

SAC SIS 2013
チュートリアル講演

コンピュータシステムのための エネルギーハーベスティング技術

京都大学大学院情報学研究科

石原 亨

ishihara@i.kyoto-u.ac.jp

<http://www.vlsi.kuee.kyoto-u.ac.jp/~ishihara>

講演内容

□ 背景

- ✓ エナジーハーベスティング
- ✓ ワイヤレスセンサネットワーク

□ 技術紹介

- ✓ 電圧コンバータの特性
- ✓ エナジーストレージ
- ✓ 電圧変換ロスの低減技術

□ 将来展望

エネルギーハーベスティング

- 環境から電気エネルギーを採取する技術
- 環境発電あるいは Energy Scavenging ともいう

最大100mW, 平均10mWを発電



出典: Parasitic Power Shoes Project @ MIT
<http://resenv.media.mit.edu/power.html>

振動により約200 μ Wを発電



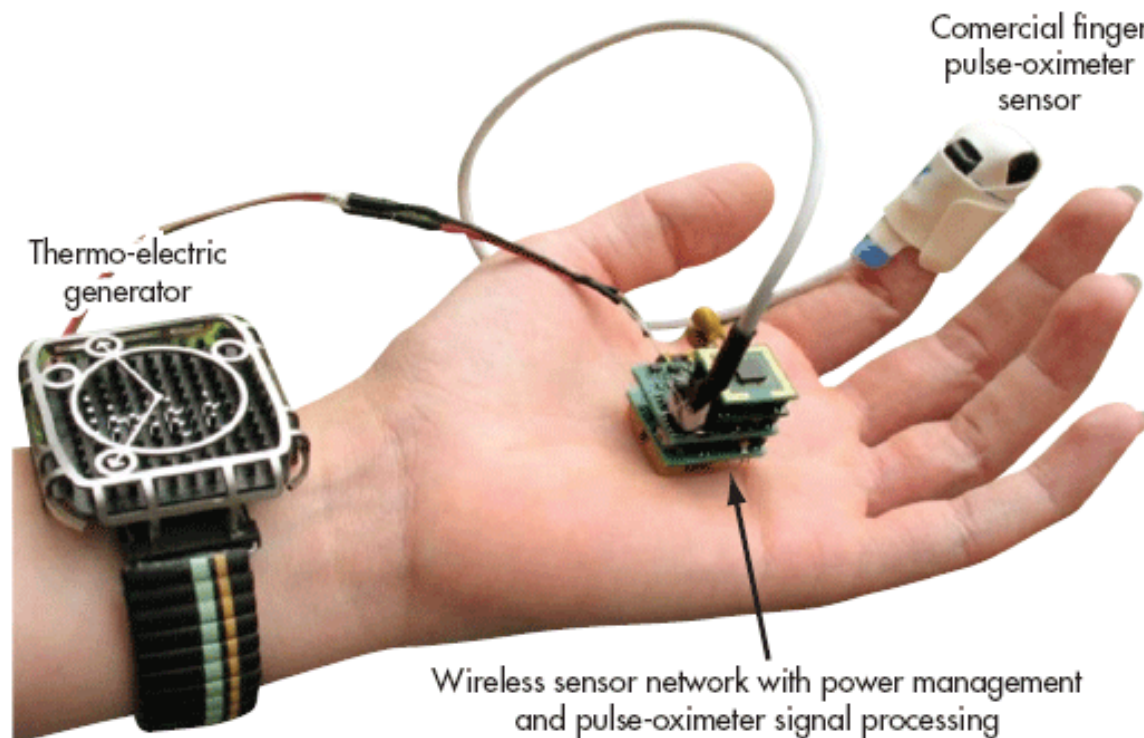
University of Michigan Piezoelectric Energy Harvester, Image Credit: Erkan Aktakka

なぜエネルギーハーベスティング？

- いつでも、どこでも、すぐに、安価に
 - ✓ 携帯機器の連続駆動時間を延長可能
 - バッテリーの連続使用時間が製品価値を左右
 - ✓ センサ機器のコスト削減
 - 無線通信アクセスポイントや監視カメラの敷設工事は数万円(カメラ自体は数千円)
 - 車載機器では暗電流の削減が重要課題
- スマート **
 - ✓ 化石燃料と温室効果ガスの消費量削減
 - ✓ スマートセンサやスマートメータの利用
 - スマートハウス、スマートデータセンタなど

ワイアレスセンサネットワーク

- 2000年代ころから欧米を中心にブーム
- マイクロワットクラスのアプリケーション



出典: Prof. Stephen Wilson
San Francisco State University
Art Department

米国のWSN(技術的観点)

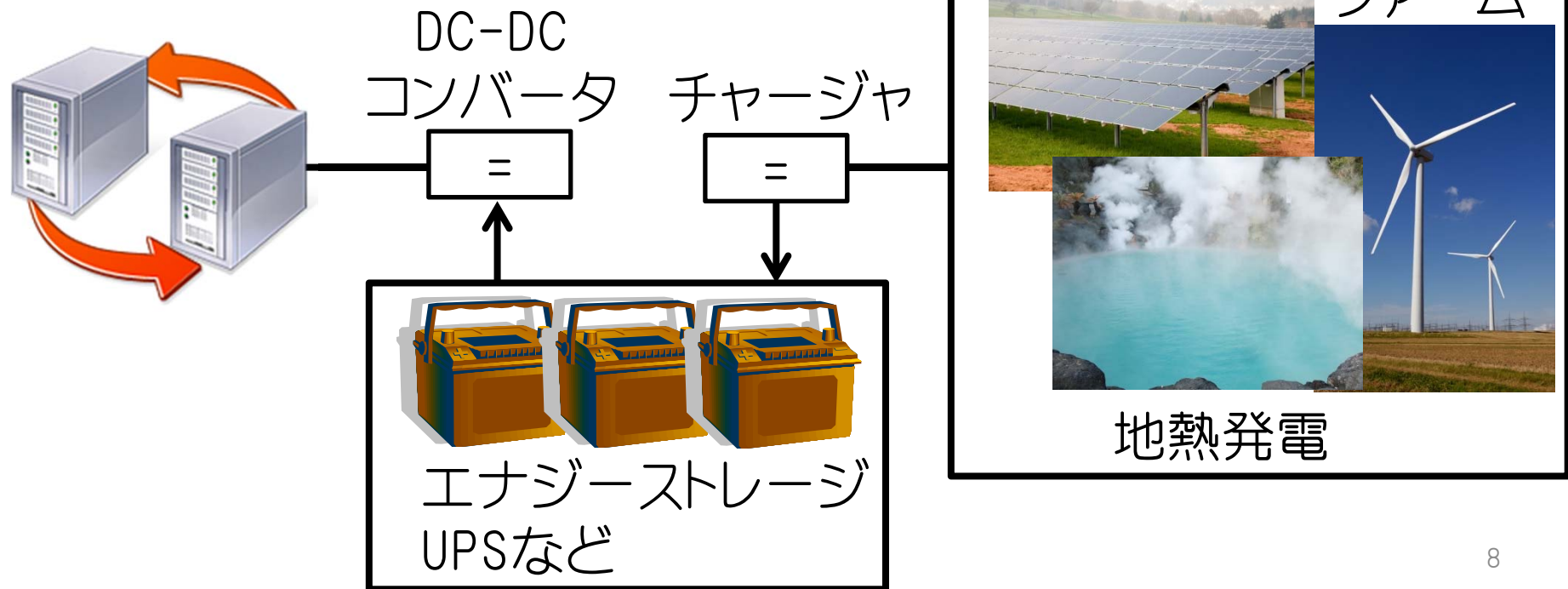
- 高信頼化と低消費電力化の共存が鍵
- Many & Simple
 - ✓ 信頼性の低い素子を組み合わせることで冗長性によりシステム全体の信頼性を向上
 - 安価なセンサノードを大量に使用
 - ✓ 個別のノードは低い性能(低消費電力)でもネットワーク全体で要求される性能を達成
 - サブスレッショルド論理 ← 低電力だけど性能も低い

米国のWSN(戦略的観点)

- 対象はコンピュータではなく社会情報基盤
 - ✓ 個別ノードではなくネットワーク全体の最適化
 - ✓ 環境から取り入れた電力のみでの持続動作が目標
 - 必ずしも消費エネルギー最小化が目的ではない
- 応用とその実現手段を同時に開発
 - ✓ ワイヤレスセンサネットワークとエネルギーハーベスティング
- 分散発電・分散消費による電力の地産地消
 - ✓ エネルギーハーベスティングの研究ブーム
 - ✓ 分散発電と分散コンピューティング

スマート **

- スマートグリッド、スマートシティ、スマートハウス、スマートメータ、スマートデータセンタ
- 電力の地産地消



Internet of Things

- 人だけではなく“物”のインターネット
- 携帯電話やスマートフォンの急速な普及
 - ✓ 数百ミリ〜数ワットクラスのアプリケーション



応用範囲の変遷

ワイアレスセンサネットワーク

～数百 μ Wクラス

環境から取り入れた電力を直接使うまたは小容量のキャパシタがあれば十分

Internet of Things

数百mW～数Wクラス

- 環境から取り入れた電力を安定化するための大容量キャパシタやバッテリーが必要
- ピークシフトや電力スケジューリングにより効率改善や低コスト化が可能
- チャージャやコンバータの電力損失が増大

スマートシティ、スマートハウス

数kW～数MWクラス

講演内容

□ 背景

- ✓ エナジーハーベスティング
- ✓ ワイヤレスセンサネットワーク

□ 技術紹介

- ✓ 電圧コンバータの特性
- ✓ エナジーストレージ
- ✓ 電圧変換ロスの低減技術

□ 将来展望

電圧変換による電力損失

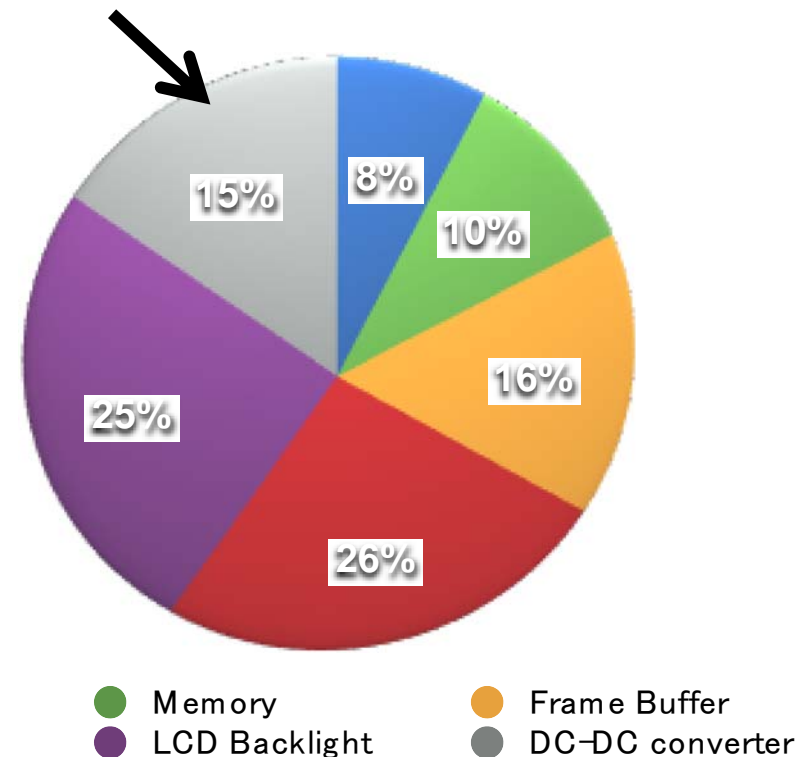
□ 電子機器の電力はどこに消えるか?

- ✓ 携帯型MPEG4プレイヤーの電力内訳
- ✓ 電力消費の15%が電圧変換による損失

Hojun Shim, Youngjin Cho and Naehyuck Chang, "Power Saving in Hand-held Multimedia Systems Using MPEG-21 Digital Item Adaptation," in ESTIMedia, 2004

□ コンバータとチャージャ

- ✓ 電子機器に安定した入力電圧を提供
- ✓ バッテリと発電素子の電圧の違いを吸収



DC-DCコンバータの特性(1/2)

- 変換効率が入力と出力の電位差に依存
 - ✓ 変換効率は最大で約95%
 - ✓ 昇圧より降圧の方が高効率

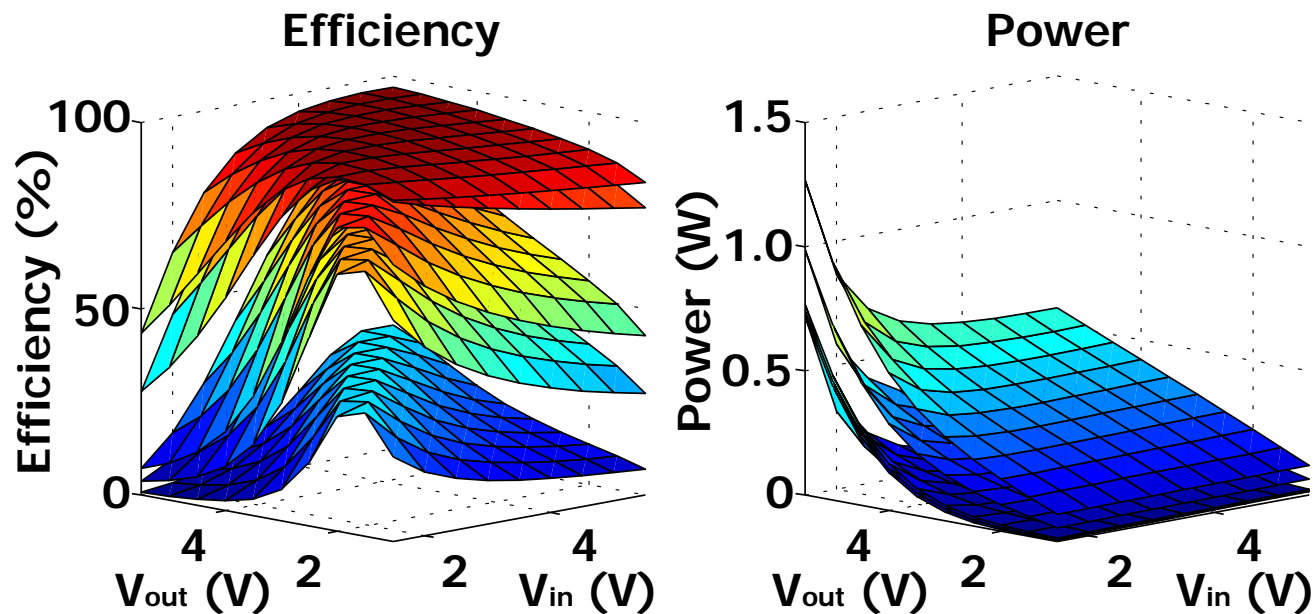


Image Credit:
Prof. Naehyuck Chang
of SNU and his group

DC-DCコンバータの特性 (2/2)

- 特定用途に特化することにより特性改善
 - ✓ 特に出力電圧・電流に特化することが重要
 - 既存の機器は一般に電圧変換ロス是非常に小さい
 - ✓ 環境発電を利用するシステムは低効率
 - 発電電圧が環境に大きく左右されるため

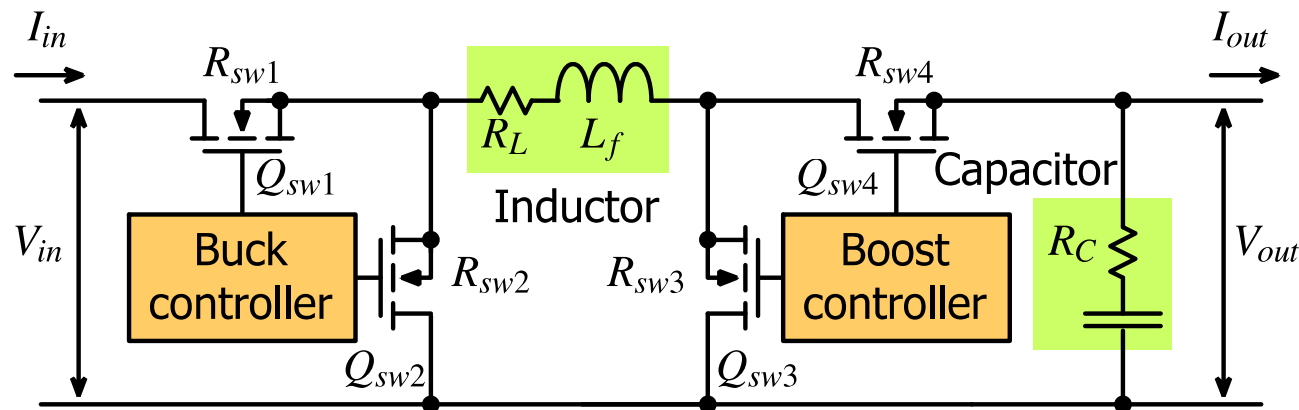


Image Credit:
Prof. Naehyuck Chang
of SNU and his group

エネルギーストレージ

- 発電した電力を一時的に蓄える貯蔵庫
- 代表的なエネルギーストレージの種類
 - ✓ スーパーキャパシタ → 出力電流大、リーク電流大
 - ✓ リチウムイオンバッテリー → 充電回数大、容量単価大
 - ✓ 鉛蓄電池 → 充電回数小、容量単価小
- 特徴的なストレージの特性
 - ✓ Rate capacity effect
 - バッテリーはゆっくり電力を消費するほど大量のエネルギーを取り出せる
 - ✓ リーク電流
 - スーパーキャパシタは1日で約40%の電荷を自然放電

Hybrid Energy Storage System (1/3)

■ 動機

- ✓ バッテリーの種類によって特性(エネルギー密度、出力電流密度、リーク電流)が大きく異なる

■ アプローチ

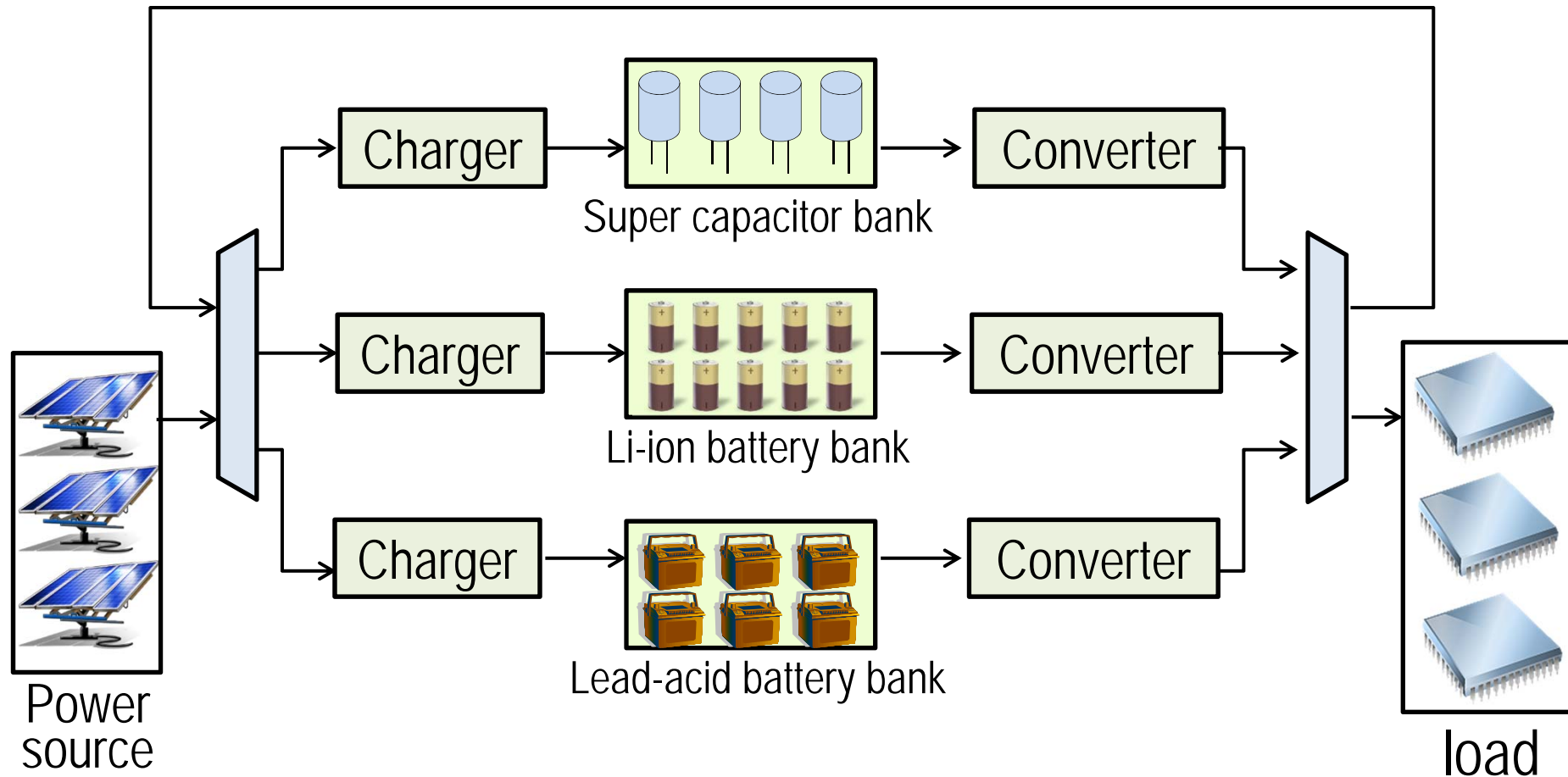
- ✓ 特性の異なる複数のエネルギーストレージを用意し負荷(プロセッサなど)の状況に応じて使用するバッテリー(スーパーキャパシタを含む)を動的に使い分ける

■ ポイント

- ✓ 各種バッテリーをメモリサブシステムになぞらえて最適化している点が興味深い

M. Pedram, et al., "Hybrid Electrical Energy Storage Systems," in proc. ISLPED, pp.363-368, Aug., 2010.

Hybrid Energy Storage System (2/3)



M. Pedram, et al., "Hybrid Electrical Energy Storage Systems," in proc. ISLPED, pp.363-368, Aug., 2010.

Hybrid Energy Storage System (3/3)

■ モデリング

- ✓ エナジーストレージのモデル化

■ 電荷の最適化

- ✓ Charge Migration: 異なるストレージ間の電荷移動
- ✓ Charge Allocation: 電力ソースからストレージへの最適電荷割り当て
- ✓ Charge Replacement: ストレージから負荷への電荷移動

Y. Wang, et al. "Charge migration efficiency optimization in hybrid electrical energy storage (HEES) systems," in proc. ISLPED, pp.103-108, August, 2011.

Y. Wang, et al. "Charge allocation for hybrid electrical energy storage systems ," in proc. CODES+ISSS, pp.277-284, October, 2011.

Q. Xie, et al. "Charge Replacement in Hybrid Electrical Energy Storage Systems," in proc. ASP-DAC, pp.627-632, January, 2012.

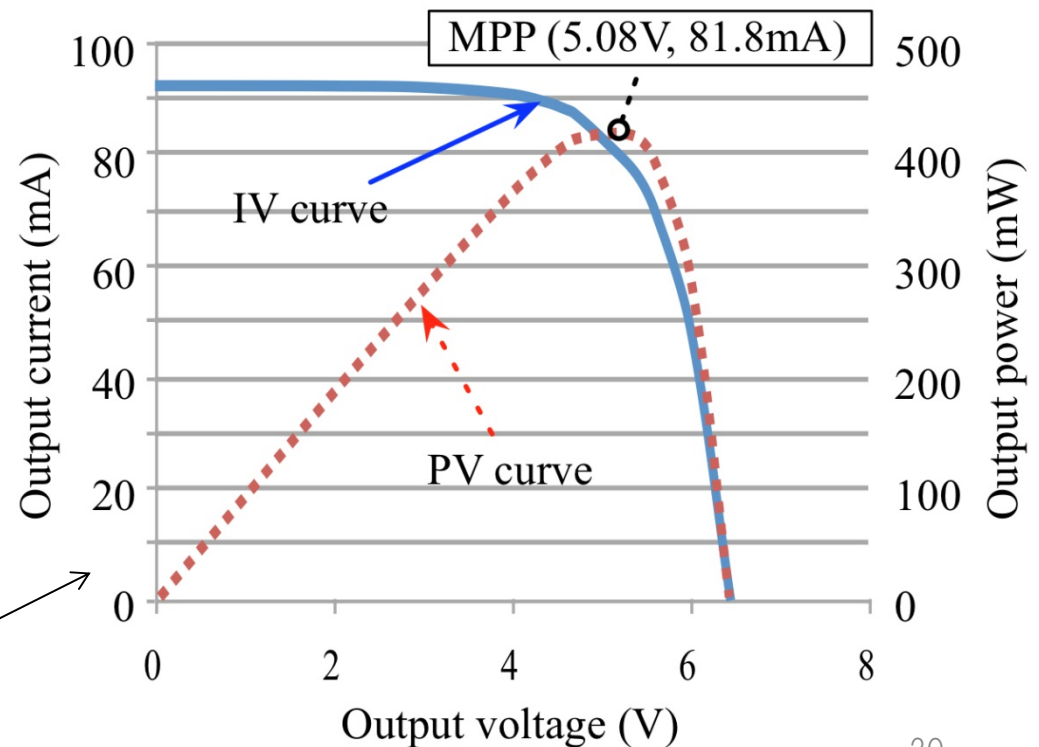
HESSまとめ

- 異種のストレージを切り替えて使用することにより10%~50%の効率改善を達成
- ヘテロジニアスな特徴を使い分けることが重要
- ストレージだけでなく異種混合発電デバイスを用途に応じて使い分ける研究もホット
 - ✓ 太陽電池、熱電素子、振動発電素子を使用
 - ✓ 既存技術に対して11~13%の効率改善

Maximum Power Point Tracking

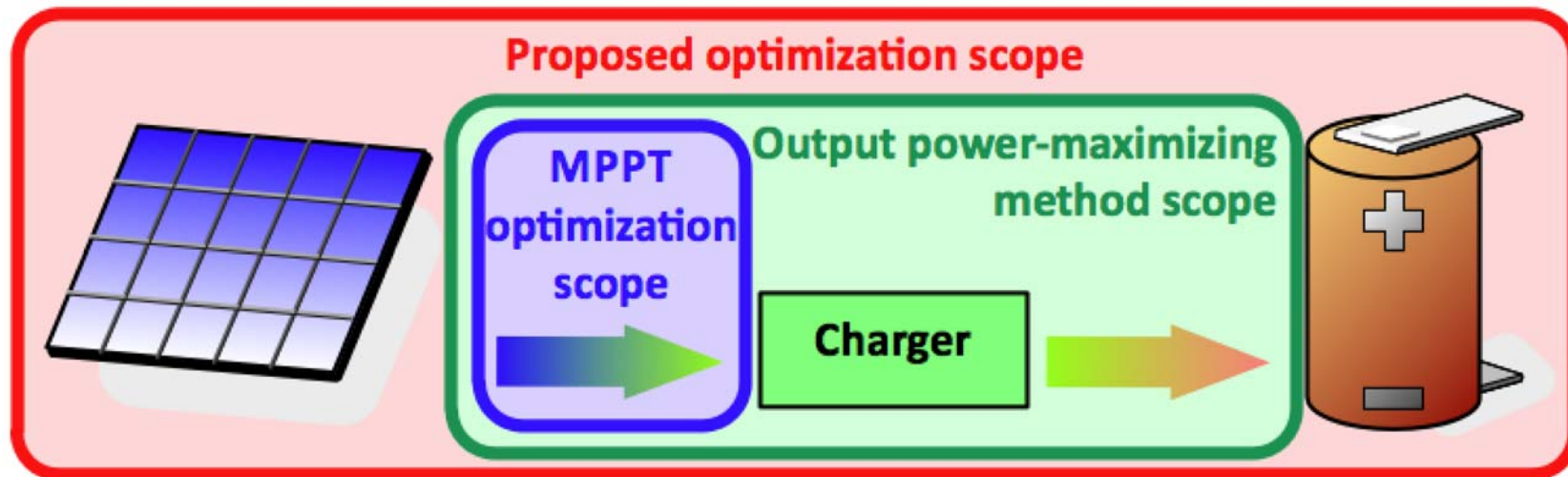
- 出力を最大化する最適な電流×電圧の値（最大電力点）を自動で求める制御技術
- 太陽光発電だけでなく熱電素子、風力発電、水力発電にも適用可

太陽電池のMPPTの例



Max. Power Transfer Tracking (1/4)

- MPTTはエネルギーストレージに蓄積される電力量を最大化
 - ✓ チャージャの変換効率が最大になる点とMPPTとの妥協点を見つける



Max. Power Transfer Tracking (2/4)

- キャパシタに充電する点で最大電力を抽出
 - ✓ チャージャの変換効率最大点はMPPTに依存
 - ✓ 発電素子、チャージャ単体では最適点決定は不可能

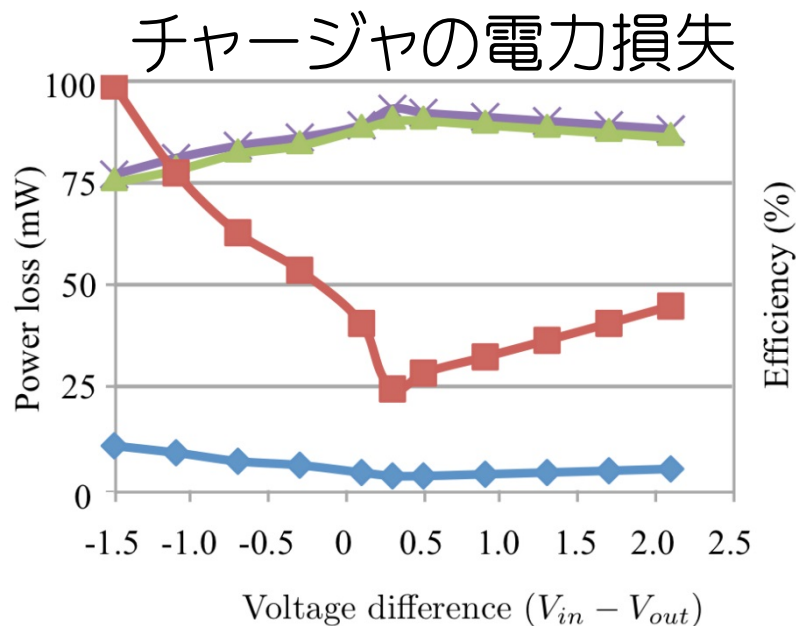
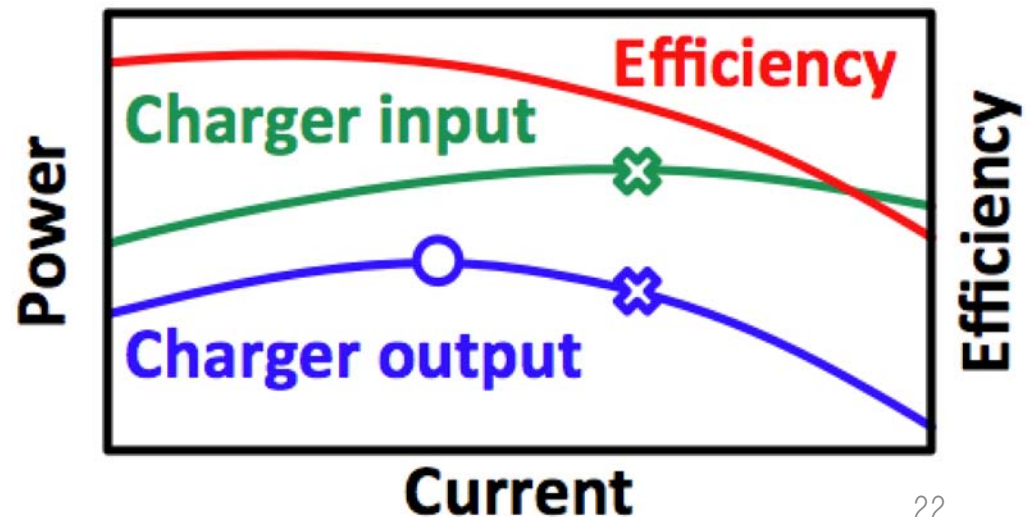


Image Credit:

Prof. Naehyuck Chang of SNU and his group



Max. Power Transfer Tracking (3/4)

□ MPPTとMPTTの比較実験結果

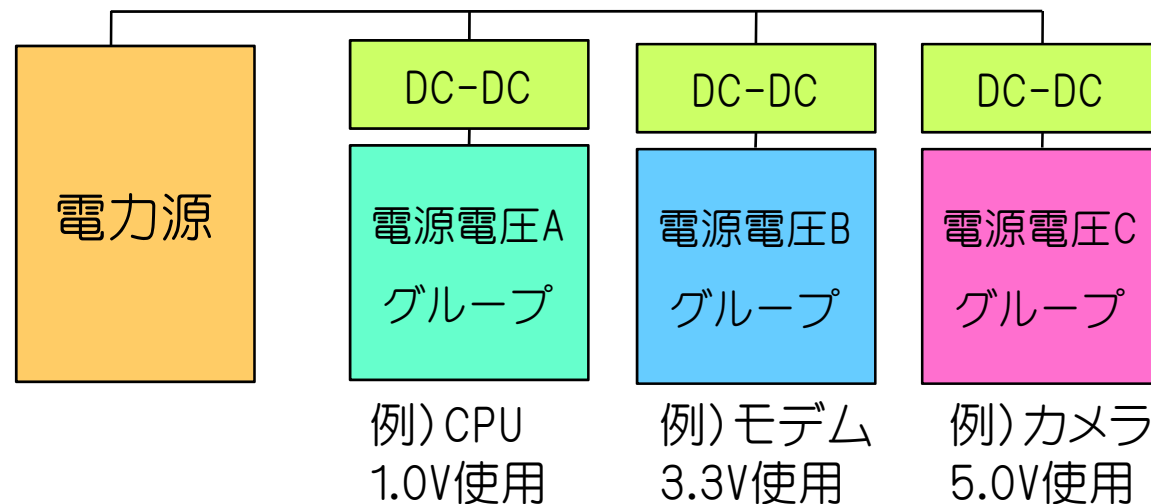
太陽電池セルの 直並列接続構成 (直列×並列)	5×5				12×2			
	MPTT	MPPT			MPTT	MPPT		
Supercap. Capacitance (F)	2,378	2,378	23,780	238	874	874	8,740	87
Final supercap. voltage (V)	9.0	8.9	2.2	11.0	15.2	14.8	4.2	19.1
Final sueprcap. Energy (J)	96k	93k	59k	14k	102k	96k	77k	16k
Energy ratio to the optimum (%)	100	97	61	15	100	94	76	16

Max. Power Transfer Tracking (4/4)

- MPPTは必ずしも電力が蓄電される段階の電力を最大にするとは限らない
- MPTTは生成した電力が使われるまでの変換効率を最大化
- MPTTの過程でコンバータやチャージャの電力損失を考慮することが重要
- MPTTの過程でスーパーキャパシタの電圧(蓄積電荷量に依存)を考慮することが重要

動的構成変更技術

- 発電素子とキャパシタの直並列接続を動的に変更
 - ✓ チャージャとコンバータの入出力電位差の削減



K. Lee, T. Ishihara, "A Dynamic Reconfiguration Technique for PV and Capacitor Arrays to Improve the Efficiency in Energy Harvesting Embedded Systems," in Proc. of International Conference on Smart Grids and Green IT Systems, pp. 175-182, April, 2012

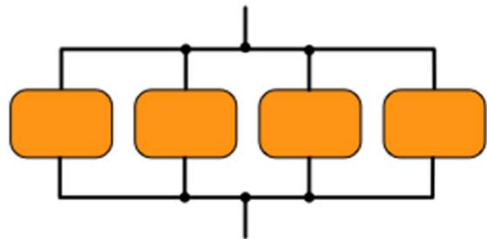
発電素子とキャパシタの構成変更

□ 可変構成配列の例

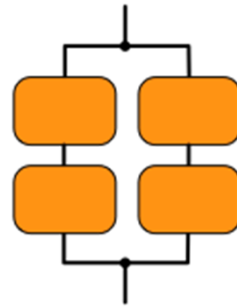
- ✓ 4セルでは3種類の構成が可能
- ✓ 1倍、2倍、4倍の出力電圧を生成可能



コンバータやチャージャにおける入出力端の電位差を削減



(4,1): 0.5V, 320mA output



(2,2): 1V, 160mA output

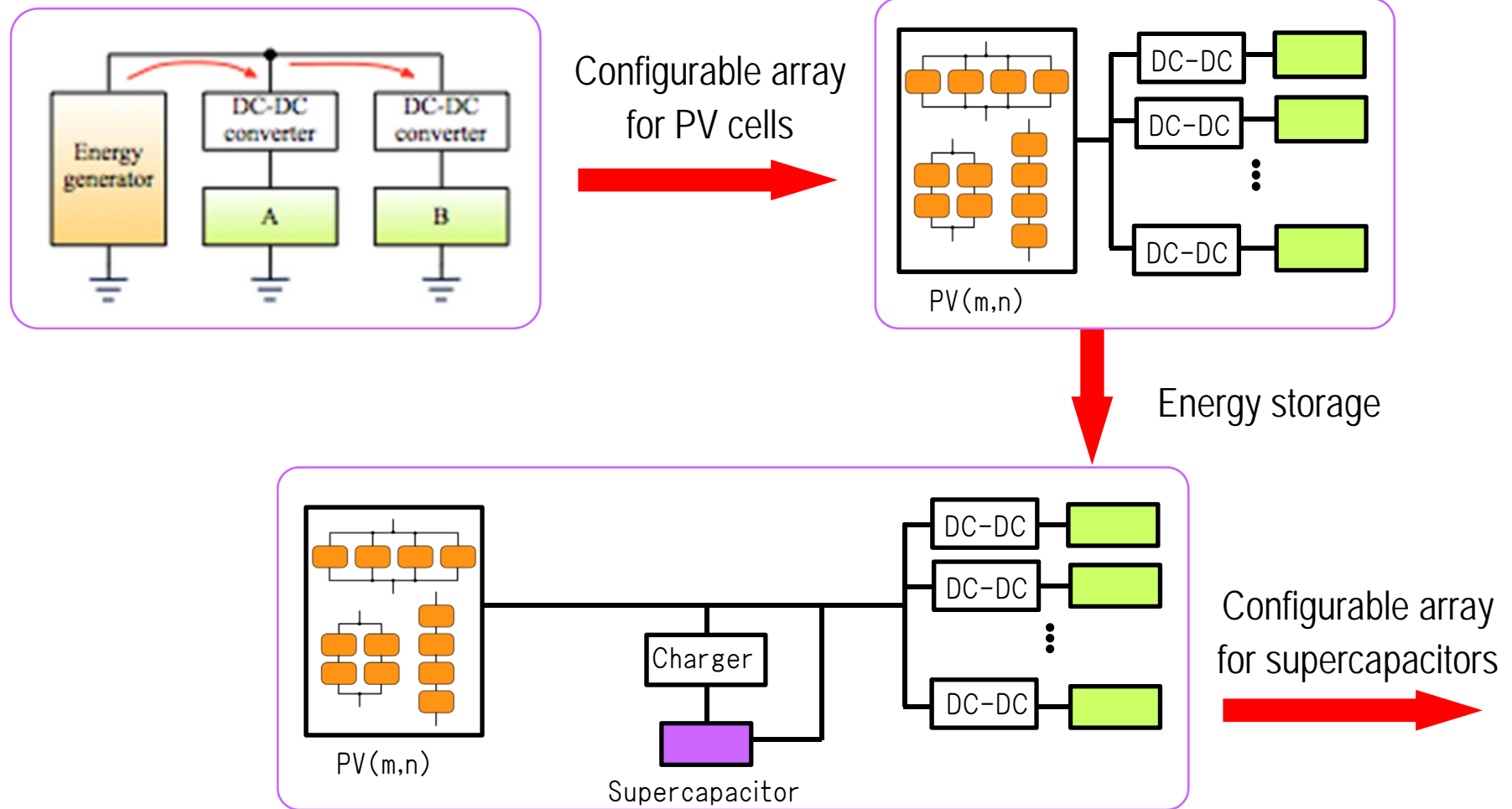


(1,4): 2V, 80mA output

M. Uno, "Series-parallel reconfiguration technique for supercapacitor energy storage systems," in Proc. of TENCON, 2009.

Y. Kim, et al. "Balanced Reconfiguration of Storage Banks in a Hybrid Electrical Energy Storage System," in Proc. of ICCAD, pp.624-631, November 2011.

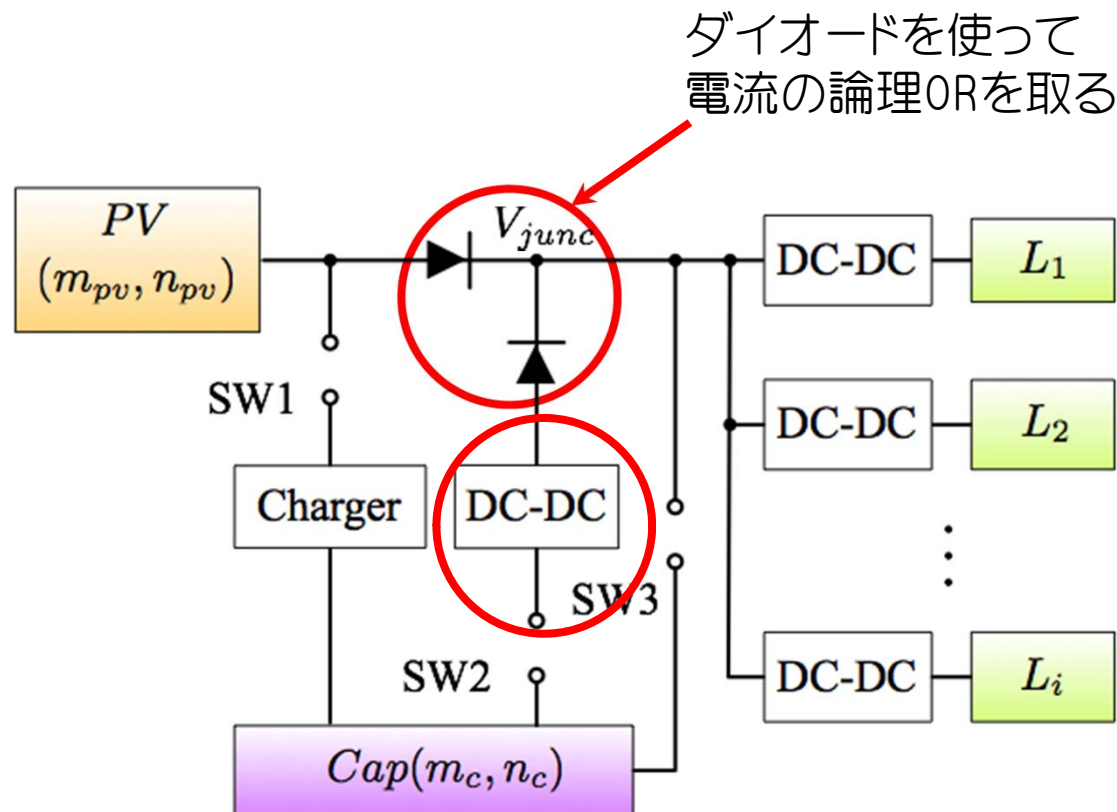
システムアーキテクチャ(1/2)



システムアーキテクチャ(2/2)

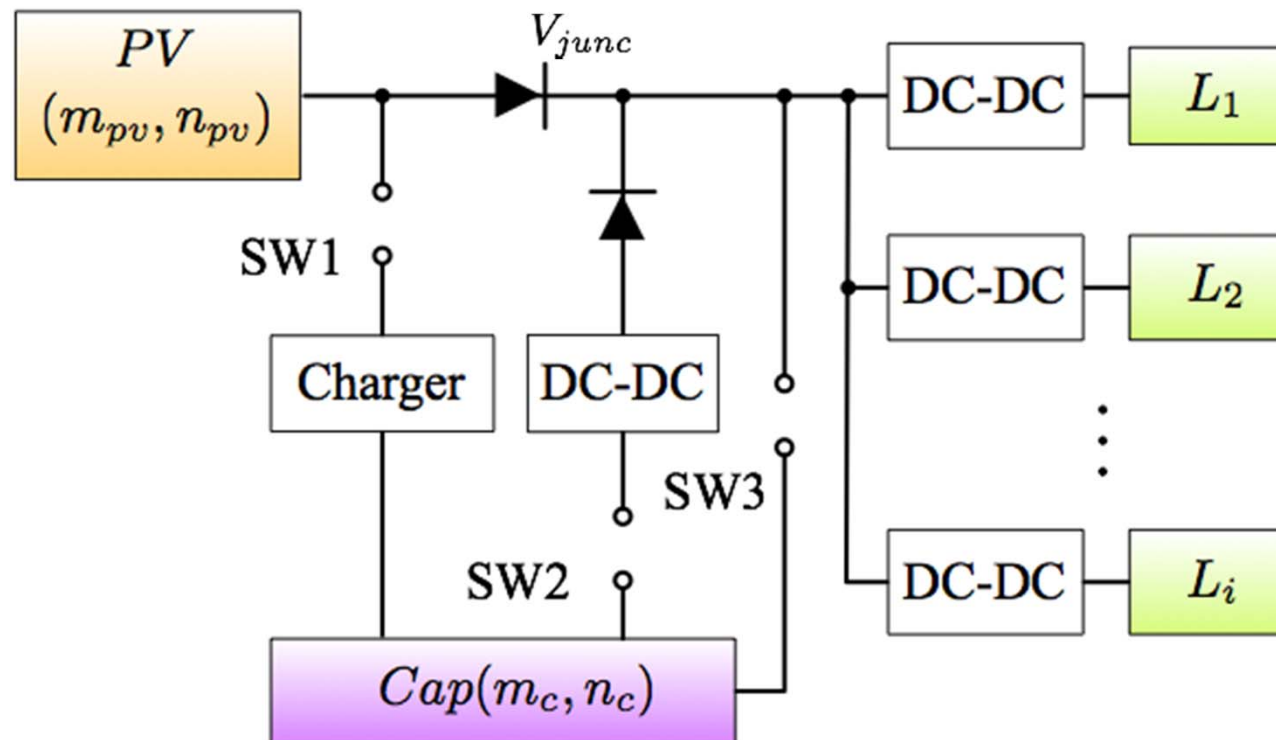
□ システム構成図

- ✓ 発電素子とキャパシタを動的に選択



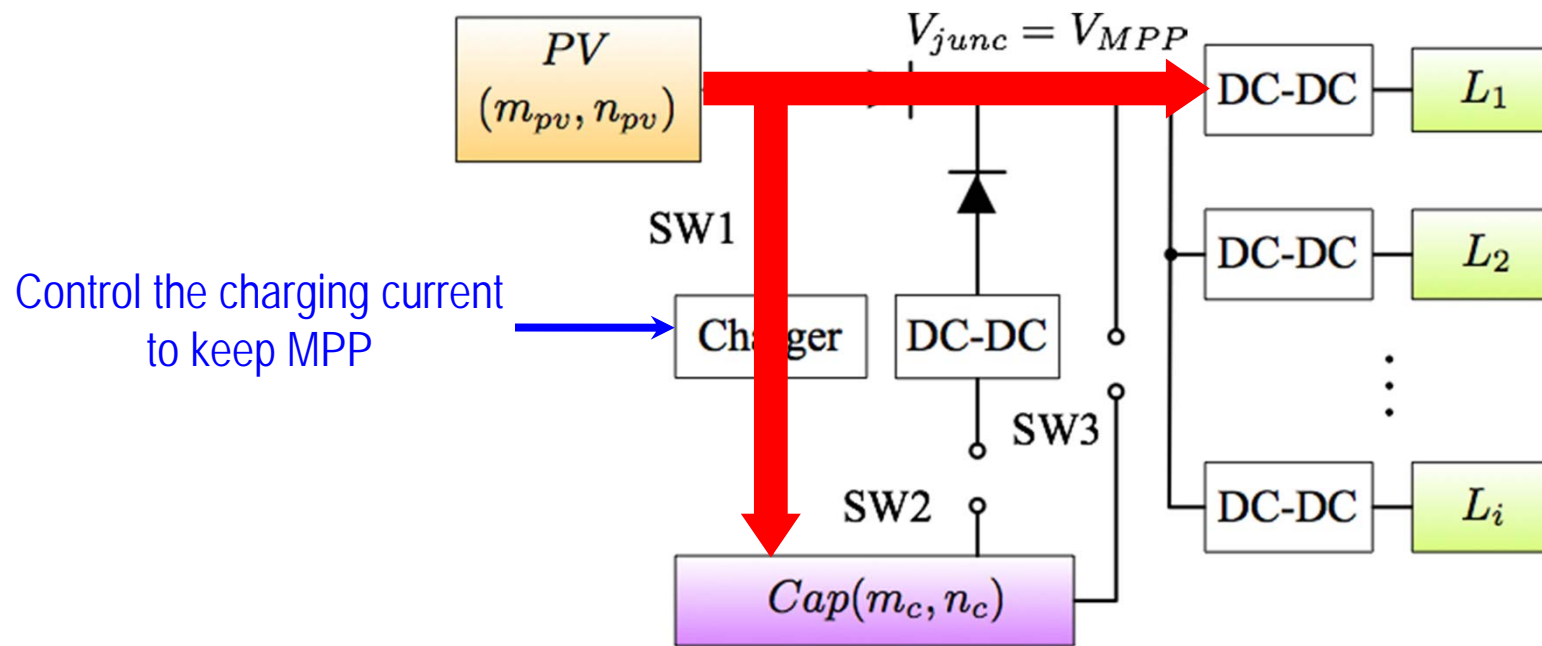
3種類の動作モード

- 豊作モード
- ハイブリッドモード
- 不作モード



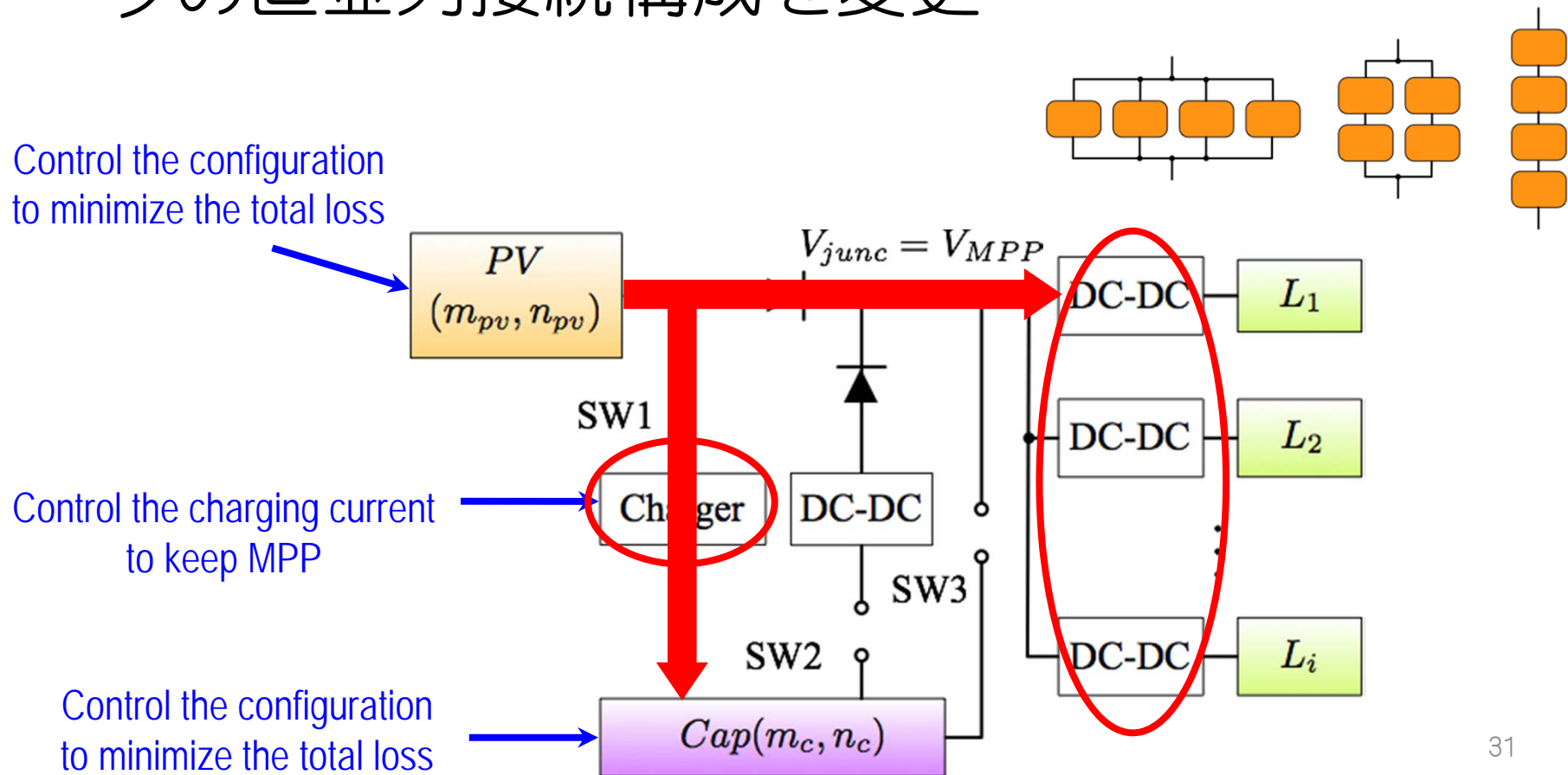
豊作 (Good Harvest) モード

- 負荷を駆動するのに十分な発電がある場合
 - ✓ 負荷を駆動すると同時にキャパシタに充電



豊作 (Good Harvest) モード

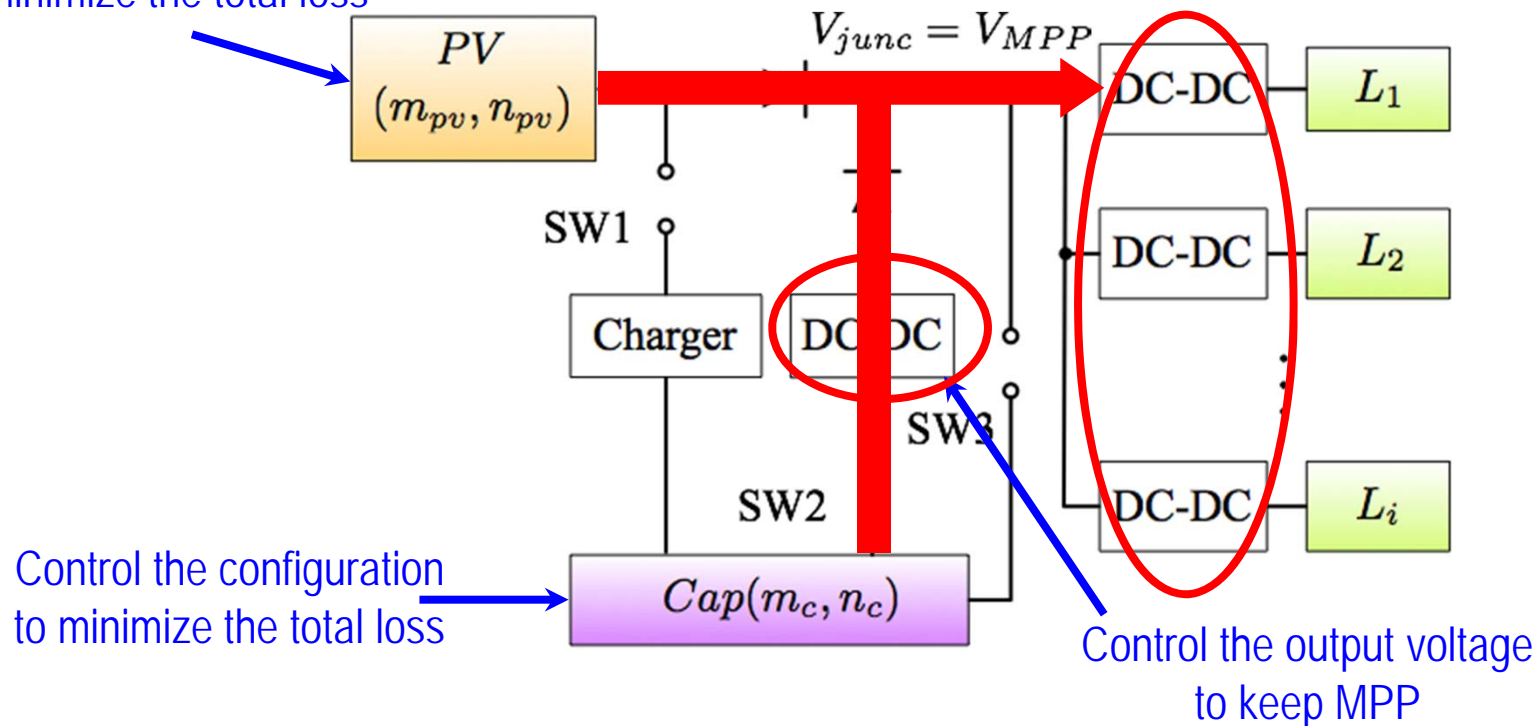
- 効率が最大になるように発電素子とキャパシタの直並列接続構成を変更



ハイブリッドモード

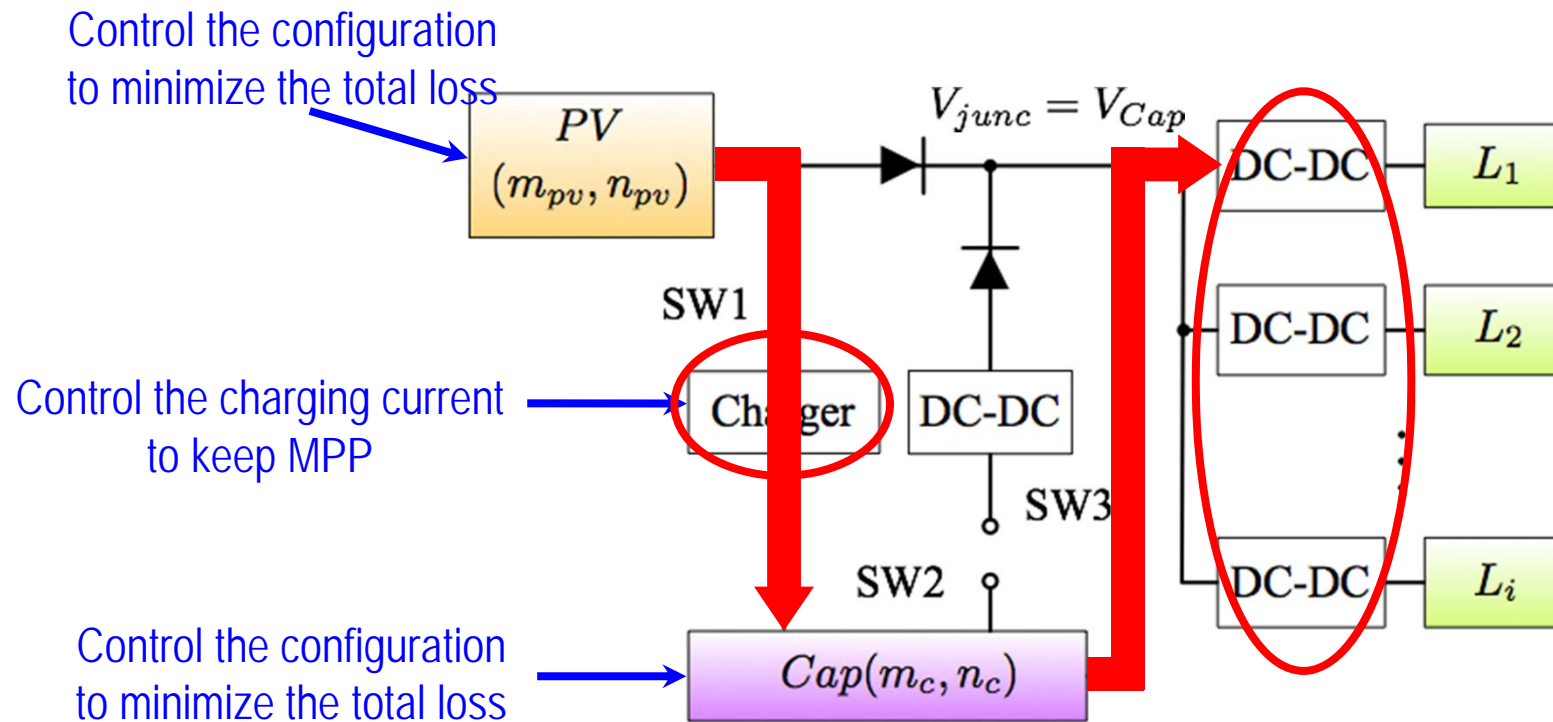
- 発電素子だけでは十分に負荷を駆動できない
 - ✓ 発電素子とキャパシタの両方を使って負荷を駆動

Control the configuration
to minimize the total loss



不作為 (Bad Harvest) モード

- 発電電力がキャパシタの出力に接続されたコンバータの損失より小さい
 - ✓ キャパシタと負荷用のコンバータを直結



実験のセットアップ

□ 負荷デバイスの消費電力

- ✓ プロセッサ: 電源電圧 1.2V、消費電流 100mA
- ✓ メモリ: 電源電圧 3.3V、消費電流 30mA
- ✓ WCDMA: 電源電圧 5.0V、消費電流 100mA

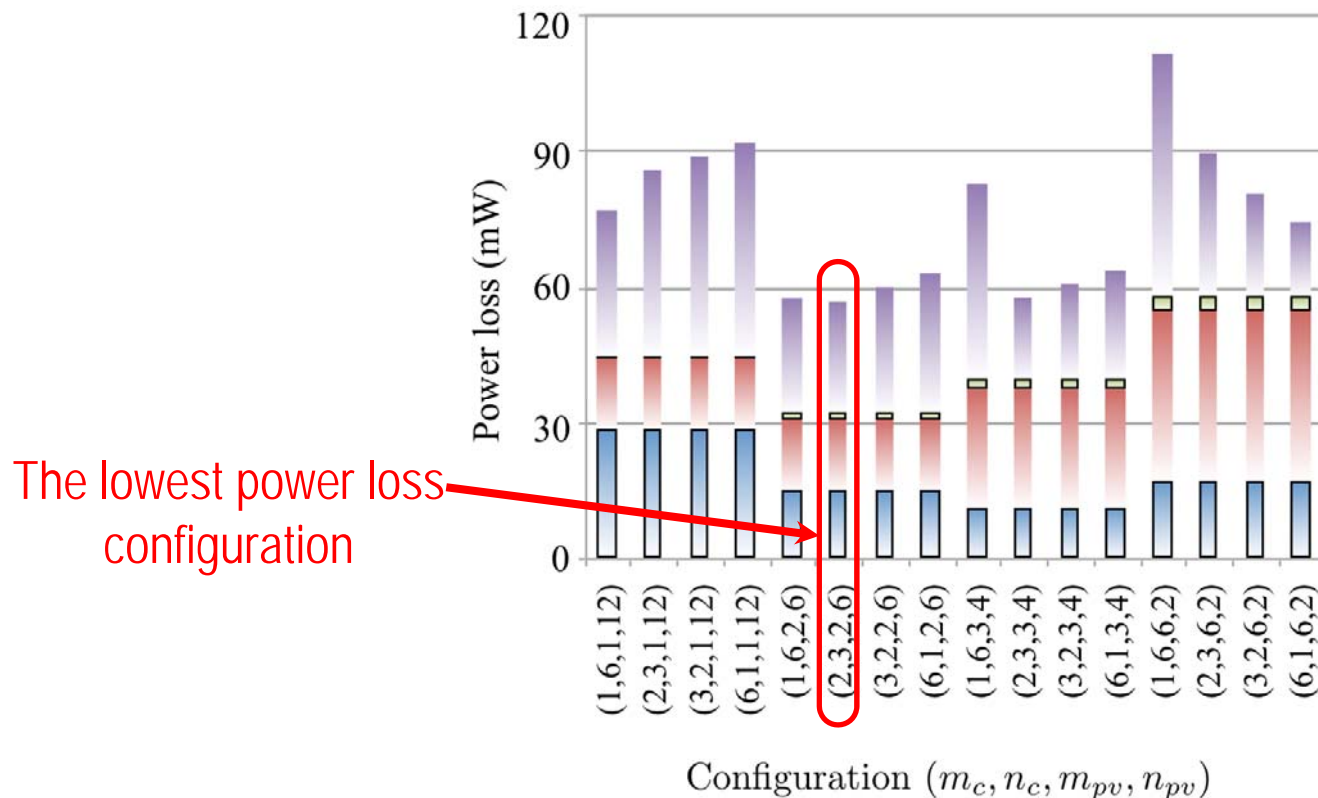
10種類の
シナリオ



No.	Current (mA)			Sun (%)	S_{cap} (%)
	CPU	Mem.	RF Amp.		
Case 1	1	1	1	100	20
Case 2	1	1	1	100	40
Case 3	1	1	1	100	60
Case 4	1	1	1	100	80
Case 5	100	30	1	50	20
Case 6	100	30	1	50	80
Case 7	100	30	1	100	40
Case 8	1	30	100	50	20
Case 9	1	30	100	50	40
Case 10	1	30	100	50	80

実験結果 (1/2)

- 発電素子・キャパシタの構成の違いによる電力損失
 - ✓ プロセッサ、メモリ、無線回路の電力は100mA、30mA、1mA
 - ✓ 太陽光の強度は100%、キャパシタの充電率は20%と仮定

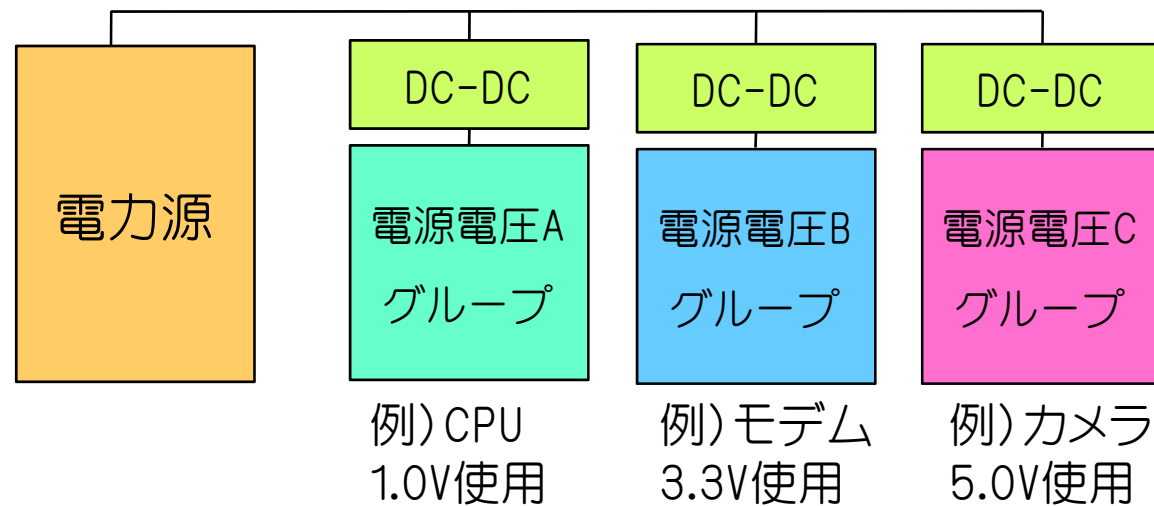


実験結果 (2/2)

Case	Configuration (m_c, n_c, m_{pv}, n_{pv})	Oper. mode	Converter power loss (mW)						Red. (%)
			CPU	Mem.	RF Amp.	Charg.	$Conv_{cap}$	Total	
Case 1	MPPT	G	0.3	0.5	0.5	95.3	-	96.6	-
	Proposed (2,3,3,4)		0.1	0.9	2.4	37.4	-	40.8	58
Case 2	MPPT	G	0.3	0.5	0.5	82.5	-	83.8	-
	Proposed (3,2,2,6)		0.2	0.5	1.7	43.9	-	46.3	45
Case 3	MPPT	G	0.3	0.5	0.5	69.6	-	71.0	-
	Proposed (6,1,3,4)		0.1	0.9	2.4	37.4	-	40.8	42
Case 4	MPPT	G	0.3	0.5	0.5	56.8	-	58.1	-
	Proposed (6,1,2,6)		0.2	0.5	1.7	43.9	-	46.3	20
Case 5	MPPT	H	28.7	15.7	0.5	-	29.0	74.0	-
	Proposed (1,6,2,6)		15.3	15.4	1.7	-	2.0	34.4	54
Case 6	MPPT	H	28.7	15.7	0.5	-	10.0	54.9	-
	Proposed (3,2,2,6)		15.3	15.4	1.7	-	1.7	34.1	38
Case 7	MPPT	H	0.3	15.7	50.5	-	116.8	183.3	-
	Proposed (1,6,1,12)		0.3	15.7	50.5	-	21.3	87.8	52
Case 8	MPPT	B	0.2	37.6	332.1	47.6	-	417.5	-
	Proposed (1,6,2,6)		0.2	15.4	172.1	25.9	-	213.5	49
Case 9	MPPT	B	0.1	26.3	237.3	41.2	-	304.9	-
	Proposed (1,6,1,12)		0.3	15.7	50.5	25.9	-	92.4	70
Case 10	MPPT	B	0.2	9.0	116.5	28.4	-	154.2	-
	Proposed (2,3,1,12)		0.3	15.7	50.5	25.9	-	92.4	40

スケジューリングとの協調技術

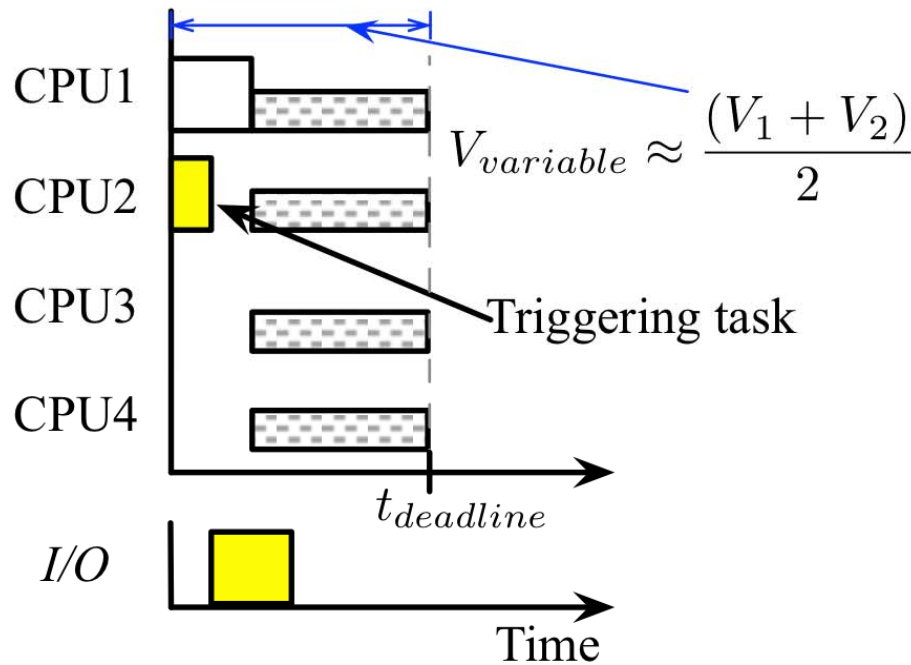
- I/O デバイスを考慮したタスクスケジューリング
- コンバータの入出力電位差の削減



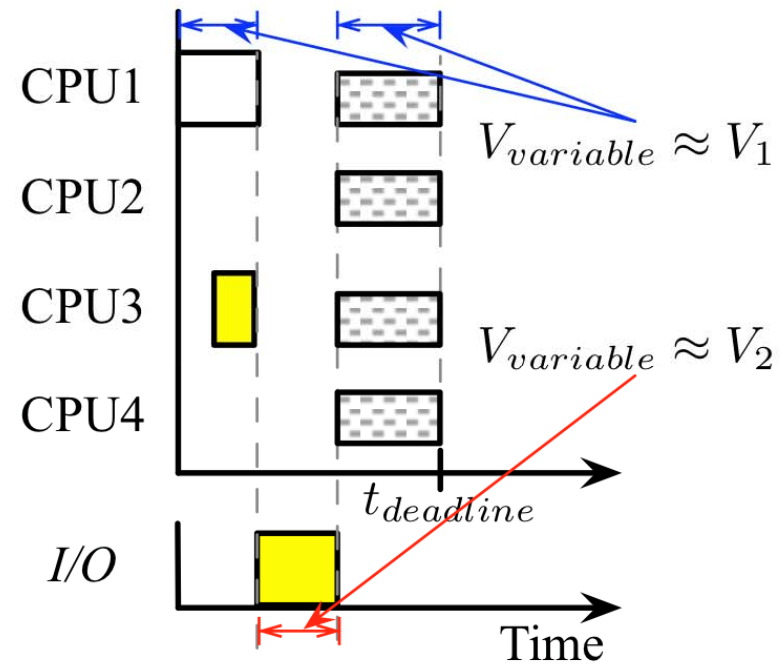
K. Lee, T. Ishihara, "I/O Aware Task Scheduling for Energy Harvesting Embedded Systems with PV and Capacitor Arrays," in Proc. of IEEE Symposium on Embedded Systems for Real-Time Multimedia (ESTIMedia 2012), pp. 48-55, October, 2012

タスクスケジューリング

- 電圧変換損失を考慮したタスクスケジューリング
 - ✓ CPUタスクとI/Oタスクのオーバーラップを最小化
 - ✓ より効果的な電圧設定が可能



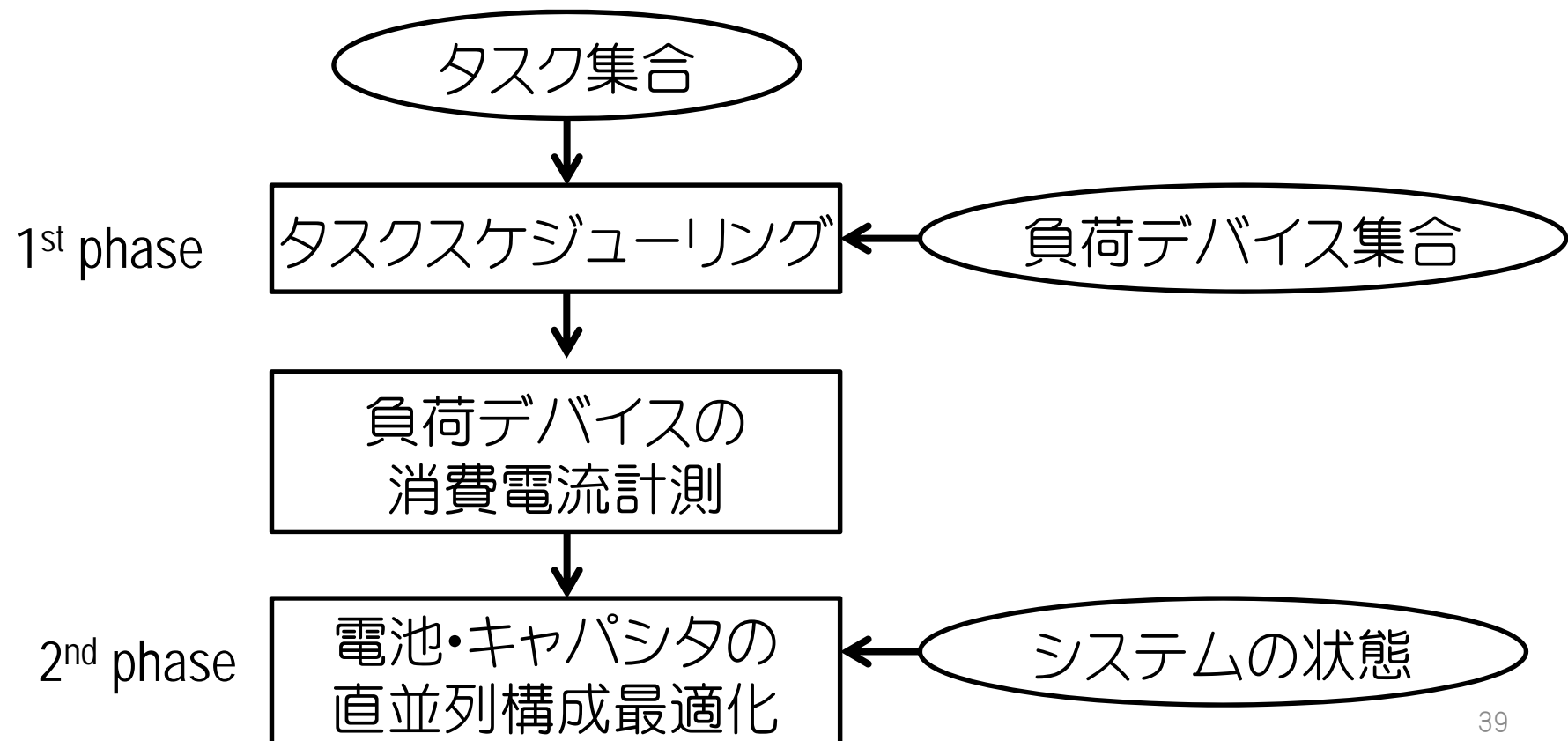
(a) Conventional



(b) Proposed

スケジューリングと構成最適化

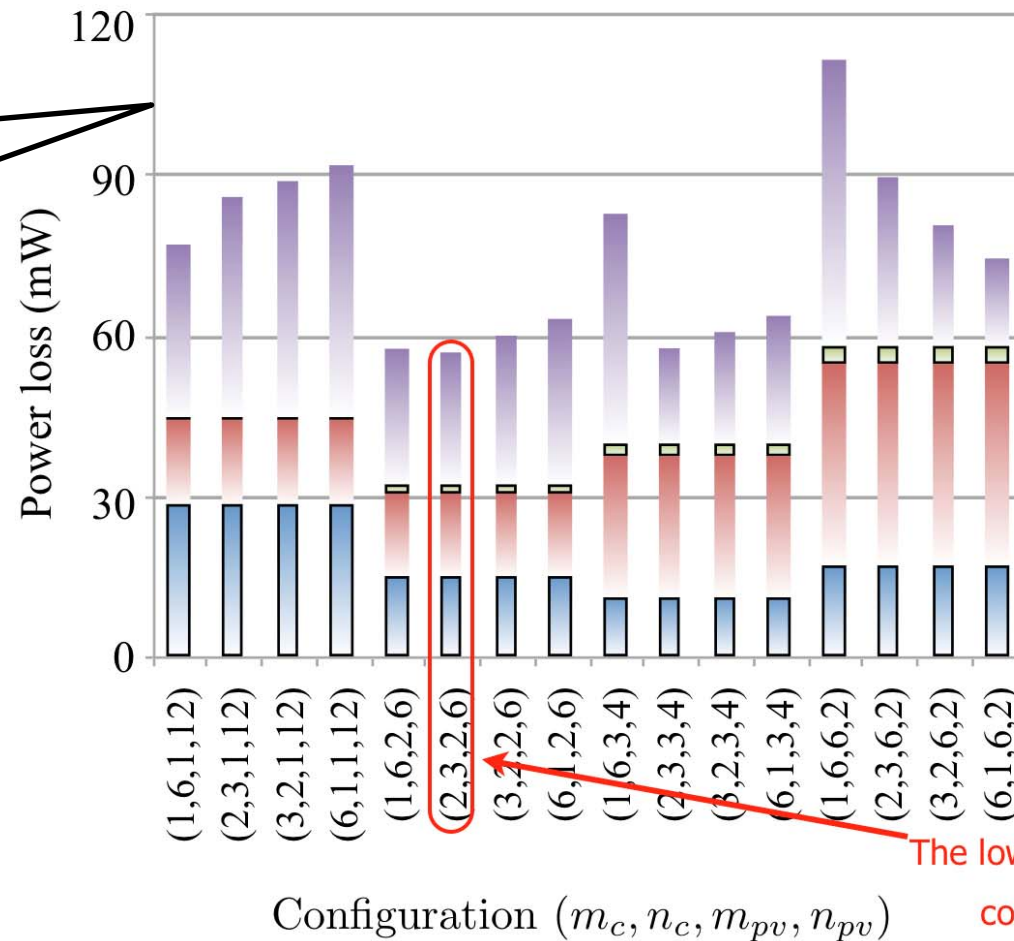
- スケジューリングと構成最適化フロー
 - ✓ 二段階の逐次最適化



実験結果 (1/3)

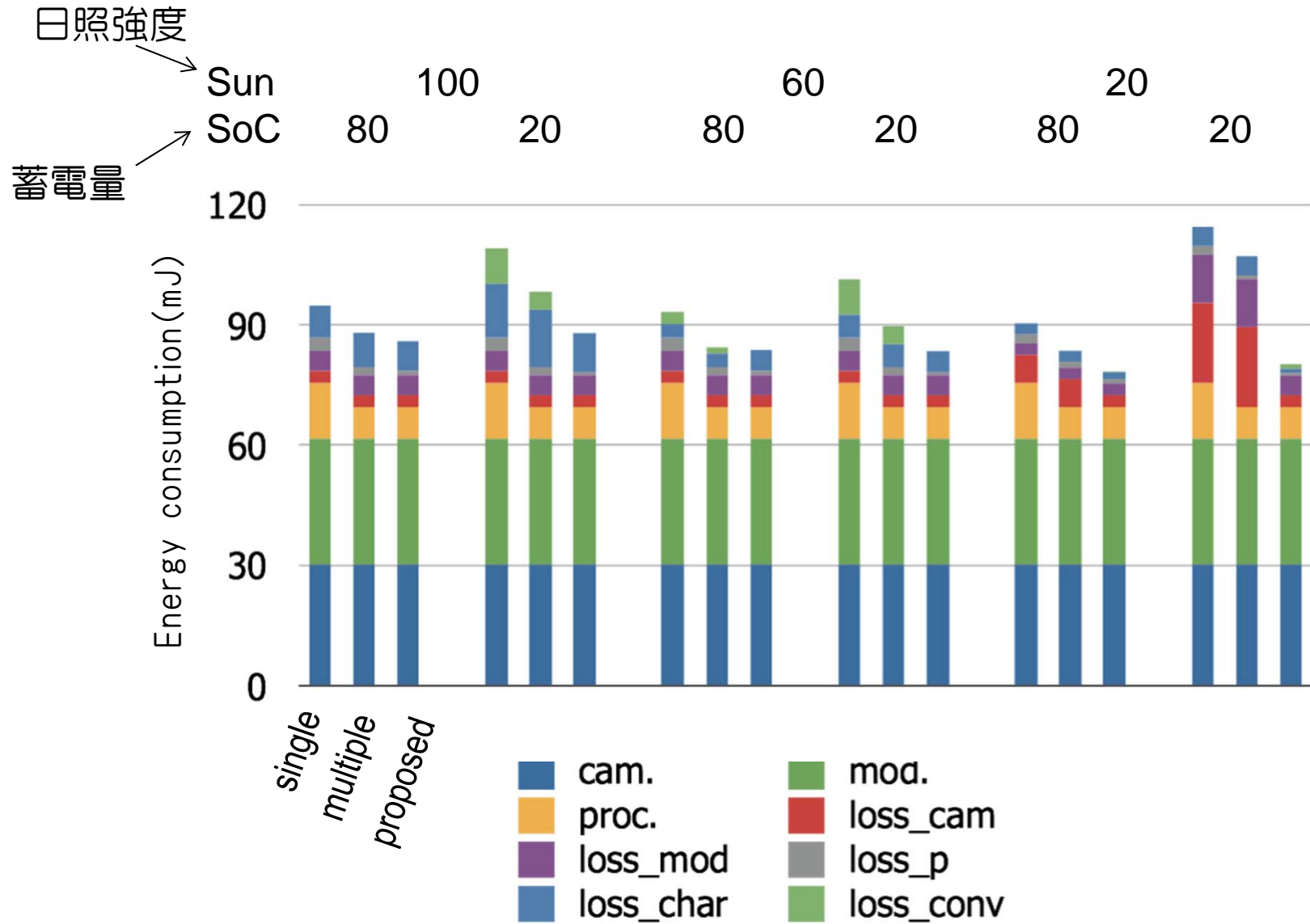
□ 直並列接続の違いによる電力損失

構成を最初から最後まで固定



The lowest power loss configuration

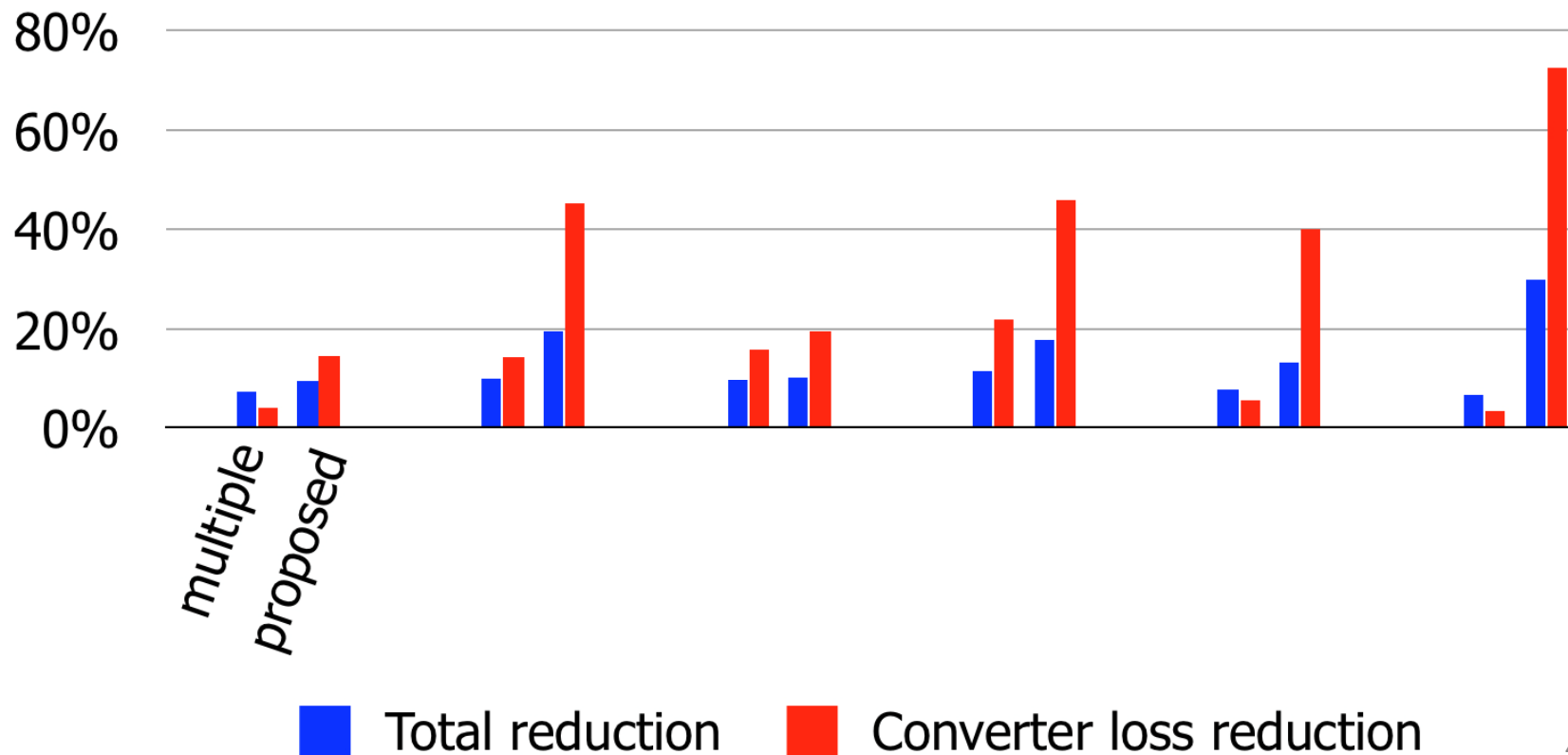
実験結果 (2/3)



実験結果 (3/3)

□ 電力損失削減率 (%)

✓ シングルコアシステムがベースライン



まとめ(電力損失削減技術)

□ 紹介した技術のまとめ

- ✓ 異種混合のエネルギーストレージ利用
 - バッテリーの充放電効率改善とストレージのリーク電流削減
- ✓ MPTT: Maximum Power Transfer Tracking
- ✓ 発電素子とキャパシタの直並列接続変更技術
 - コンバータやチャージャの電力損失を削減

□ 電力削減

- ✓ 異種混合エネルギーストレージ利用
 - 10%~50%の電力移送効率改善
- ✓ MPTT: Maximum Power Transfer Tracking
 - MPPTに比べて電力移送効率を5%~85%改善
- ✓ 発電素子とキャパシタの直並列接続変更技術
 - 電圧変換に伴う電力損失を最大70%削減

講演内容

□ 背景

- ✓ エナジーハーベスティング
- ✓ ワイヤレスセンサネットワーク

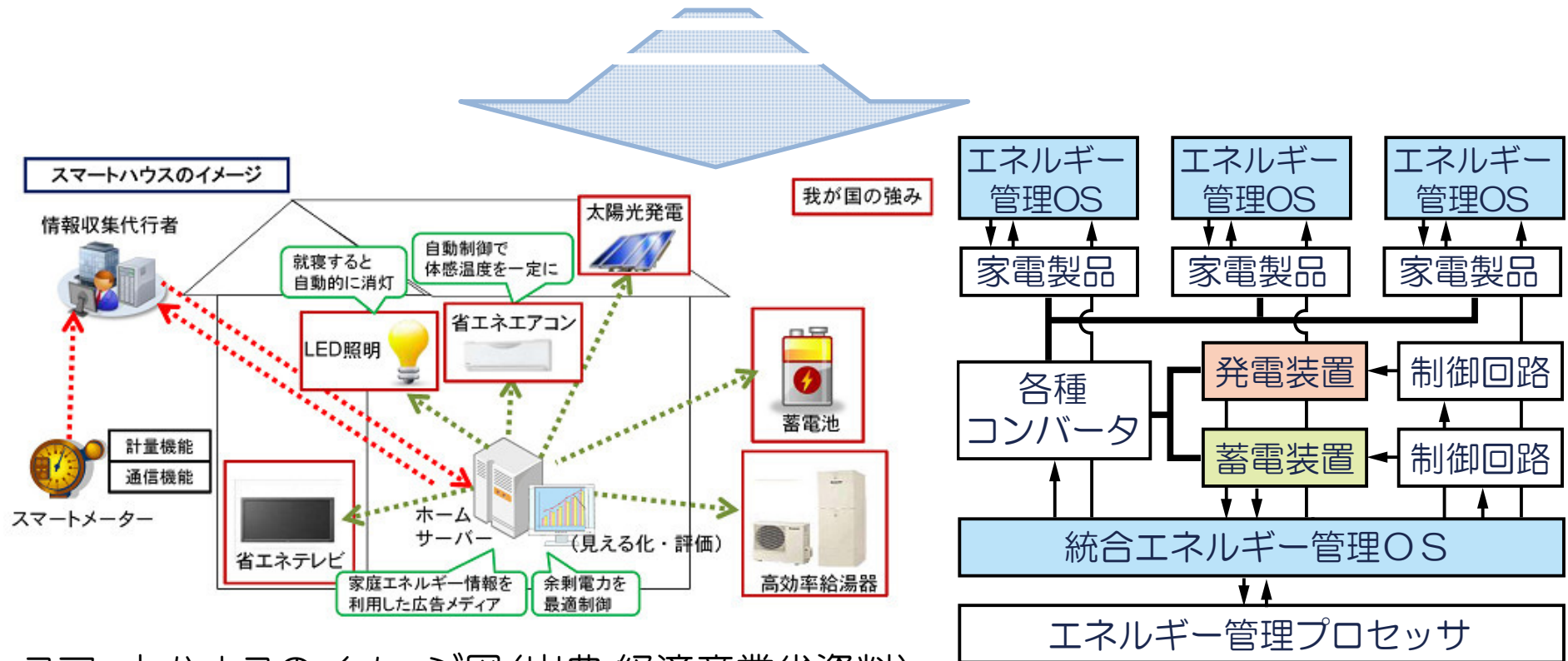
□ 技術紹介

- ✓ 電圧コンバータの特性
- ✓ エナジーストレージ
- ✓ 電圧変換ロスの低減技術

□ 将来展望

将来の展望

- 大規模システムのエネルギー管理技術への展開
 - ✓ システム自体の小型化・低コスト化と電気料金節約
 - ✓ 我が国の強みである省エネ機器の市場拡大



スマートハウスのイメージ図(出典:経済産業省資料)

まとめ

□ 最新動向

- ✓ 不安定な自然エネルギーのニーズ高騰
- ✓ エナジーストレージとコンバータの重要性拡大

□ 技術紹介

- ✓ 環境から取り入れた電力が負荷デバイスによって消費されるまでの損失を削減する技術を紹介
- ✓ 過去3年以内の新しい技術を中心に紹介

□ 将来展望

- ✓ スマートシティやスマートデータセンタなどへの応用も可能
- ✓ 発電から消費までのすべての最適化が重要