

エネルギーハーベスト技術

群馬大学大学院 理工学府 電子情報部門

小林春夫

koba@gunma-u.ac.jp



Kobayashi
Laboratory



群馬大学
GUNMA UNIVERSITY

エネルギーハーベスト技術とは

エネルギーハーベスト技術 (Energy Harvesting Technology)
環境発電

環境から微小エネルギーを収穫(ハーベスト)して
電力に変換する技術

光・熱/温度差・振動・電波などの環境中エネルギーを活用
電力に変換する技術

充電・交換・燃料補給なしで 長期間エネルギー供給可能な電源

工学的に永久機関を実現すると解釈可

環境から微小エネルギーを収穫(ハーベスト)

エネルギーハーベスト

さまざまなエネルギー源から得られる電力

| エネルギー源 | 特長 | 発電能力 |
|--------|-------------|--------------------------|
| 光 | 屋外 | 100 mW/cm ² |
| | 屋内 | 100 μW/cm ² |
| 熱 | 人体 | 60 μW/cm ² |
| | インダストリアル | ~1-10 mW/cm ² |
| 振動 | ~Hz-人体 | ~4 μW/cm ³ |
| | ~kHz-機械 | ~800 μW/cm ³ |
| RF | GSM 900 MHz | 0.1 μW/cm ² |
| | WIFI | 0.001 μW/cm ² |



① 光エネルギー(光発電)

太陽光, 室内電灯(白熱灯, 蛍光灯, LED)から
エネルギーを取り出し電力に変換.

太陽電池は, 電力を蓄える装置ではなく,
太陽の光エネルギーを電力に変換する「発電機」.

太陽からの「光エネルギー」が「太陽電池」に当たると,
「光電効果」現象が起こり. 光が照射され
太陽電池を構成している半導体の電子が動き, 電気が生成

② 熱エネルギー（熱電発電）

地中の熱, 体温等から熱電素子等を用いて
エネルギーを取り出し電力に変換する.

熱電発電: 熱エネルギーを使用する発電技術

モーター, エンジン, 機械の発する熱エネルギー,
ビルや工場の配管等から発する熱エネルギーを採取し,
電力を得る

ゼーベック効果による熱電変換素子, アルカリ金属熱電装置,
熱電子発電装置, PETE素子などの熱電素子をもちいて
熱エネルギーを電力エネルギーに変換

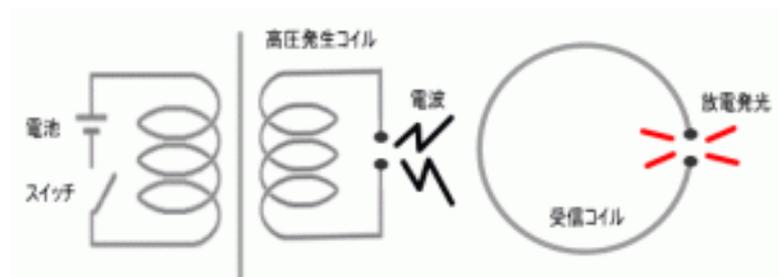
③ 振動エネルギー(振動発電)

電磁誘導, 圧電, 静電誘導,
日常生活・交通機関の振動/圧力, 歩行振動により
振動面に発生する圧力を圧電素子を用いて
電力変換

④ 電磁波エネルギー(電磁波発電)

テレビ, ラジオ, 携帯電話等の電波エネルギーを採取し, 電力を得る.

電波の存在を証明したヘルツの実験



高圧発生コイルに誘起された高電圧の電気が
ギャップ部分で放電し電波を発生

得られた電力エネルギーをバッテリーに蓄えたり, 照明に利用できる.

磁場発電: 電力線の漏れ磁束を使用して発電

エネルギーハーベスト技術の利点・課題

利点:

- ① 電池の交換が不要なので環境に優しい.
1次電池の交換, 配線, メンテナンスが不要になる
- ② 一度設置すれば(故障しない限りは)
半永久的に使用できる.

問題点・課題:

- ① 発電効率, 発電量が低いので用途が限られる.
- ② 安定的に電力を供給できるシステムを
実現するのが難しい.

- ① **創エネ:**
エネルギー源を検出して電力を発生させる.
- ② **蓄エネ:**
収穫した電力を電源回路で変換して
コンデンサや2次電池に蓄える.
- ③ **省エネ:** たまった電力を使って
制御マイコンやセンサを起動する.
- ④ **給電:** 処理した情報を無線送受信によって
外部に伝達する.

エネルギーハーベスト技術は何に使えるのか ¹⁰

- 環境発電で得られる電力
 $\mu\text{W} \sim \text{mW}$ オーダー
- パソコン/携帯電話を動かすことは困難
- 小型の電子部品/電子機器は動作可.

ソーラー電卓やソーラー腕時計

エネルギー源と応用

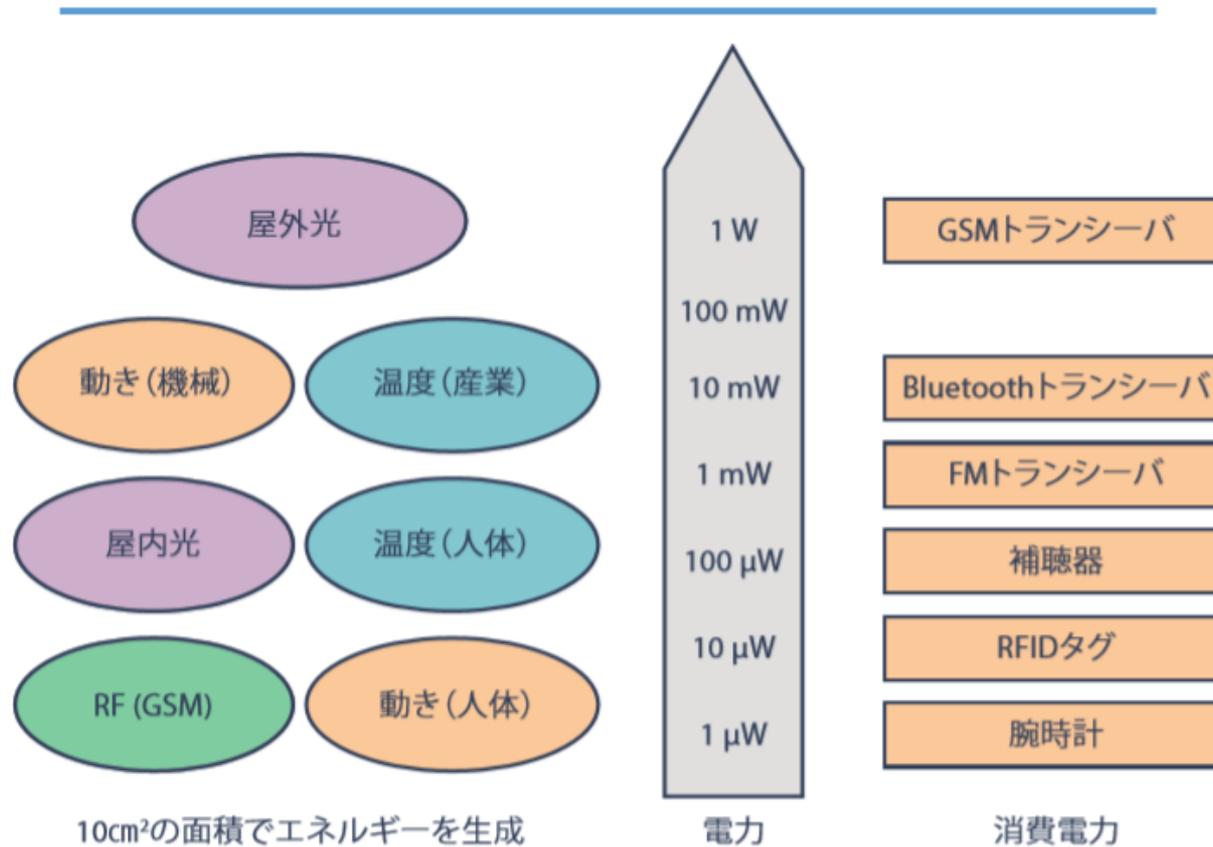


図2. エネルギー源の種類、
各種アプリケーションの消費電力

実用化されているものの例

照明を点灯／消灯させるリモコンスイッチ

照明のリモコンスイッチには
照明器具へ点灯や消灯の信号を伝えるために
電力が必要

通常のリモコンスイッチでは電池等で電力を供給
環境発電を利用すると、
人がスイッチを押す圧力を電力変換し利用可

センサへの環境発電の適用： 実証段階のものがほとんど

事例としては道路や橋のヘルスマモニタリング

人手点検やコスト減のため

多数のセンサを道路や橋に設置

その歪みや傾き, 温度等をセンシングし劣化状況を判断

このセンサの電源に, 道路や橋の振動を電力に変換する
エネルギーハーベスト技術が適用

その他のエネルギーハーベスト使用センサ

- 自動車のタイヤの空気圧モニタリング
- 農業分野での気象や土壌のモニタリング
- ヘルスケア分野での生体データのモニタリング

タイヤの空気圧が一定値を下回るとアラームを出す

センサはタイヤに装着する必要があるため、
ケーブルを使って電力を供給することはできない。

電源としてタイヤの振動を利用

腕時計型血圧計のような
ウェアラブルタイプのヘルスケア機器の電源



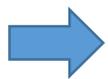
外気と体温の温度差を利用する試み

電池使用システムとの比較

多数のセンサの電源に電池を使用

- 電池交換に多大な手間とコスト
- 交換廃棄する電池の数も多大

- 道路、橋で使用するセンサ
- その設置場所で交換に危険を伴う
- 微弱電力でも駆動が可能
- 配線を引くのが困難
- センサの数が多い
- 人が近づきにくい場所で使用



エネルギーハーベスト技術の適用が有効

センサネットワークへの応用

エネルギーハーベスト技術で得られたエネルギーを
センサネットワークの電源への使用

センサネットワークを構築する際に配線が問題



信号線と電源線を不要にし、ケーブルなしが理想



エネルギーハーベスト技術との融合により、
配線/電池交換から解放され、
センサネットワークシステムの完成形へ

構成要素

- エネルギーハーベスティングデバイス
- 蓄電デバイス
- センサデバイス
- 無線モジュール
- 電源制御回路
- 制御ソフトウェア

エネルギーハーベスティング・ワイヤレスセンサの実現



消費電力が非常に小さな無線モジュールが必須

EnOcean 社

独シーメンス社から2001年にスピンオフ(本社:ドイツーミュンヘン)
最も活発で「エネルギーハーベスト産業分野で独り勝ち」との評
エネルギーハーベスティングデバイス/モジュールの開発, 製造, 販売を業務

エネルギーハーベストによる無線通信「EnOcean通信」を確立
ISO/IEC 14543-3-10 国際標準規格の通信

EnOceanのエネルギーハーベスティング無線センサ技術を
ビルの省エネ化, セキュリティ, 快適性向上のソリューション推進のために
EnOceanアライアンスを設立

世界の関連企業が集まり, 2008年に設立. アライアンスの目的
EnOcean無線通信技術の国際標準化の推進
OEMメーカー間の製品互換性確保

エネルギーハーベスト コンソーシアム

優れた要素技術を有している日本企業のを結集

エネルギーハーベスティング技術で

欧米に遅れている研究開発・実証, 蓄電技術や無線技術等と統合した
完成度の高い製品の商品化・実用化に向けた活動を推進



[A ENGLISH](#)

[📄 サイトマップ](#)

[📧 お問い合わせ](#)

Google カスタム検索

[🔍 検索](#)

[エネルギーハーベスティングとは](#)

[技術事例](#)

[EHCについて](#)

[活動概要](#)

[会員企業一覧](#)

[入会のご案内](#)

A banner image for the Energy Harvesting Consortium. It features a composite background: on the left, a city skyline at night with lights; on the right, a person in a suit walking, with a large green leaf and glowing particles overlaid. The text "Energy Harvesting Consortium" is centered in a green font.

Energy Harvesting Consortium

身の回りの小さなエネルギーを、未来の大きな可能性に。

様々な企業が取り組んでいる。

米国 NASAからスピノフしたPulse Switch 社
フランスSchneider Electric社、ミツミ電機、村田製作所、アルプス電気
富士通研究所、パナソニック、レクテナ、ローム、産総研。。。

- エネルギーハーベストチップセットメーカー（半導体メーカー）
 - アナログデバイセズ社
 - リニアテクノロジー社（現 アナログデバイセズ社）
 - テキサスインスツルメンツ社

米国メーカーが主体であるが、「売り上げを確保するのはこれから」の状況

日本の電源関係メーカーの製品開発技術者・経営者と話をすると、
エネルギーハーベスト電源関係技術の仕事は全く来ていない、
この言葉すら知らない

この技術は何かを紹介して欲しい
という話が多い（実用化とはかなり差がある）。

現時点での環境発電分野の最大の専門国際会議

International Conference on Micro and Nanotechnology
for Power Generation and Energy Conversion Application
(PowerMEMS国際会議)

日本では組み込み展が

エネルギーハーベスティング技術関係技術・製品の大きな展示会

ISSCC論文をもとに エネルギーハーベスト電源回路の調査

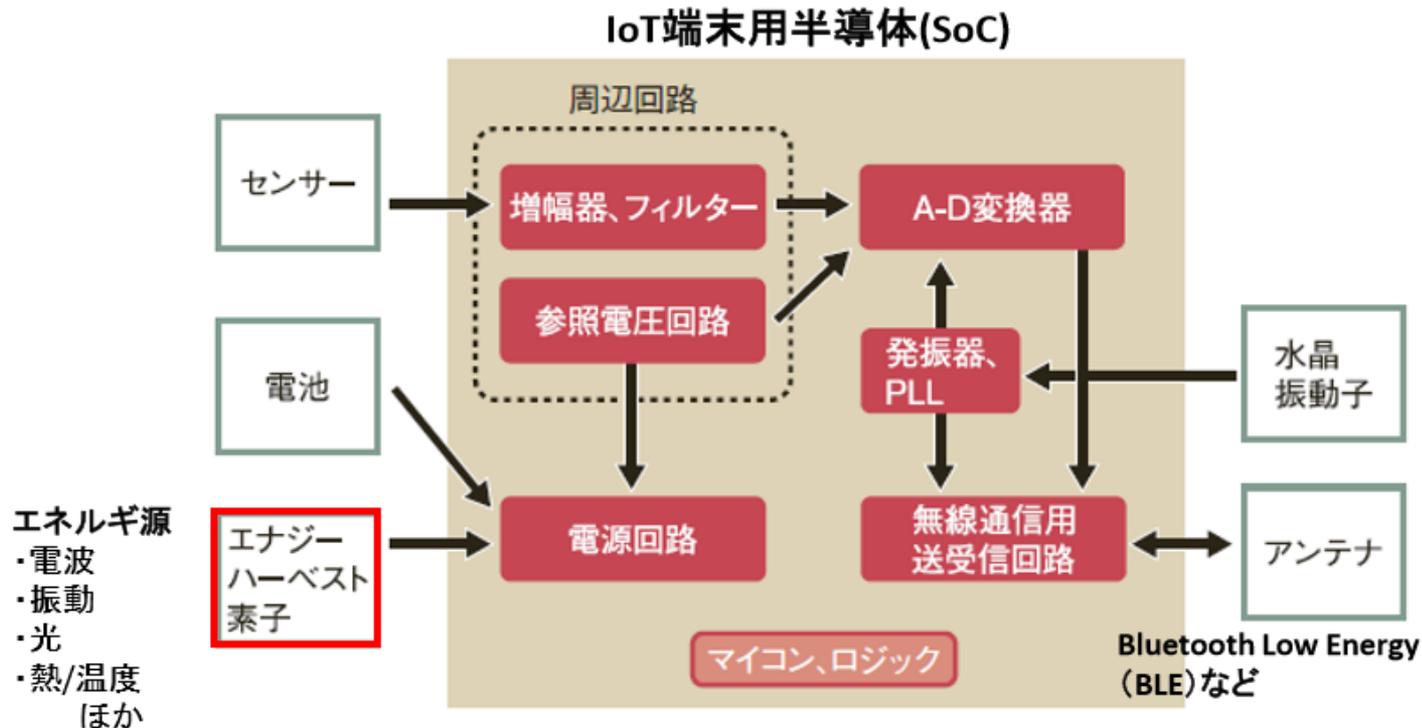
ISSCCではエネルギーハーベスト電源回路と(比較的小規模電力の)

ワイヤレス電力伝送が一緒のセッション多し。両者は関連深い技術

IoT端末用半導体

IoT端末用半導体SoC

- ・SoC(アナログ回路+マイコン+通信機能搭載)は、低消費電力/低価格が重要
- ・電源は電池かエネルギーハーベスト。電池駆動では1年以上の稼働が求められる
エネルギーハーベスト(環境発電)では、振動、熱、光、電波などがエネルギー源



IoT とエネルギーハーベスト(中谷先生資料)

電源
EH

IoT 端末用電源: エネルギーハーベスト

エネルギーハーベストの発電能力

エネルギーハーベスト源により得られる発電電圧や波形は、DC、AC、離散AC(パルス)と様々。
各エネルギーハーベストにあったパワーマネジメント(電源制御)が必要

| エネルギー源 | 特長 | 発電能力 |
|--------|-------------|--------------------------|
| 光 | 屋外 | 100 mW/cm ² |
| | 屋内 | 100 μW/cm ² |
| 熱 | 人体 | 60 μW/cm ² |
| | インダストリアル | ~1-10 mW/cm ² |
| 振動 | ~Hz-人体 | ~4 μW/cm ² |
| | ~kHz-機械 | ~800 μW/cm ² |
| RF | GSM 900 MHz | 0.1 μW/cm ² |
| | WiFi | 0.001 μW/cm ² |

<http://ednjapan.com/edn/articles/1312/02/news007.html>

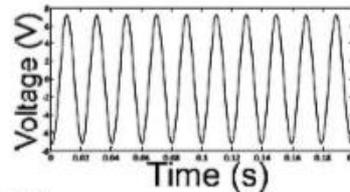
キネティックエネルギーハーベスト

- ・振動: 1Hz~500Hz(機械振動)
- ・動き: <2Hz(ウォーキング)
- ・ショック: 1g~10g(ウォーキング)
- ・水流: 1ℓ/分~50ℓ/分

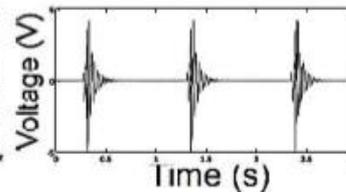
Periodic
(machine vibrations)



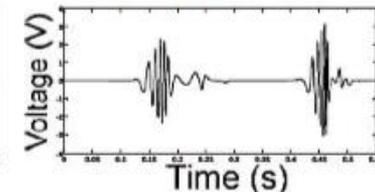
[Reintjes]



Shock
(heel strike)



Non-resonant
(leg swing motion)



発電波形

電源
EH

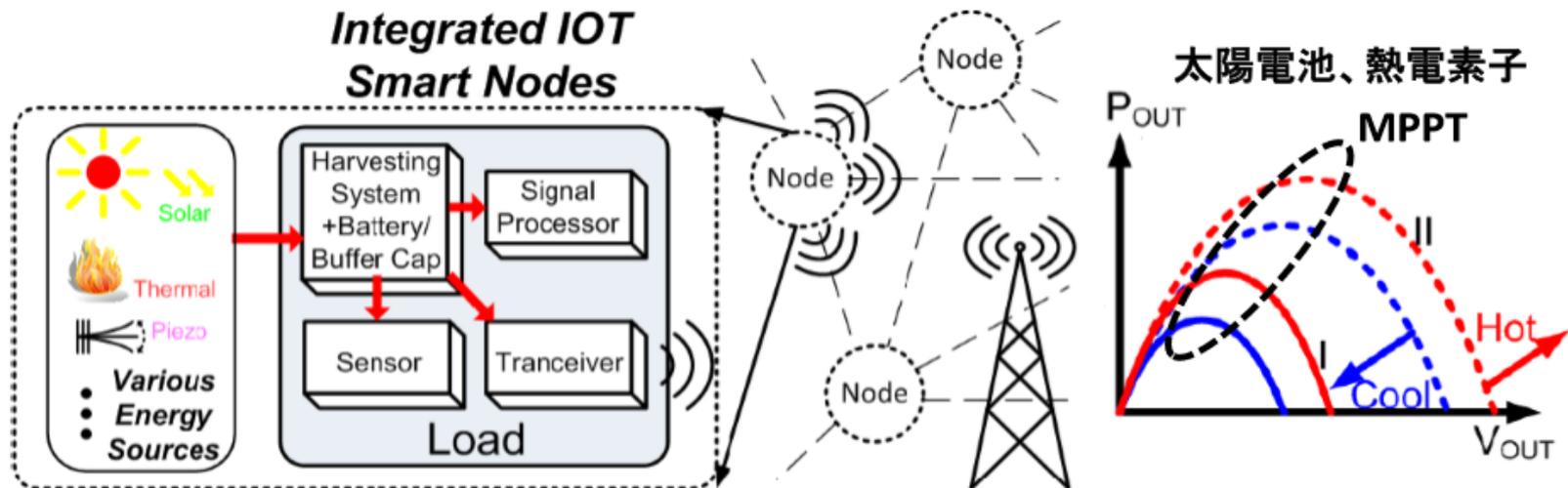
エネルギーハーベスト用パワーマネジメント

IoT端末用電源として、バッテリーレスとするエナジハーベスト技術が注目されている
 エナジハーベストでは、エネルギー源(変換センサ)以外にもパワーマネジメント技術が重要

最近のISSCCエネルギーハーベスト関連論文での研究開発フォーカスポイント

- ・幅広い入力電圧レンジに対して、高い変換効率と低い待機電力化の実現
- ・外付け部品(インダクタやキャパシタ)低減やオンチップ化
- ・昇圧回路にインダクタ使用せず、キャパシタ回路(SCやCP回路など)による昇圧回路技術
- ・低いコールドスタート電圧化(バッテリーレスでエネルギーハーベストからの低電圧で動作開始)
- ・MPPT(Maximum Power Point Tracking:最大電力点追従)の最適化

SC:スイッチドキャパシタ
 CP:チャージポンプ



IoT とエネルギーハーベスト(中谷先生資料)

電源
EH

低入力電圧エネルギーハーベスト用PMICの例

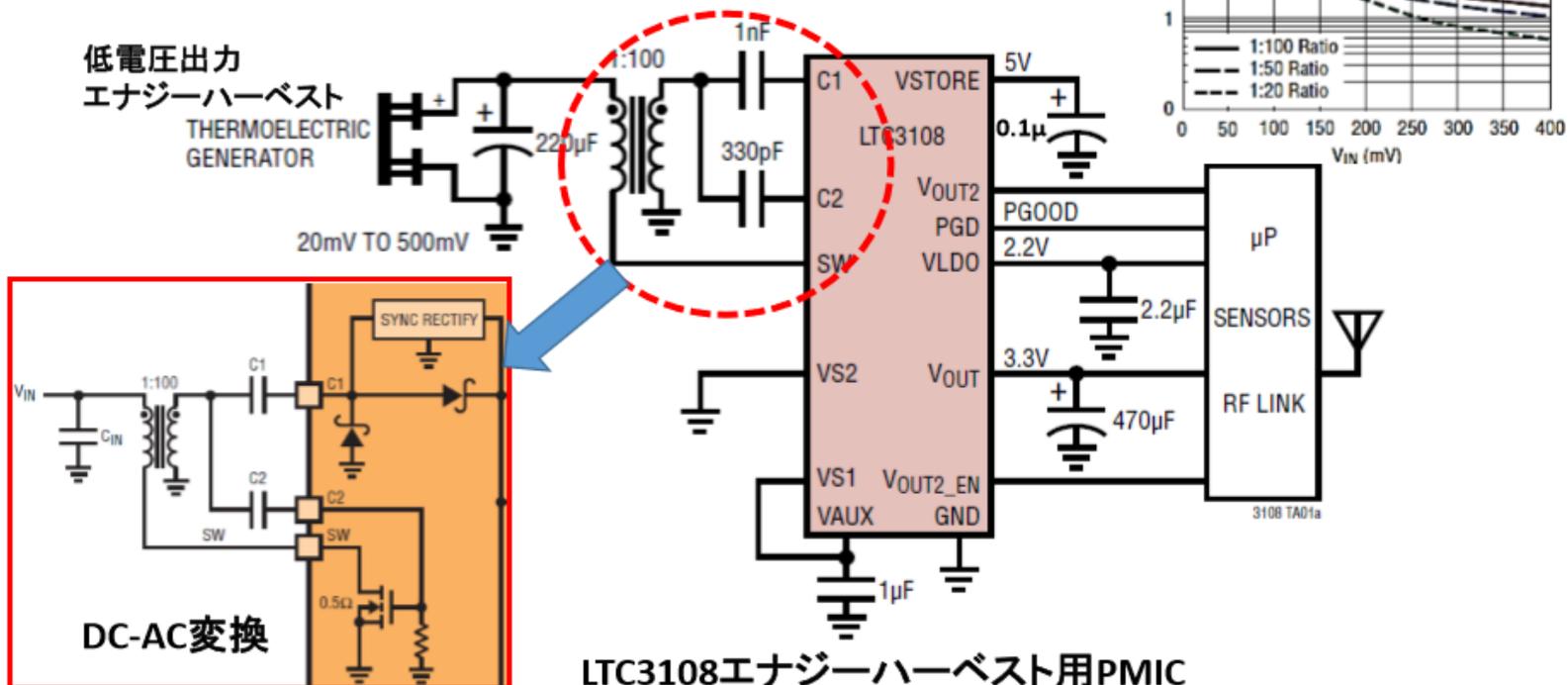
Linear Technology(LTC)LTC3108

20mVの低入力電圧でコールドスタート可能

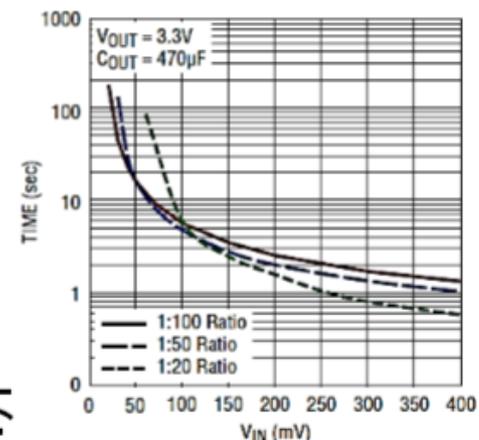
- ・巻き線比1:100の外部トランスとIC入力部のFETスイッチでDC-AC変換し昇圧
- ・入力電圧レンジ20m~500mV(1:100トランスにて)

低電圧出力
エネルギーハーベストTHERMOELECTRIC
GENERATOR

20mV TO 500mV



Vout出力時間 vs 入力電圧



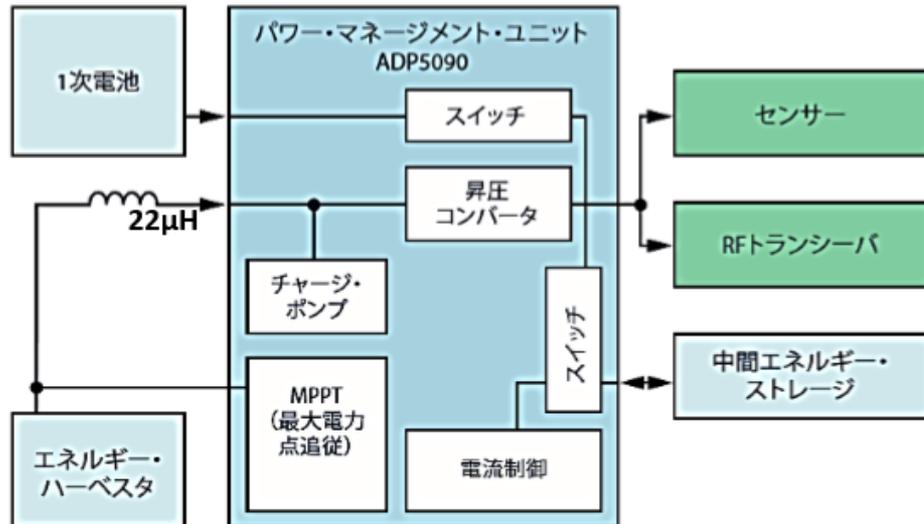
電源
EH

超低消費電力エネルギーハーベスト用PMIC

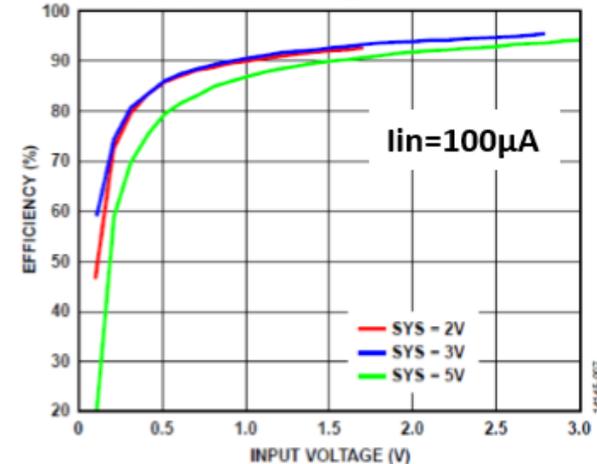
Analog Devices(ADI) ADP5091

外部インダクタとIC内回路による昇圧型DC-DCコンバータ

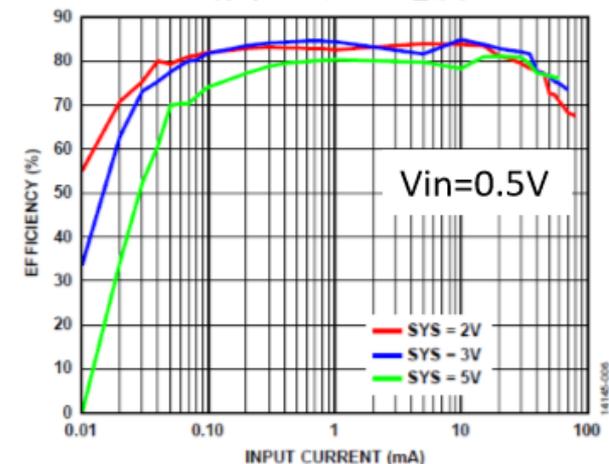
- ・スリープ静止電流は390nA
- ・コールドスタート時の入力電力は6 μ W
- ・380mVからの高速コールドスタート
一度起動すれば、+80mV~3.3Vの入力電圧で動作維持
- ・出力電圧+1.5~3.6V(設定)、最大出力電流150mA
- ・MPPT制御機能搭載



効率 vs 入力電圧



効率 vs 入力電流



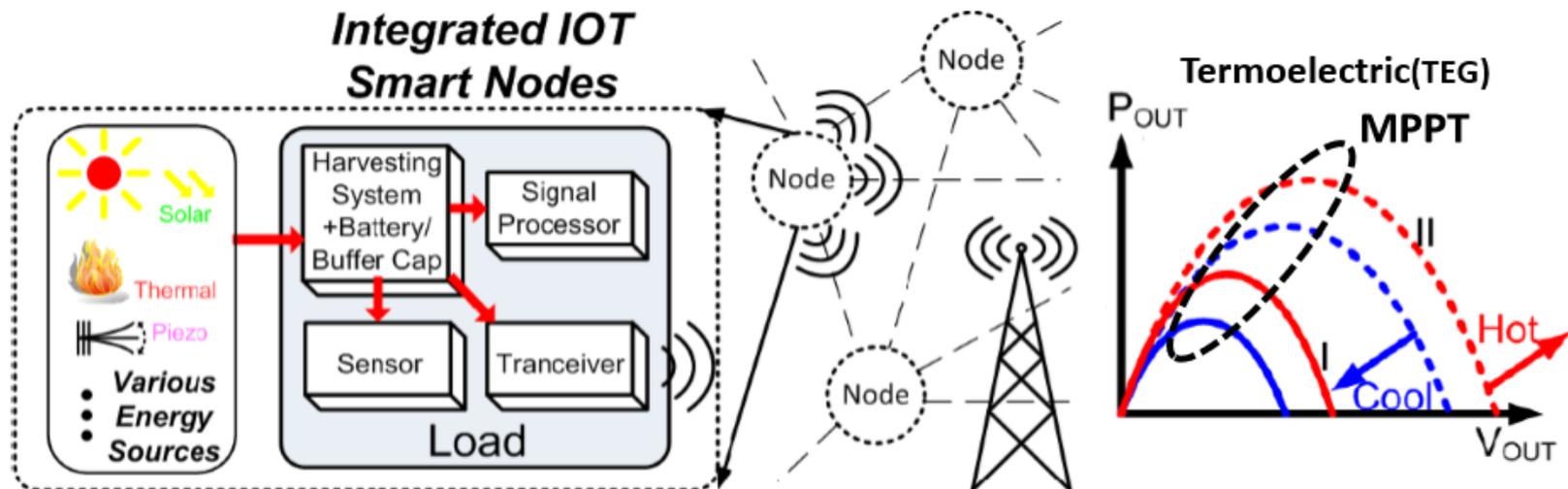
IoT端末用電源: エナジーハーベスト

IoT端末用電源として、バッテリーレスとするエナジーハーベスト技術が注目

エナジーハーベストでは、エネルギー源(センサ)以外にもパワーマネジメントIC技術(PMIC)が重要

最近のISSCCエナジーハーベスト関連論文での研究開発フォーカスポイント

- ・幅広い入力電圧レンジに対して、高い変換効率と低い待機電力化の実現
- ・外付け部品(インダクタやキャパシタ)低減やオンチップ化
- ・昇圧回路にインダクタ使用せず、キャパシタ回路(SCやCP回路など)による昇圧回路技術
- ・低いコールドスタート電圧化(バッテリーレスでエナジーハーベストからの低電圧で動作開始)
- ・MPPT(Maximum Power Point Tracking:最大電力点追従)の最適化



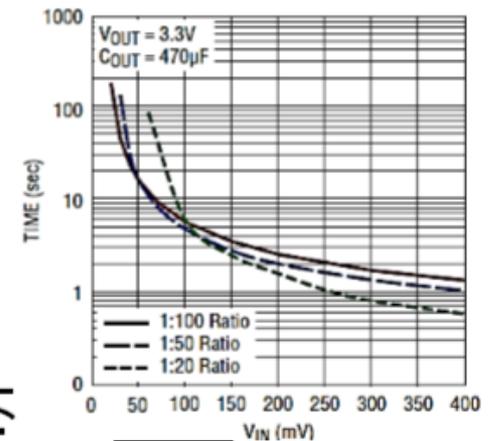
低入力電圧エネルギーハーベスト用PMIC

Linear Technology(LTC)LTC3108

20mVの低入力電圧でコールドスタート可能

- ・巻き線比1:100の外部トランスとIC入力部のFETスイッチでDC-AC変換し昇圧
- ・入力電圧レンジ20m~500mV(1:100トランスにて)

Vout出力時間 vs 入力電圧

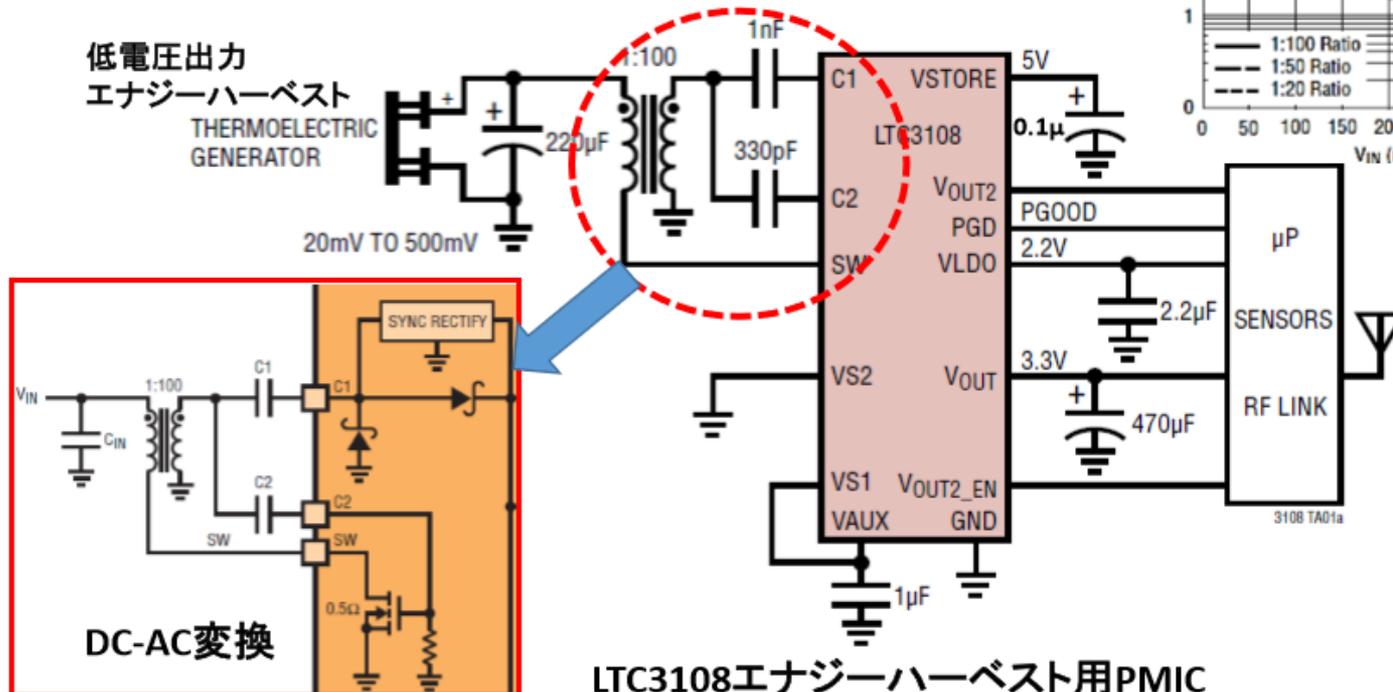


低電圧出力

エネルギーハーベスト

THERMOELECTRIC
GENERATOR

20mV TO 500mV



DC-AC変換

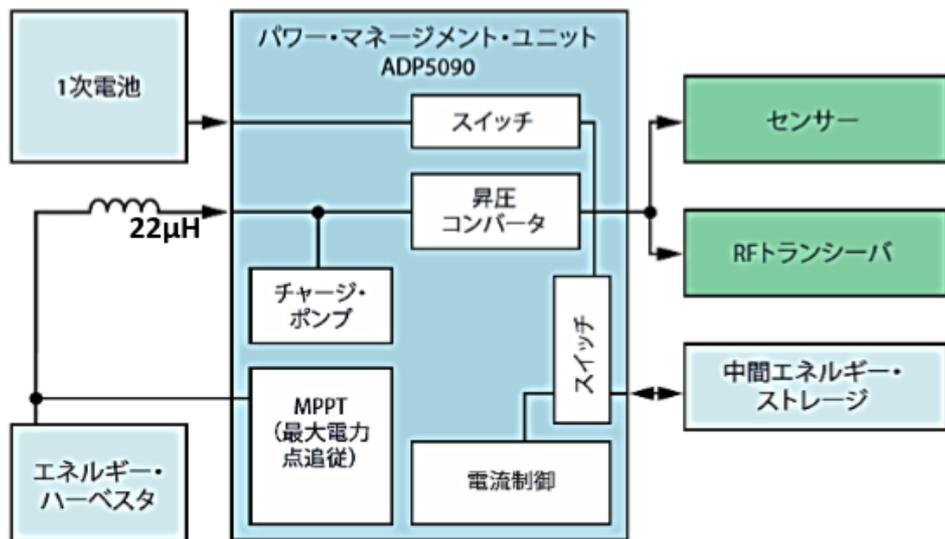
LTC3108エネルギーハーベスト用PMIC

超低消費電力エネルギーハーベスト用PMIC

Analog Devices(ADI) ADP5091

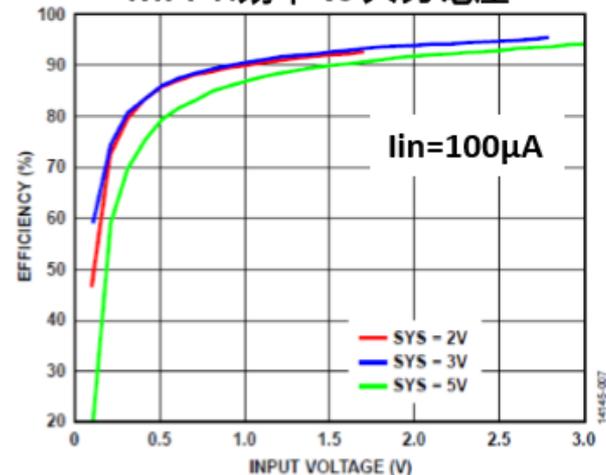
外部インダクタとIC内回路による昇圧型DC-DCコンバータ

- ・スリープ静止電流は390nA
- ・コールドスタート時の入力電力は6 μ W
- ・380mVからの高速コールドスタート
 - 一度起動すれば、+80mV~3.3Vの入力電圧で動作維持
- ・出力電圧+1.5~3.6V(設定)、最大出力電流150mA
- ・MPPT制御機能搭載

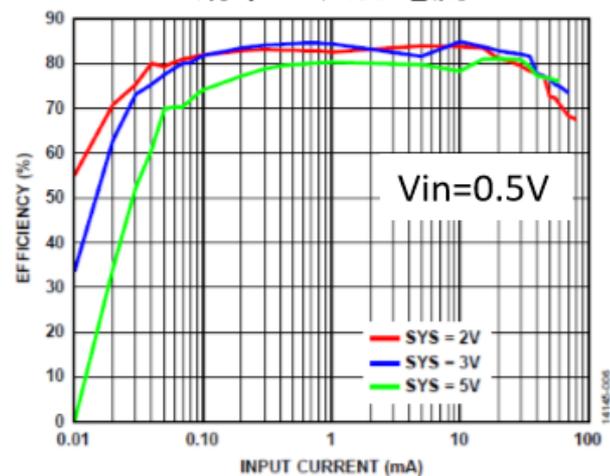


ADP5091 datasheet Analog Devices

MPPT:効率 vs 入力電圧



効率 vs 入力電流



IoT とエネルギーハーベスト(中谷先生資料)

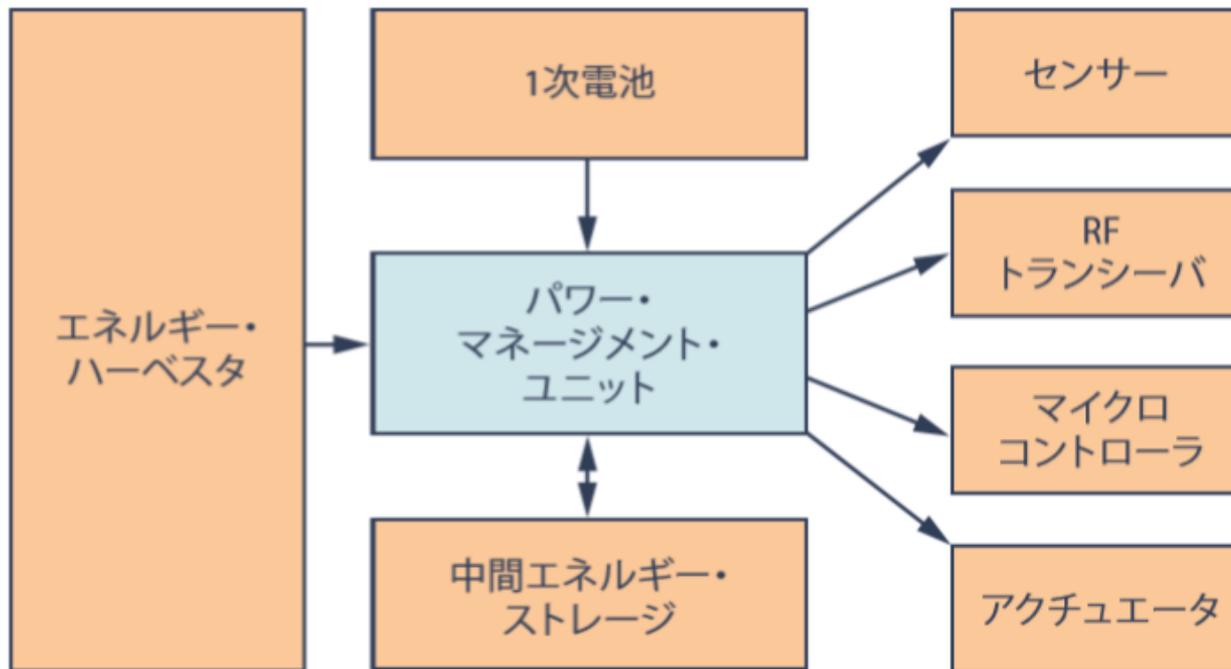


図1. エネルギー・ハーベストを適用したシステムの例

IoT とエネルギーハーベスト(中谷先生資料)

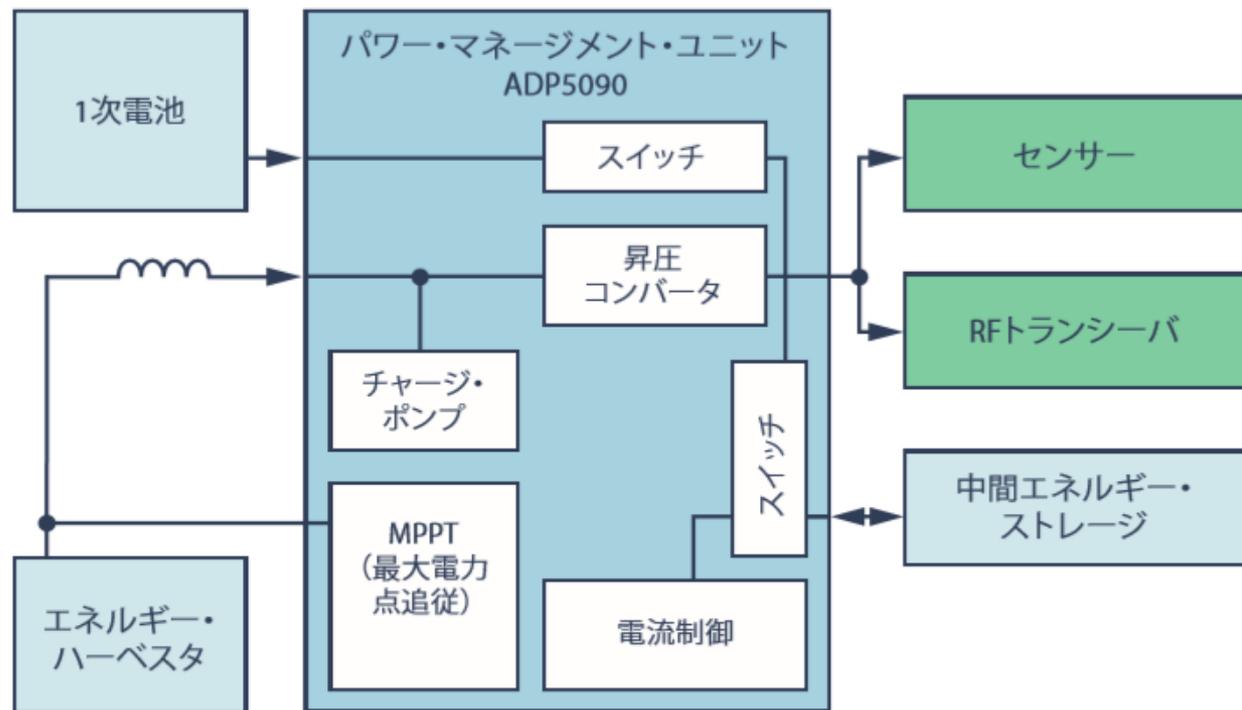


図3. エネルギー・ハーベスト向け
パワー・マネジメントICのブロック図

IoT とエネルギーハーベスト(中谷先生資料)

MPPT:
Maximum Power Point Tracking

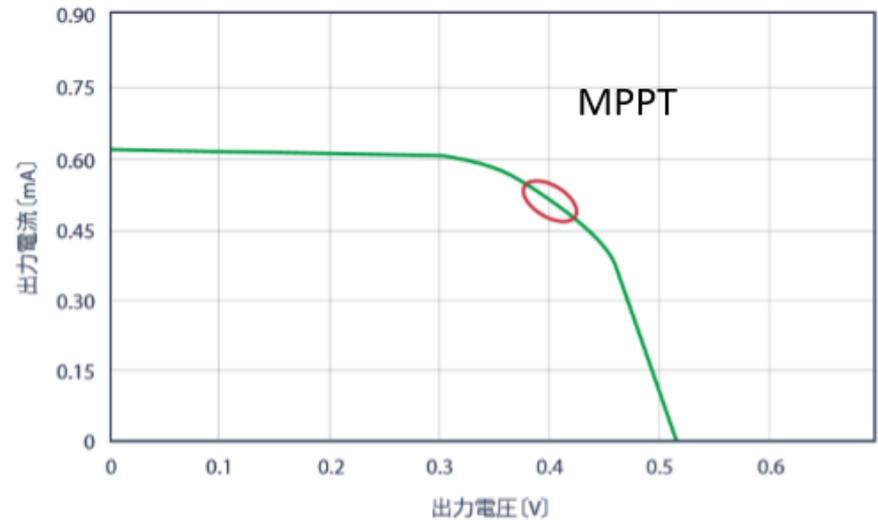


図5. 太陽電池の電圧/電流特性

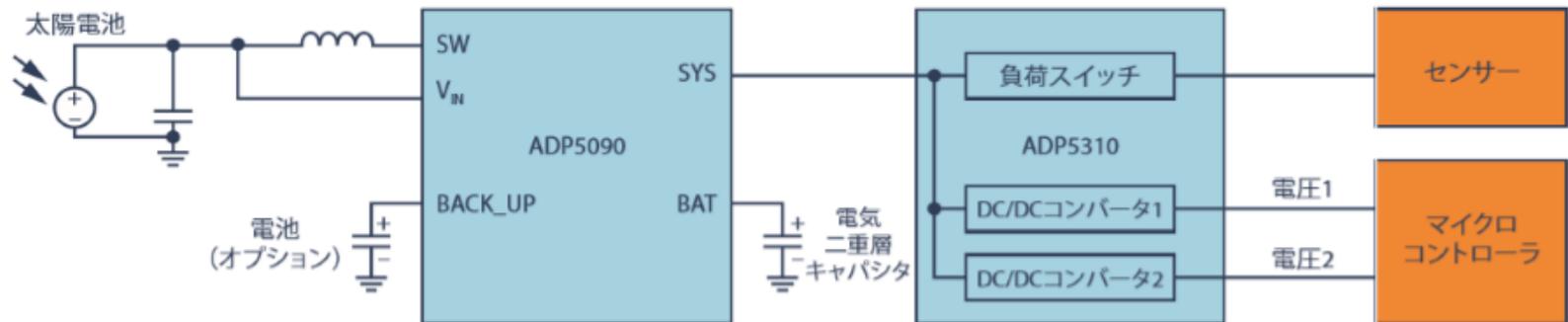


図6. エネルギー・ハーベスト向けパワー・マネージメント・システムの例

多種多様なエネルギー・ハーベストICを用意

課題

電源は重要

ニーズ

最小の消費電力ソリューション

TI のソリューション

ハーベスト・エネルギーを直接電源として利用

電源管理 &
高精度アナログIC



低消費電力マイコン



低消費電力ワイヤレス・
コネクティビティ



エネルギー・ハーベスティングによりバッテリー使用時間を延長

光



振動



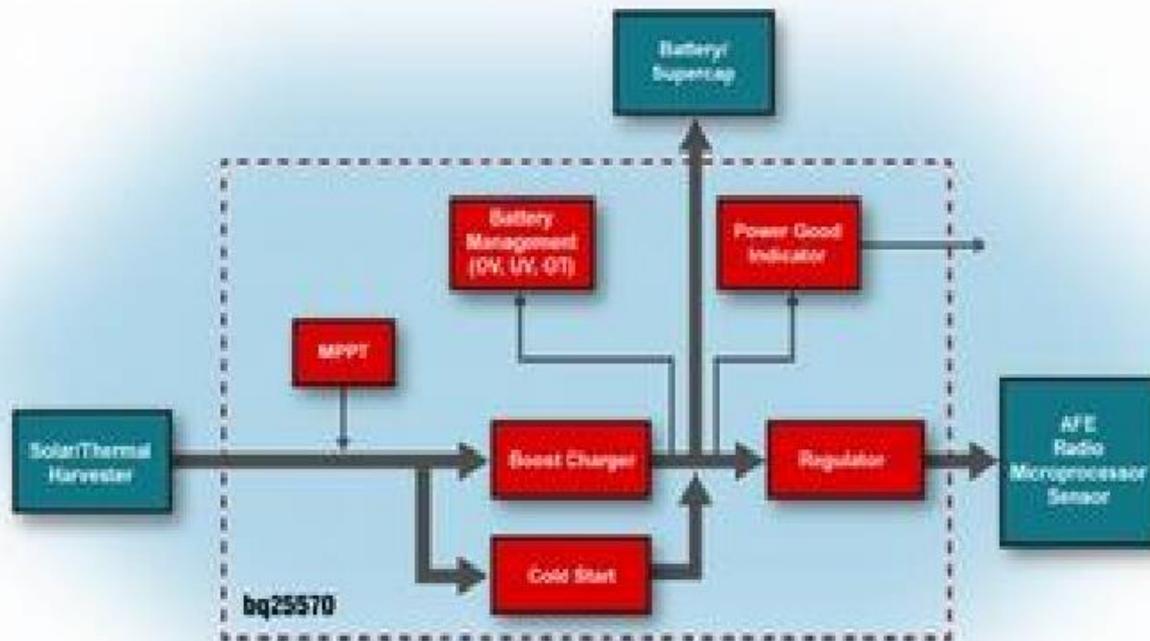
熱



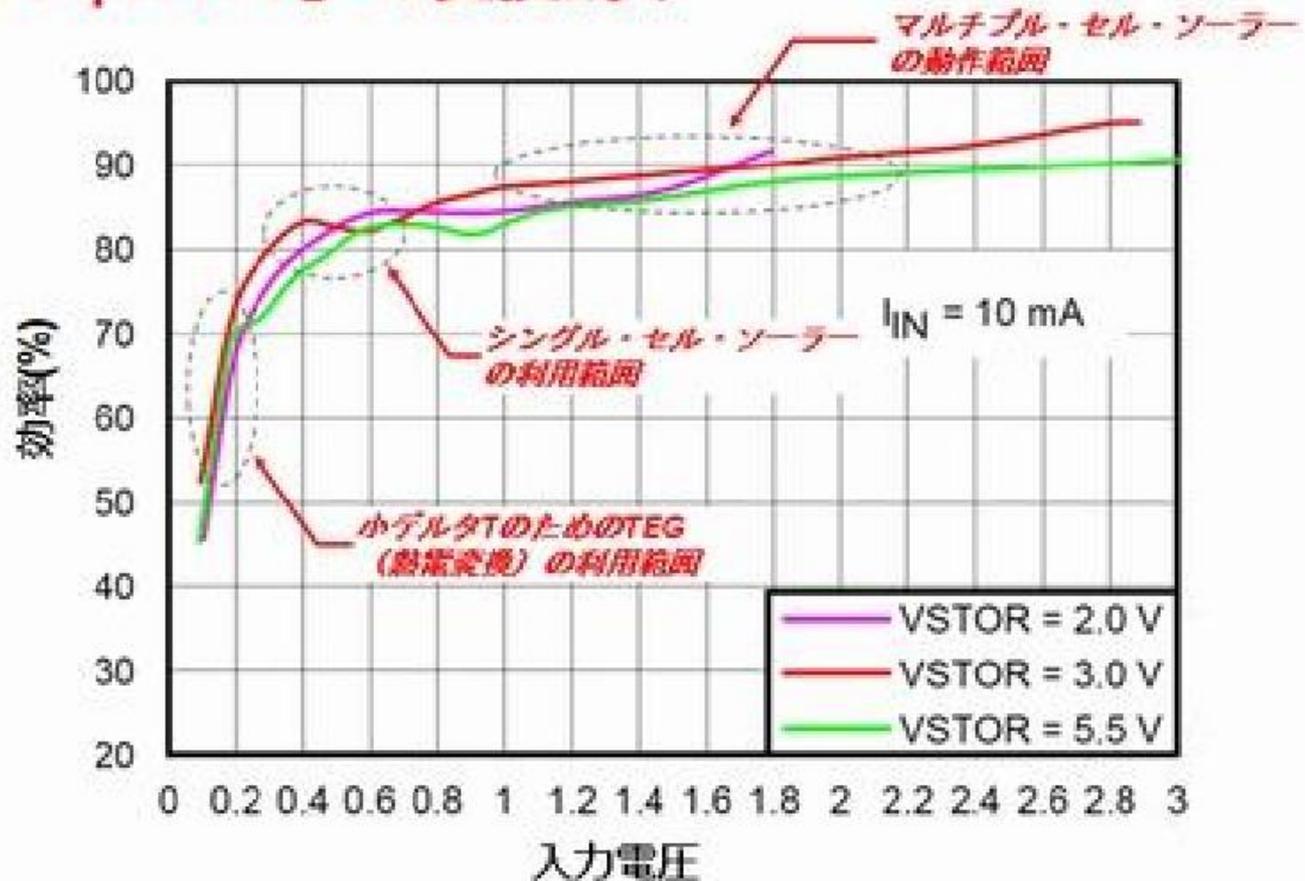
RF



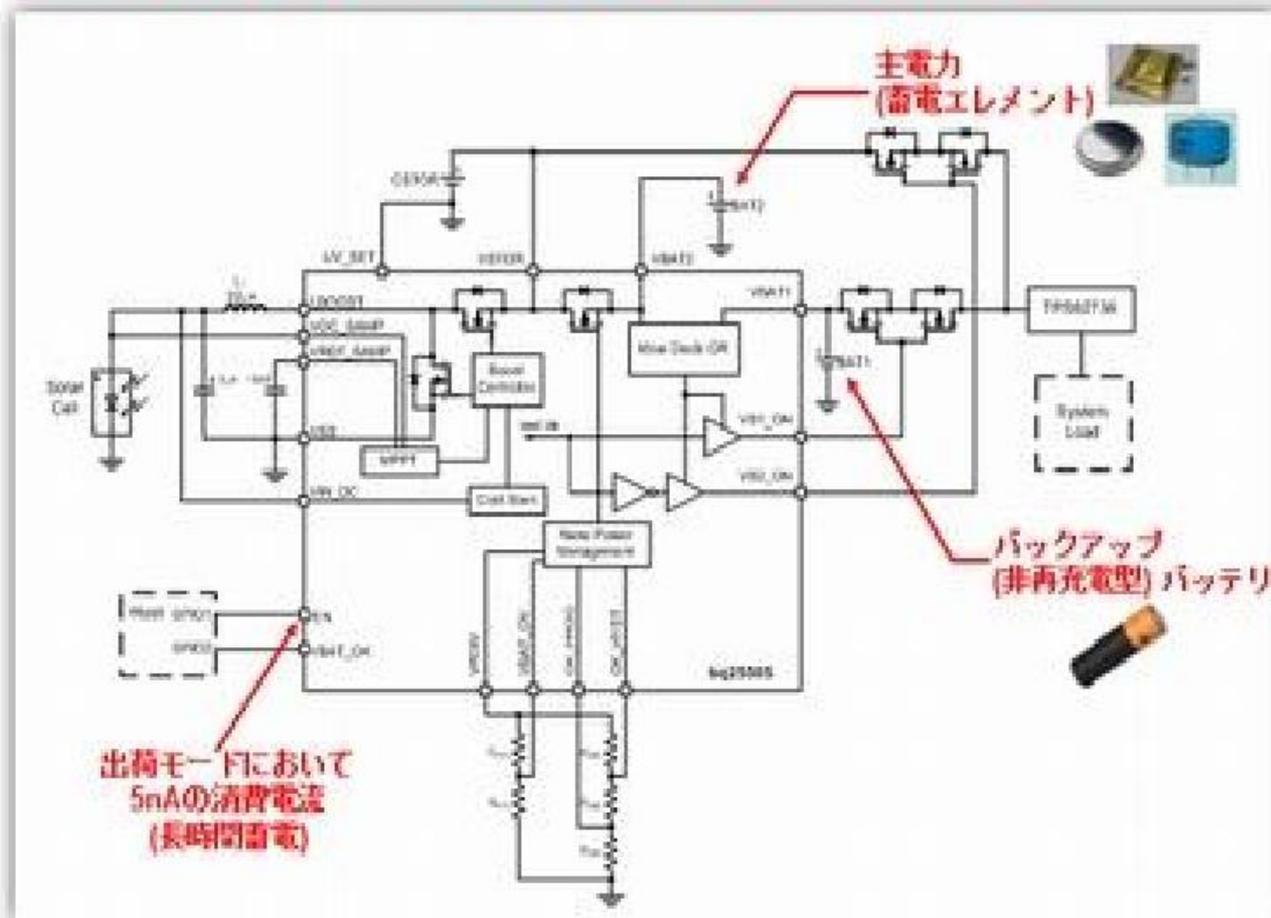
昇圧型充電回路と降圧型レギュレータを搭載



「bq25570」の変換効率



バックアップ用に1次電池を接続できる



まとめ ①

- エネルギーハーベスト技術は産業界で
欧州企業EnOcean社がトップを走っている.
- 米国半導体メーカー(ADI, LT, TI社)が
エネルギーハーベスト電源チップセットを開発・販売
大きな市場獲得はこれから
- 日本では国内企業の「エネルギーハーベスト コンソーシアム」の
設立・活動等により欧米を追撃
実際のビジネスへの普及はまだ時間がかかる印象
- 様々な企業なエネルギーハーベスト技術の研究開発・産業化を
行っているが, 本格的な普及はこれから

まとめ ②

- ISSCC では2013年-2018年の間
エネルギーハーベットのセッション
毎年8-10件程度の発表
- バッテリー充電、ワイヤレス給電、
生体内使用のシステム、可視光通信等、
エネルギーハーベスト応用に適したシステムの電源回路技術の発表が多い。
- 欧米、台湾、韓国、シンガポールの大学・企業からの発表が主。
日本からの発表は「なし」
- 様々な応用に対して回路技術的なアイデアがどんどん出ている
萌芽から成長の段階
- 回路規模は大きくないので、大学の回路系研究室で取り組むには
良い研究テーマ(アイデアで勝負できる)

結 論

- エネルギーハーベスト技術は将来的に重要であるが普及には多くの技術的課題あり
- その研究開発は研究所・大学で取り組むのに適している。