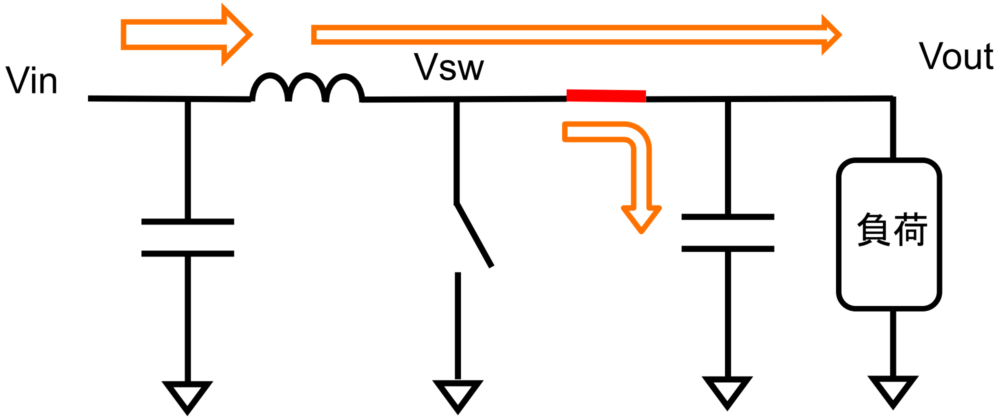
昇圧スイッチングレギュレータの基礎 – CCM mode(連続)

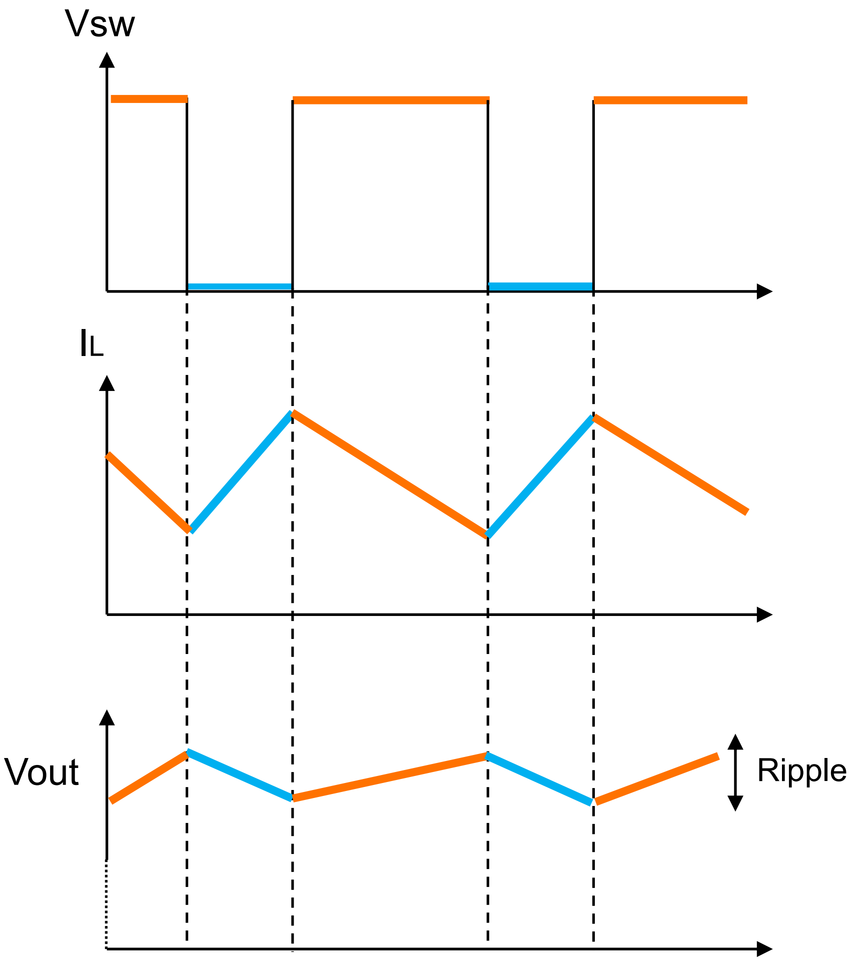
- 出力電圧安定時の通常スイッチング動作

ON



OFF



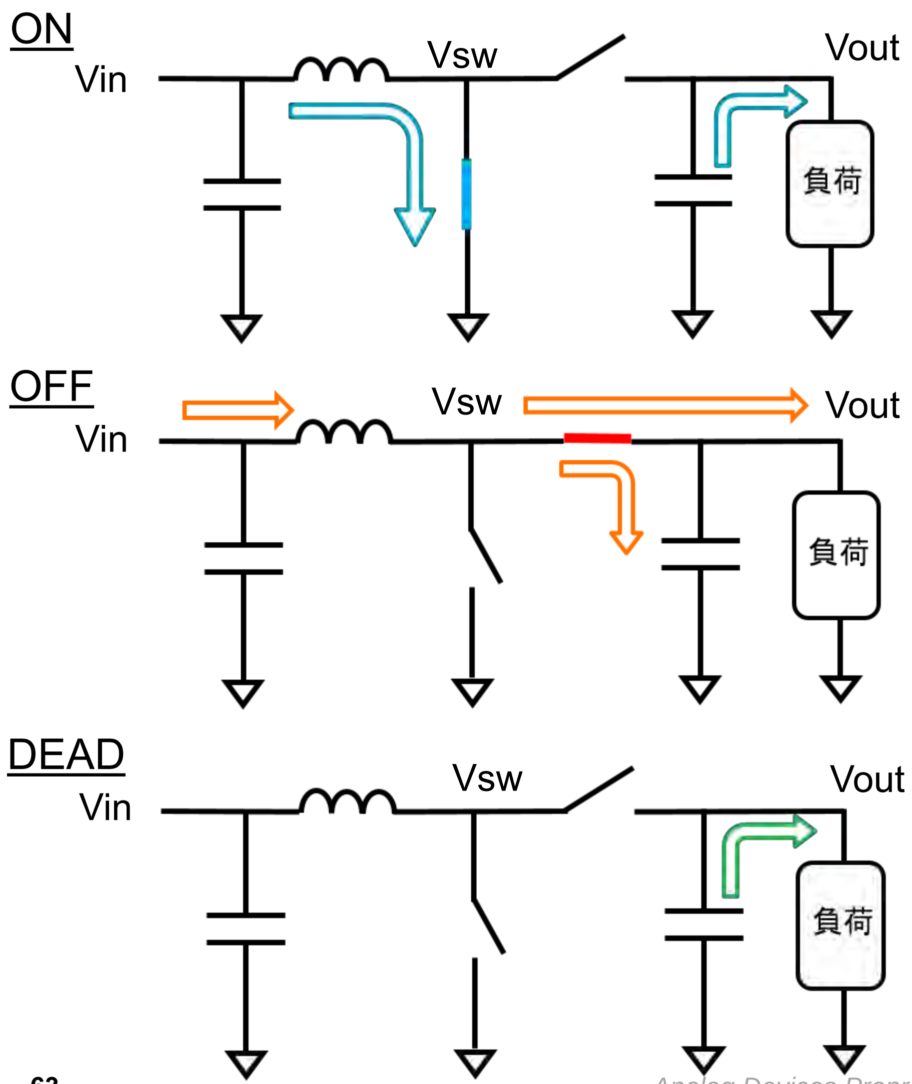


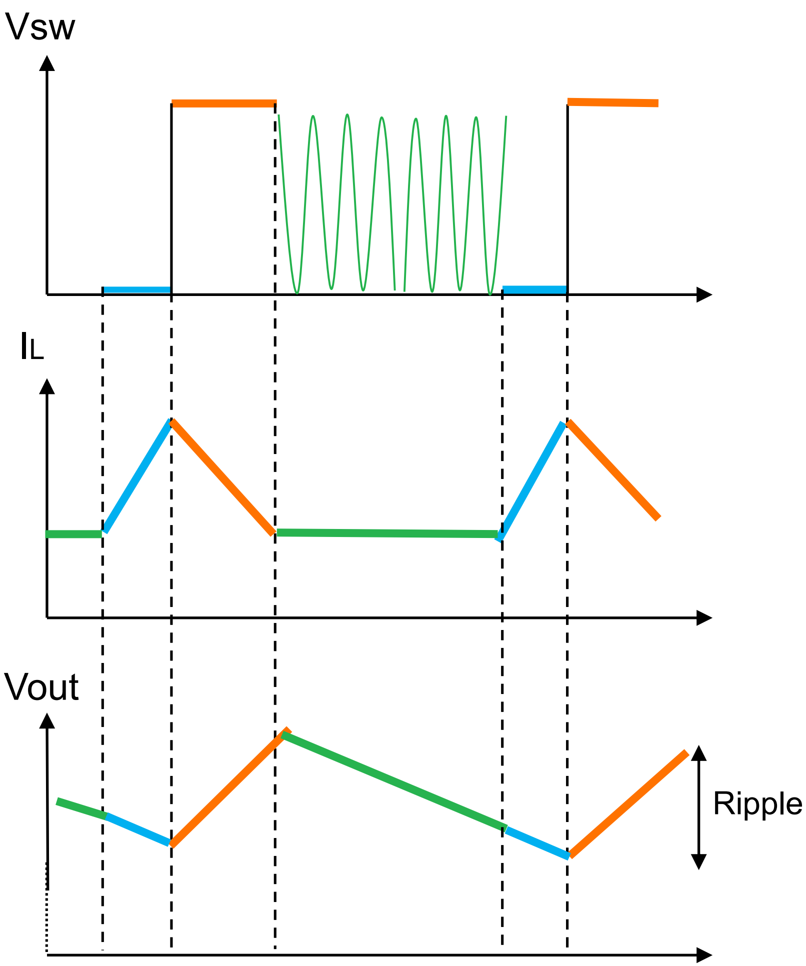
Analog Devices Proprietary Information ©

想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

昇圧スイッチングレギュレータの基礎 – DCM mode(不連続)

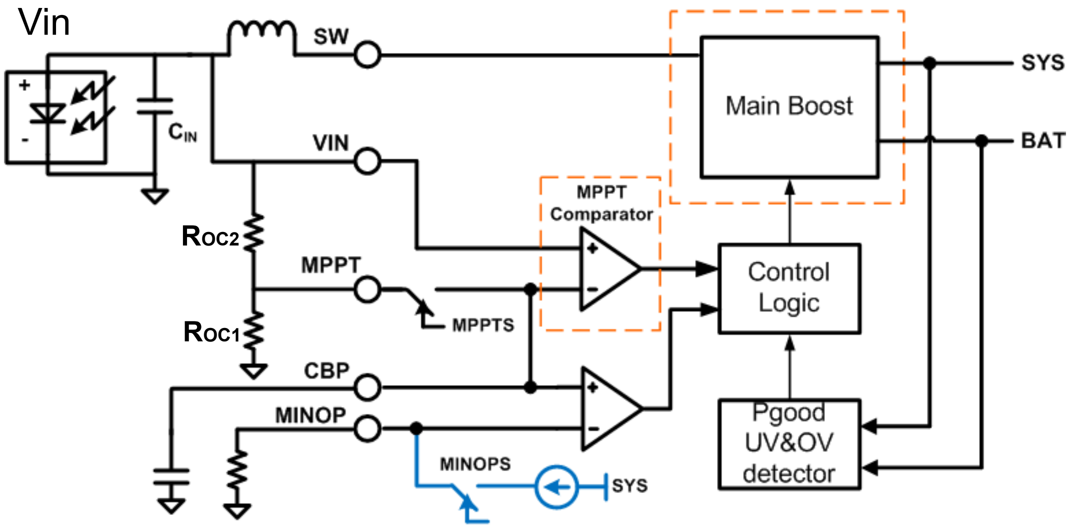
- 出力の負荷が軽い時の不連続動作

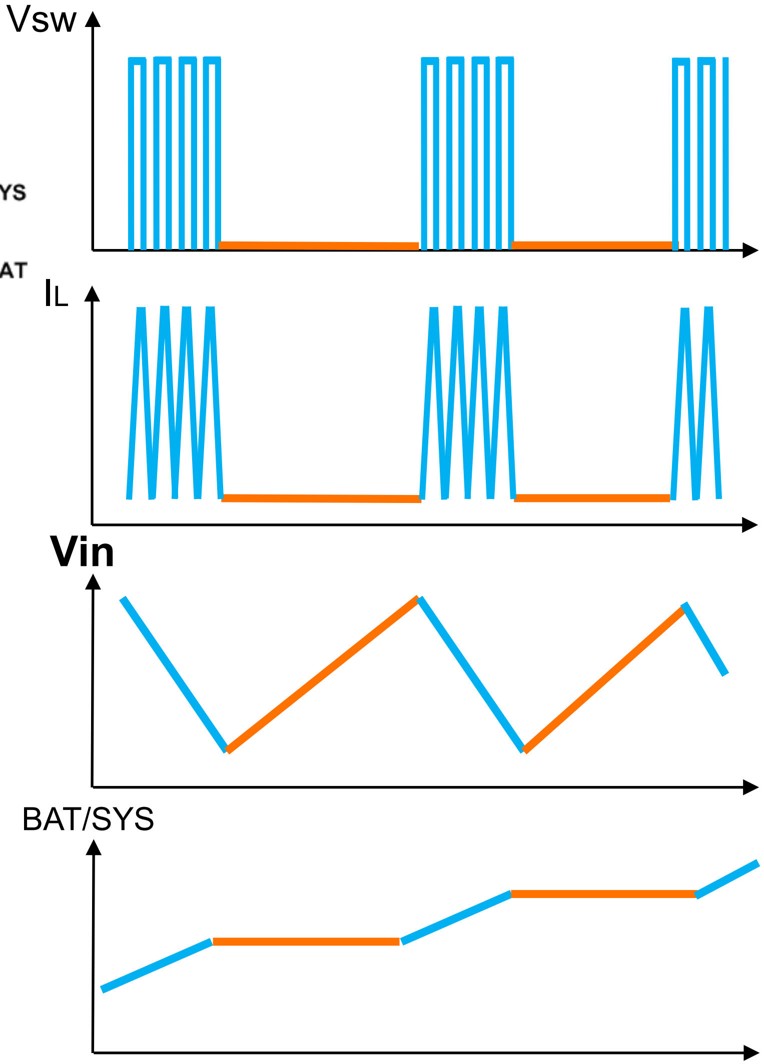




Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の昇圧回路の動作 – PFM Mode(DCM mode)





- ADP509xは、一般的な昇圧コントローラのように出力電圧をモニタしているのではなく、**入力電圧**をモニターして、スイッチをON/OFFさせ動作します。

Analog Devices Proprietary Information ©
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091ブロック図

REG出力
- LDO出力
- 出力制御

SYS出力
センサRF、uCなど

予備電池接続

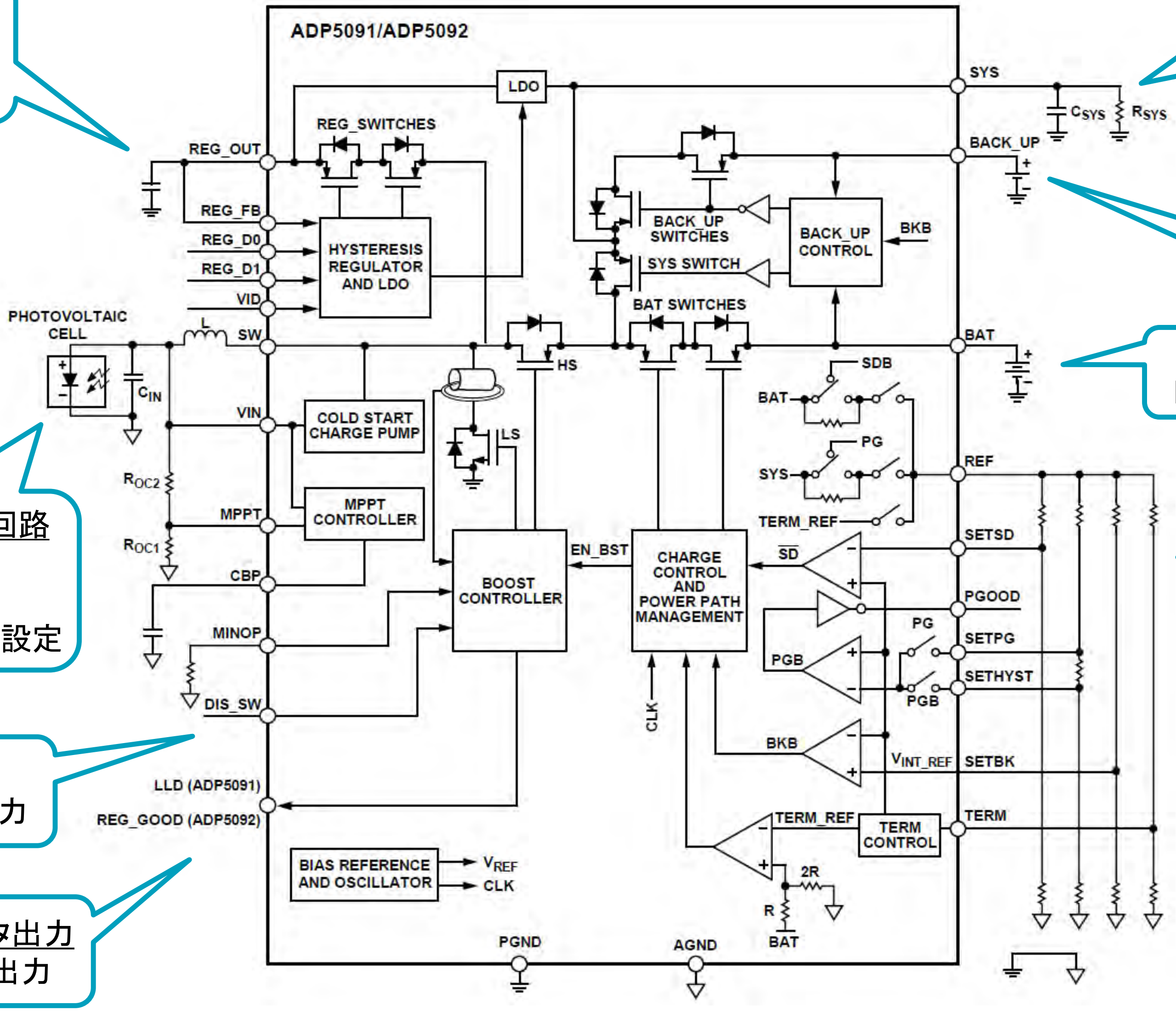
充放電電池接続
Li+、SuperCapなど

昇圧スイッチング回路
- 発電素子入力
- MPPT設定
- 最低入力電圧設定

電圧設定
充放電電圧
PG電圧など

Disable SW
RF用強制オフ入力

インジケータ出力
LLD, PG出力



Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

レギュレータ出力とSYS電圧出力の設定

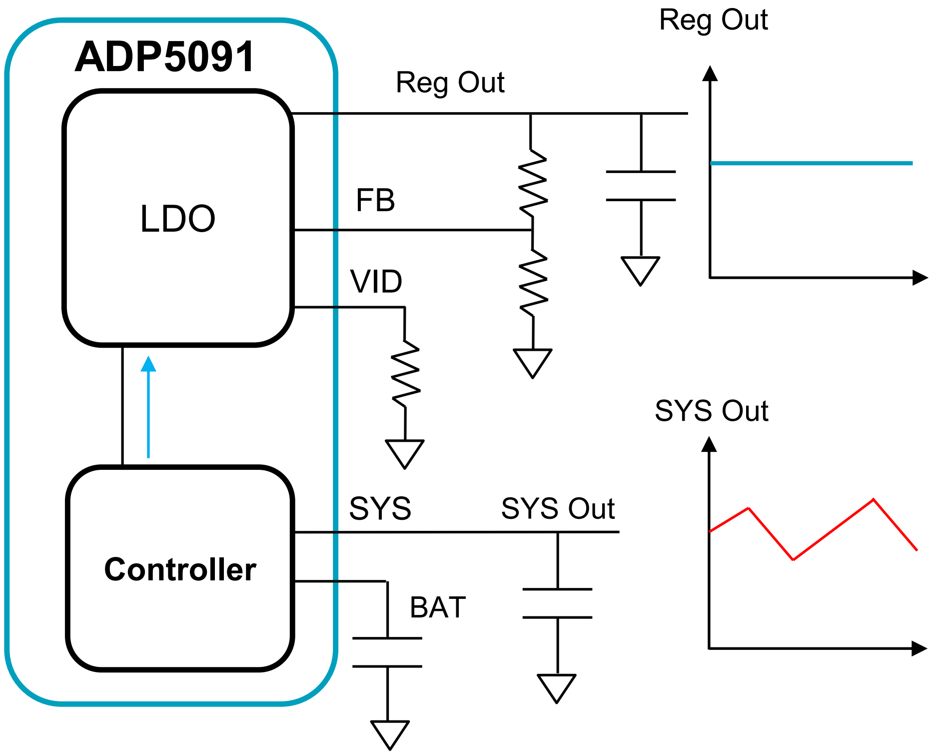


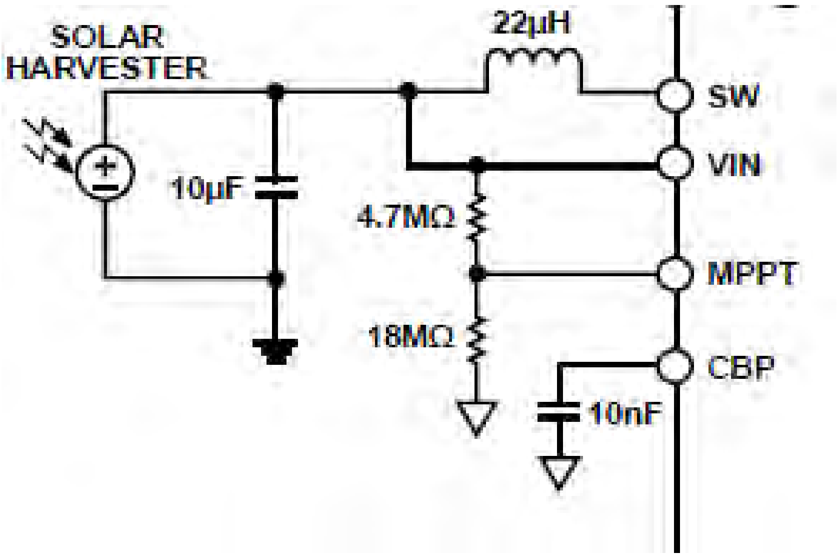
Table 7. Output Voltage Options Set by the VID Pin

VID Configuration	Output Voltage Set by the VID Pin
Short to Ground	Programmed with external resistors
Floating	V_{OUT} = 2.5 V
R_{VID} = 7 kΩ	V_{OUT} = 1.5 V
R_{VID} = 14 kΩ	V_{OUT} = 1.8 V
R_{VID} = 27.7 kΩ	V_{OUT} = 3.6 V
R_{VID} = 55.6 kΩ	V_{OUT} = 3.3 V
R_{VID} = 111 kΩ	V_{OUT} = 2.0 V
R_{VID} = 221 kΩ	V_{OUT} = 3.0 V
R_{VID} = 442 kΩ	V_{OUT} = 2.8 V

- REG_OUT(LDO出力)
  - 電圧設定: VID or FB pin抵抗分割
  - 内蔵レギュレータにより、一定の電圧を得られる
  - 損失が大きい
  - LogicでON/OFFが可能
  - センサやuCなどの固定出力が必要な場合に有効
- SYS(BAT電圧出力)
  - 充電した電圧(BAT)をそのまま出力
  - コンデンサや電池の状況によって、出力電圧が変わる
  - 整流しないため損失が小さい
  - 後段にレギュレータなどがある場合や、電圧変動の影響を受けない場合に有効

Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

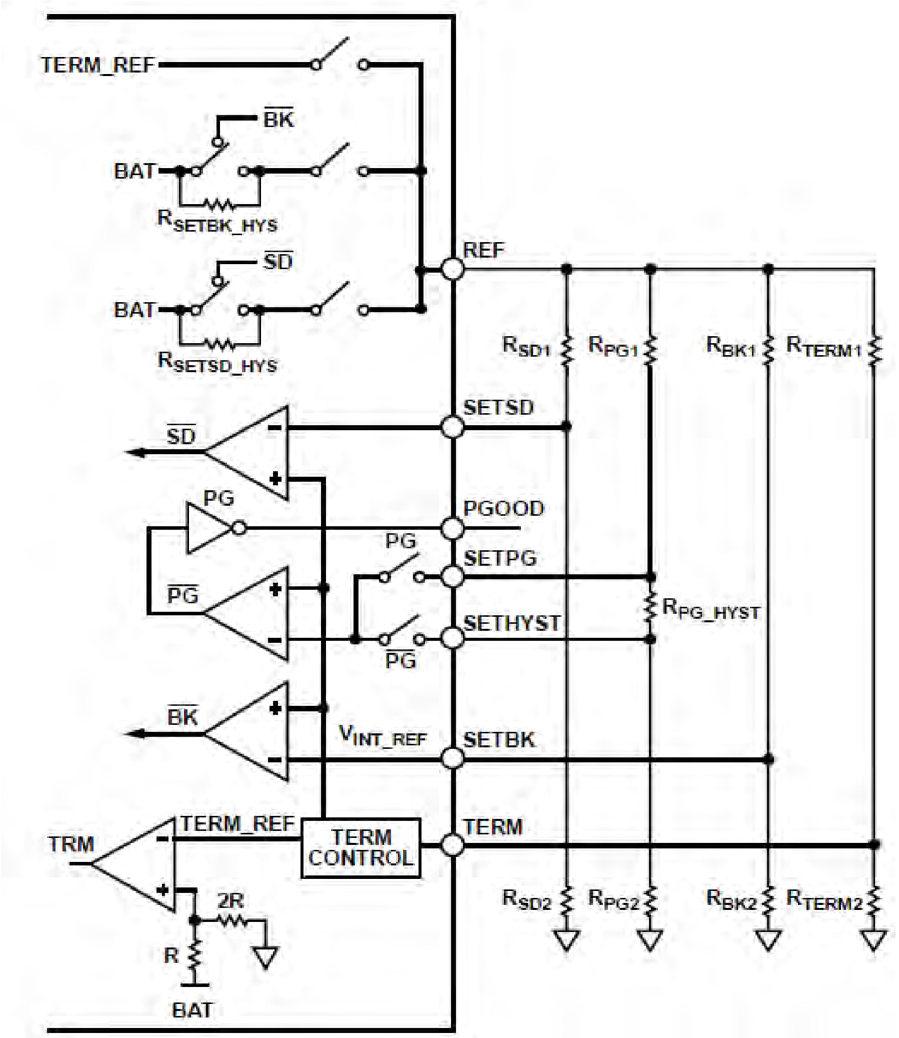
ADP5091の回路設計 – 昇圧コントローラ周辺



- スイッチング回路
  - L:22uH
    (太陽誘電:RS4018T220MDGJ)
  - C: 10uF(村田製作所)
  - MPPT: 0.8(ソーラーパネルの推奨値)
  - MINOPは未使用(GND)

Analog Devices Proprietary Information ©
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の基板設計



- BAT(2次電池の電圧設定)
  - TERM(最大電圧):3.6V
  - SD(最低電圧): 2.5V
  - BK(バックアップ切り替え電圧): 2.6V(未使用)
  - PG(PGOOD): 3.4Vrise, 3.1Vfall(未使用)
- レギュレータ出力
  - VIDで3.3V出力に設定

Analog Devices Proprietary Information ©

想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の基板設計

- データシートの推奨値と計算式を参考に抵抗値を設定

Table 8. Programming Threshold Resistors (See Figure 42)

Voltage Threshold (V)	R_{BK1}, R_{SD1}, and R_{PG1} (MΩ)	R_{BK2}, R_{SD2}, and R_{PG2} (MΩ)	R_{TERM1} (MΩ)	R_{TERM2} (MΩ)
2	5	5	Not applicable	Not applicable
2.1	5.23	4.75	Not applicable	Not applicable
2.2	5.49	4.53	3.2	6.81
2.3	5.62	4.32	3.48	6.49
2.4	5.9	4.12	3.74	6.2
2.5	6.04	4	4	6.04
2.6	6.19	3.83	4.22	5.76
2.7	6.34	3.74	4.42	5.6
2.8	6.49	3.57	4.64	5.36
2.9	6.6	3.48	4.87	5.23
3	6.65	3.32	5	5
3.1	6.8	3.24	5.11	4.87
3.2	6.81	3.09	5.36	4.7
3.3	6.98	3.01	5.49	4.53
3.4	6.98	2.94	5.6	4.42
3.5	7.15	2.87	5.76	4.3
3.6	7.15	2.8	5.9	4.12
3.7	7.32	2.7	5.9	4.02
3.8	7.32	2.61	6.04	3.92
3.9	7.5	2.55	6.19	3.83
4	7.5	2.5	6.2	3.74
4.1	7.5	2.43	6.34	3.65
4.2	7.68	2.37	6.49	3.57
4.3	7.68	2.32	6.49	3.48
4.4	7.68	2.26	6.6	3.4
4.5	7.87	2.21	6.65	3.32
4.6	7.87	2.15	6.8	3.24
4.7	7.87	2.15	6.81	3.2
4.8	7.87	2.1	6.81	3.09
4.9	7.87	2.05	6.98	3.09
5	8.06	2	6.98	3
5.1	8.06	1.96	6.98	2.94
5.2	8.06	1.91	7.15	2.87

$$V_{BAT_TERM} = \frac{3}{2} \times V_{INT_REF} \times \left(1 + \frac{R_{TERM1}}{R_{TERM2}}\right)$$

$$V_{SETSD} = V_{INT_REF}\left(1 + \frac{R_{SD1}}{R_{SD2}}\right)$$

$$V_{SETBK} = V_{INT_REF}\left(1 + \frac{R_{BK1}}{R_{BK2}}\right)$$

$$V_{SETPG_RISING} = V_{INT_REF}\left(1 + \frac{R_{PG1} + R_{PG_HYST}}{R_{PG2}}\right)$$

$$V_{SETPG_FALLING} = V_{INT_REF}\left(1 + \frac{R_{PG1}}{R_{PG2} + R_{PG_HYST}}\right)$$

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

予備電池駆動

- BUCK_UPピンに電池を接続することで、充電電池の電圧が低い場合でも、システムに電源を供給ができる

  ➔立ち上がり時や、充電がうまくされてない場合に動作保証ができる

- BUCK_UPからBATへの充電はされません

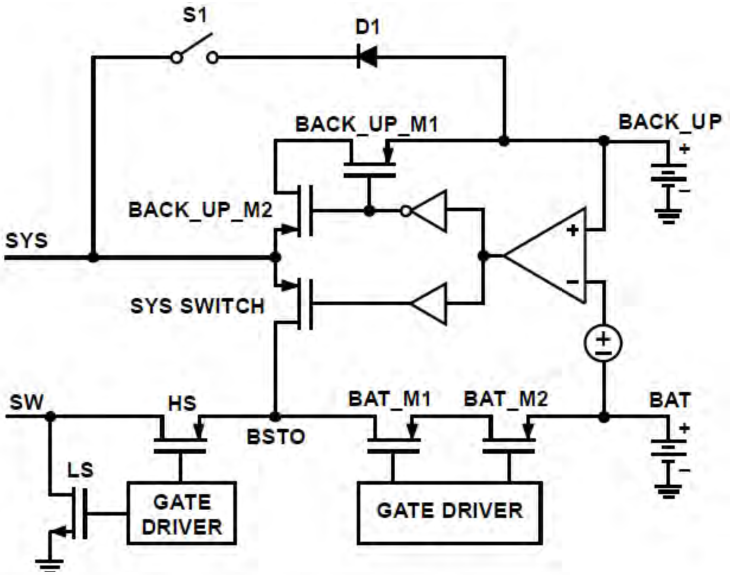


Table 9. Power Path Working State (See Figure 44)

Backup Battery	Power Condition[1]	Main Boost	BAT_M1	BAT_M2	SYS Switch	BACK_UP_M1	BACK_UP_M2
Without	$V_{SYS_CHG} > V_{SYS} > V_{SYS_TH}$, $V_{SETSD} > V_{BAT}$	Asynchronous	Off	Off	On	Off	Off
	$V_{SYS} > V_{SYS_CHG}$, $V_{SETSD} > V_{BAT}$	Asynchronous	On	Off	On	Off	Off
	$V_{BAT_TERM} > V_{BAT} = V_{SYS} > V_{SETSD}$	Synchronous	On	On	On	Off	Off
	$V_{SYS} > V_{SYS_TH}$, $V_{BAT} > V_{BAT_TERM}$	Disabled	On	On	On	Off	Off
With	$V_{SYS_CHG} > V_{SYS} > V_{SYS_TH}$, $V_{SETSD} > V_{BAT}$	Asynchronous	Off	Off	On	Off	Off
	$V_{SYS} > V_{SYS_CHG}$, $V_{SETSD} > V_{BAT}$, $V_{BACK_UP} > V_{BAT}$	Asynchronous	On	Off	Off	On	On
	$V_{SYS} > V_{SYS_TH}$, $V_{BAT} > V_{SETSD}$, $V_{BAT} > V_{SETBK}$	Synchronous	On	On	On	Off	Off
	$V_{SYS} > V_{SYS_TH}$, $V_{BAT} > V_{SETSD}$, $V_{BAT} < V_{SETBK}$, $V_{BACK_UP} > V_{BAT}$	Synchronous	On	On	Off	On	On
	$V_{SYS} < V_{SYS_TH}$	Disabled	Off	Off	On	Off	Off

Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

その他の機能

- MINOP: 最低駆動電圧
  - MINOP pinの抵抗値により、最低入力電圧を設定することができる
  - VINが設定した電圧を下回ると、スイッチングをOFFにし消費電流を削減できる
- DIS_SW
  - DIS_SWをHighにすると、スイッチング動作を強制的に止め、ノイズを低減して、RFのパフォーマンスに影響を与えないようにすることが可能
  - uCなどから、RFを動作させるタイミングに同期して使用
- LLD(ADP5091 Only)
  - Low Light Density Indicator、入力電圧を監視して、電圧が低下しているかどうかを監視するデジタル出力
- REG_GOOD(ADP5092 Only)
  - REG_OUTのPGOOD機能

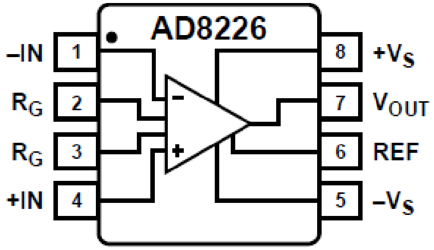
Analog Devices Proprietary Information ©
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

Appendix 3
測定装置の詳細

Analog Devices Proprietary Information ©

計測装置(電力モニタ基板)について

- 電流検出には、AD8226(計装アンプを使用)
  - 広い入出力レンジ
    - 0Vから検出が可能
  - 抵抗1本でGain設定
    - Gainの設定に注意
  - 差動検出が容易



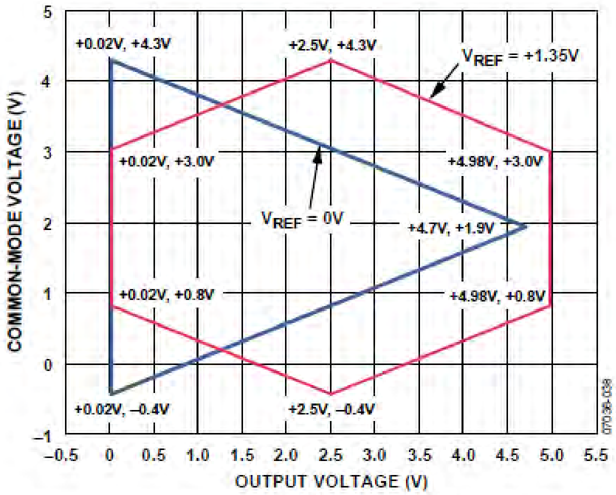


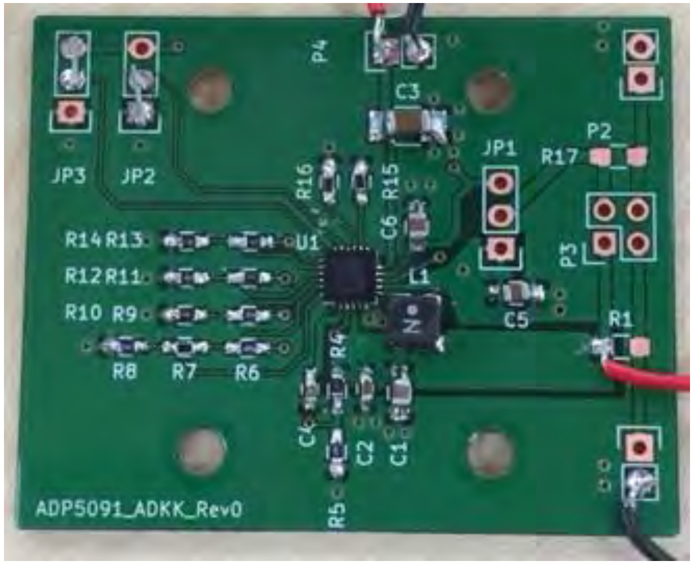
Figure 10. Input Common-Mode Voltage vs. Output Voltage, Single Supply, V_S = +5 V, G = 1

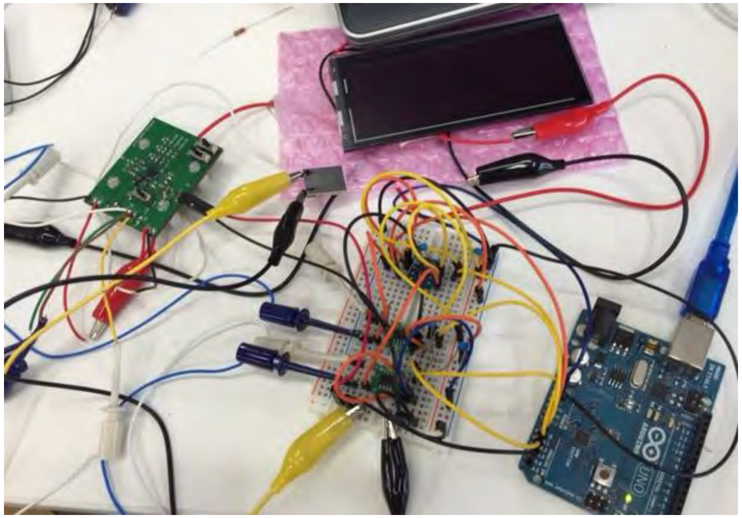
- 電圧検出には、ADA4500(高精度CMOS)を使用
  - 入力インピーダンスが高い
  - オフセット電圧が低い(クロスオーバー歪み無し)
  - Rail to Rail入出力
  - Unity Gainで使用

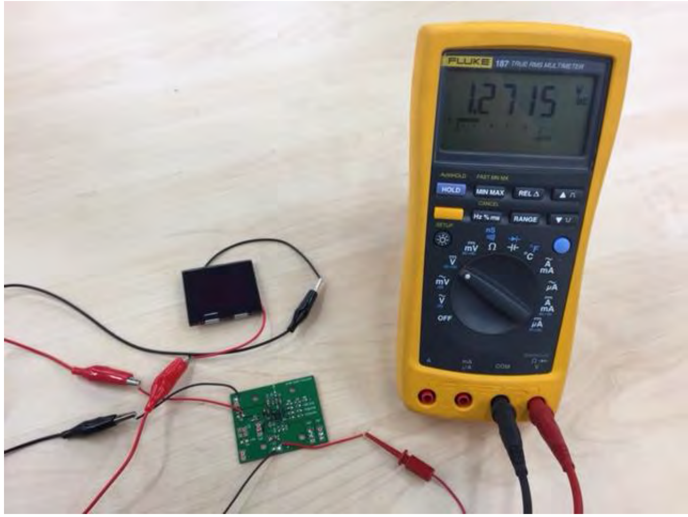
- それぞれのOPAMPの出力をArduinoのADC(12bit 0～5V)へ入力

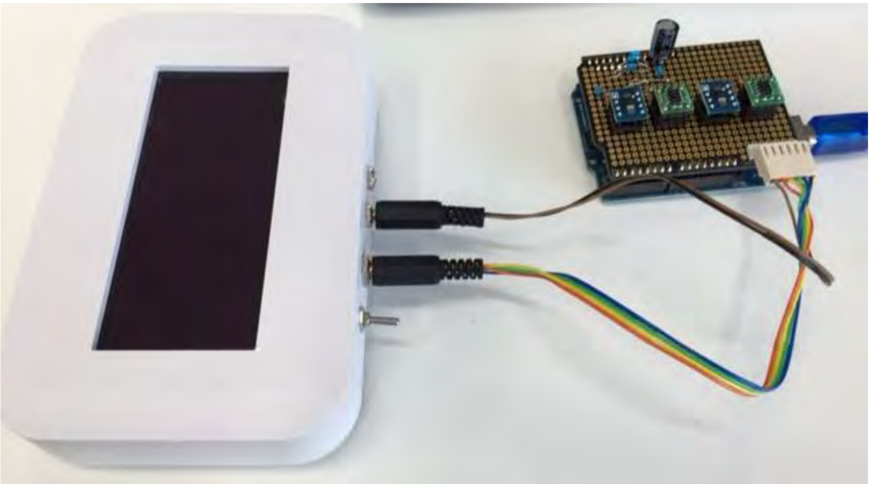
Analog Devices Proprietary Information ©
ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™

ADP5091の基板設計 – 基板の製造









Analog Devices Proprietary Information ©

ANALOG DEVICES
想像を超える可能性を
AHEAD OF WHAT'S POSSIBLE™