

オンデマンド型 電力ネットワークと 電力のパケット化

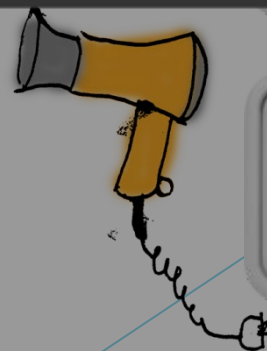
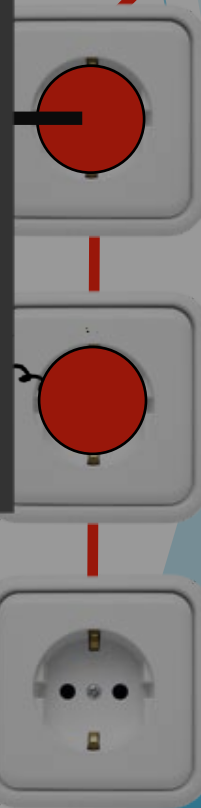
岡部 寿男

京都大学学術情報メディアセンター

家庭内の電力ネットワーク

- ▶ 家庭内で並
- ▶ すべての機
送
- ▶ つなげば即

電力を使いすぎるとブレーカーにより家庭内の全ての電力が遮断

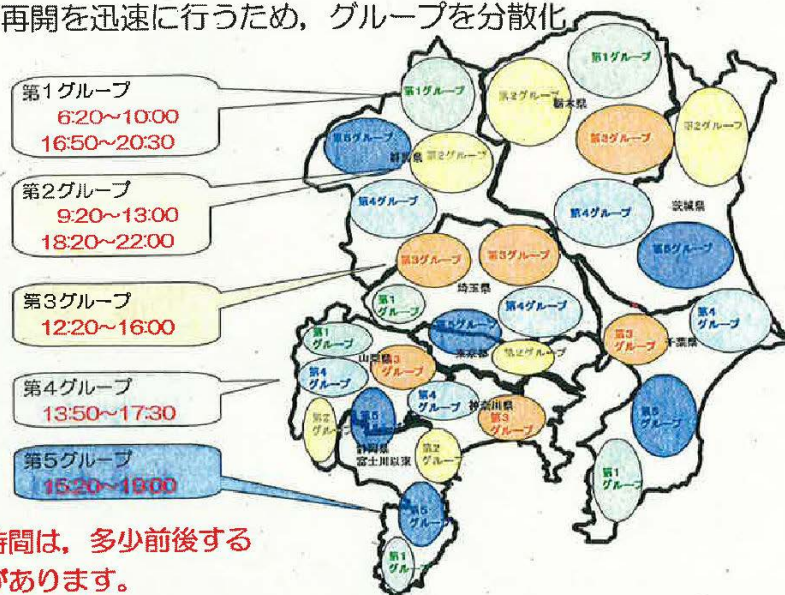


計画停電

- ▶ 需要の100%近くもの供給があるのに、なぜ広域で停電させなくてはいけないのか？

計画停電の実施方法

- 停電する地域（イメージ）【具体的な停電地域については別紙による】
供給の再開を迅速に行うため、グループを分散化



※停電時間は、多少前後する場合があります。

なぜ確実な節電が困難か？

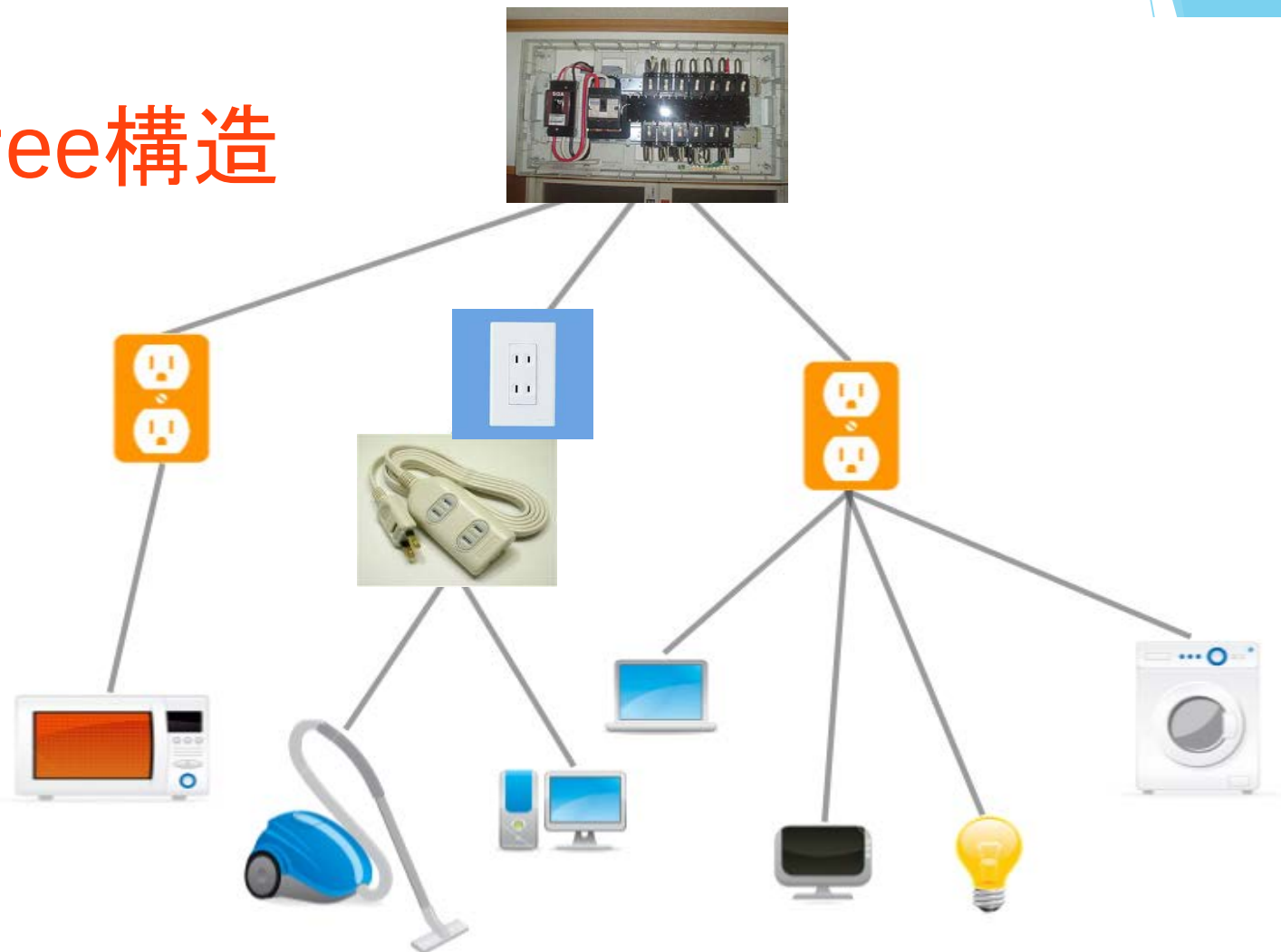
- ▶ 電気はコンセントにつなげばいつでもいくらでも使えてしまう
 - ▶ まじめな人は涙ぐましい節電努力をしている一方で、ほとんど何もしていない人を咎めるすべはない
- ▶ 制限がかかるのは回路の容量あるいは家全体で契約容量を超えてブレーカ断になる場合だけ
 - ▶ 家庭の電源容量が小さかった昔は、ブレーカが落ちないように生活者が家電の利用の組み合わせを工夫していたが...
- ▶ これでは計画的かつ公平な節電は不可能

確実な節電を実現するために

- ▶ 指定された上限以上の電力を使えないようにする
 - ▶ 電力消費機器は必要な電力を事前申告し、割り当てを受けてから使う (Energy on Demand)
- ▶ 生活者の生活の質(Quality of Life)の低下ができるだけ小さくなるようにする
 - ▶ 電力消費機器による需要予測
 - ▶ 機器間の協調・優先度制御
- ▶ 単なる節電ではなくCO2排出削減を実現する
 - ▶ 電力の由来別・品質別制御（電力カラーリング）
 - ▶ 商用電源と太陽電池などの分散電源を区別

現在の家庭内電力ネットワーク

Tree構造



提案する家庭内電力ネットワーク

高価・安定



低コスト・不安定



QoEn (Quality of Energy)

- に基づいた
- ソース選択
 - 資源予約
 - ルーティング

瞬停に弱いから
高価格でも安定
した電力を

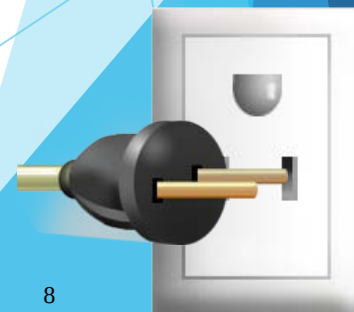


バッテリーがあるから不安定
でも低価格な電力を



オンデマンド型の電力供給 (Energy on Demand)

1. 消費機器は明示的に必要な電力の量と優先度を電力ネットワークに提示
 2. 電力ネットワーク側は、供給余力と他の機器からの要求を勘案して、優先度に従って最適割り当て
 3. 電力需要が供給能力を超えた場合には、影響が少ない機器を停止または制限
- ▶ 需要がどれだけ大きくとも、消費電力量を一定値以内に抑えることが可能



プロアクティブ制御による きめ細かな電力制御

掃除機をかけるなら、
ポットの電源はOFFで大
丈夫



冷凍食品が解けるか
ら1分以上切れちゃ
だめ



電力センサ
人感センサ
温度センサ
照度センサ

個々の機器が持つ
センサ情報を統合

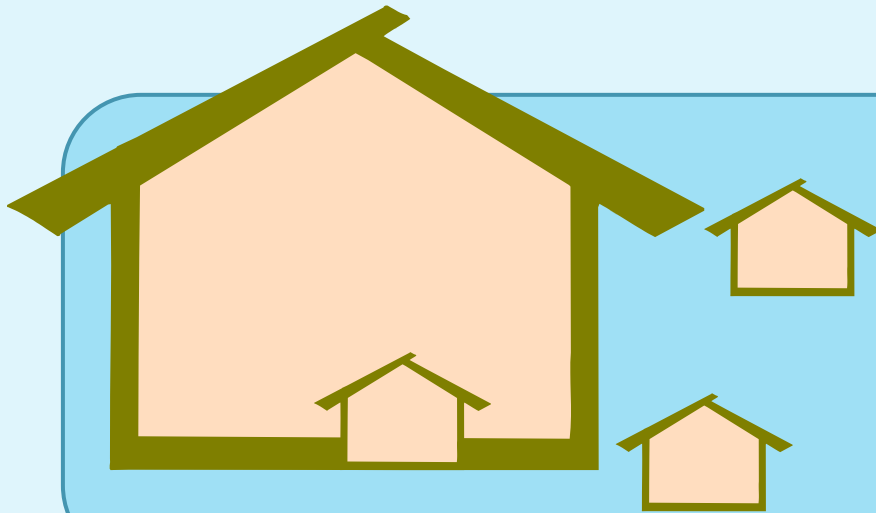


今調理中だから
切れちゃだめ



生活者の行動を予測、
QoEnパラメータ化

階層化により 家庭から地域へ



エネルギーの情報化 (i-Energy)

- ▶ 情報通信技術(ICT)による電力ネットワークの高度化に向けての考え方の一つ
 - ▶ 従来の個別的省エネ技術では実現が難しかった超省エネ生活環境、コミュニティの実現を目指す
- ▶ 京都大学・松山隆司教授が提唱
- ▶ エネルギーの情報化WGにおいて産官学連携しての研究開発を推進

<http://www.i-energy.jp>

「インターネット革命に匹敵
するエネルギー革命を」？

過去40年の間に 通信の世界に何が起きたか？

- ▶ 上位レベルのサービスは
網をかしこくすることによって提供される
 - ▶ “Intelligent Network.”
- ▶ 端末は進化の必要なし
- ▶ 垂直統合型のビジネスモデル

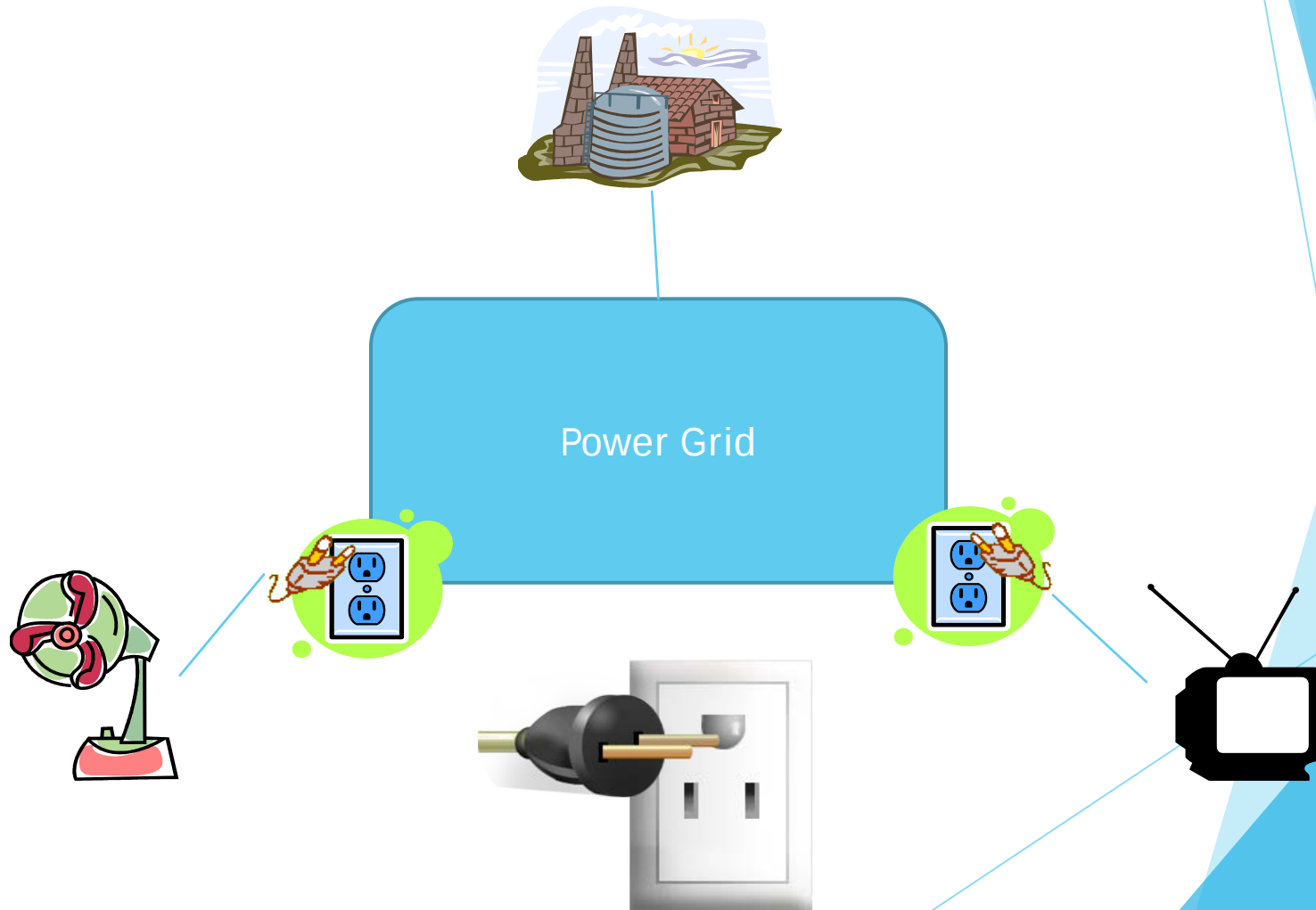
IP phone

IP Network

過去40年の間に 通信の世界に何が起きたか

- ▶ 電話網のアンチテーゼとしてのインターネットの研究開発
 - ▶ 1969 ARPANET
- ▶ 開発の中心は、通信工学の専門家ではなく計算機科学者
- ▶ キーワード
 - ▶ End-to-end 原理
 - ▶ “Stupid Network”
 - ▶ 水平分業

電力会社と (かつての) 電話会社の類似性



電力会社と (かつての) 電話会社の類似性

- ▶ 100年以上の歴史を持つ、独占的な公共事業
- ▶ エンドユーザに対する、画一的で単純なサービス
 - ▶ 100V, 50Hz/60Hz
- ▶ Smart Grid v.s. Intelligent Network
- ▶ 垂直統合型ビジネスモデル
 - ▶ 我が国の電力会社の独占支配は、かつての電電公社以上
- ▶ 自由化に対する抵抗
 - ▶ 電力会社曰く「余剰電力の受入は系の安定性に悪影響を与える」
- ▶ 電力会社は省エネに本当に積極的か？

インターネットの歴史から考える エネルギー革命

- ▶ 我々コンピュータ屋（≠電気工学者）が、今後40年に見込まれる電力網の改革に対してできる貢献は何か？
 - ▶ キーワード
 - ▶ Energy on Demand
 - ▶ Energy Routing
 - ▶ Quality of Energy (QoS in power supply)
- ▶ どうやって？
 - ▶ まずはlocal area networkからスタート
 - ▶ 家庭やオフィス
 - ▶ 徐々に地域レベルへとスケールアップ

オンデマンド型電力ネットワーク

「情報通信・エネルギー統合技術の研究開発」

研究開発期間：平成21年度～25年度（5年間）

- ▶ 戦略重点科学技術施策（総務省）
- ▶ 情報通信研究機構(NICT) 平成21年度「高度通信・放送研究開発委託研究」として実施

- 京都大学
学術情報メディアセンター 岡部研究室
大学院工学研究科 引原研究室
- 神戸大学
大学院工学研究科 塚本研究室
- 大和ハウス工業(株)
- (株)エネゲート
- (株)トランス・ニュー・テクノロジー



PoE (Power over Ethernet)
を拡張した回線交換型DC
電力スイッチングルータ



4ポートスマートタップ²⁰
(AC100V)

オンデマンド電力ネットワークのための電力ルーティングプロトコル

- ▶ IP (Internet Protocol)ネットワークと同様の自律分散型
 - ▶ 固定的なサーバに依存しない
 - ▶ IPネットワークにおけるQoS (Quality of Service)ルーティングプロトコルを応用
 - ▶ QoSルーティングプロトコル
 - ▶ リンクステート型、階層型
 - ▶ 資源予約プロトコル
 - ▶ RSVP (Resource reServation Protocol)に準じて受信者主導による資源予約
- ⇒ インターネットにおいて品質保証を実現するために研究開発されてきたプロトコルを活用

オンデマンド型電力ネットワーク の要件と実装

▶ 要件

- ▶ 電力を、品質ごとに区別して別々に配送できること
⇒電力のカラーリング
- ▶ 消費機器が、申告した以上の電力を消費することができないこと
 - ▶ 電源と消費機器の1対1の対応に合わせた論理的な配送経路

▶ 実装

- ▶ 独立配線＋電力ルーティングスイッチ（回線交換）
 - ▶ プロトタイプとしてPoE (Power over Ethernet)をベースに拡張
- ▶ 電力の packets 化＋電力パケットルータ（パケット交換）

交流 v.s. 直流

- ▶ なぜ交流が主流か？
 - ▶ エジソンの時代に論争
 - ▶ 直流は電圧変換が困難
 - ▶ 今は事情が異なる
 - ▶ 直流は危険
 - ▶ 今ならスイッチもソフトウェア制御可能
- ▶ 一部では直流も使われている
 - ▶ 鉄道 1500V, 600V
 - ▶ 自動車 12V, 24V
 - ▶ 電話会社 -48V
- ▶ 家庭内では
 - ▶ ほとんどの機器が最終的にDCに変換して使っている
 - ▶ ACアダプタの山
 - ▶ 分散電源は多くが直流
 - ▶ 太陽電池、燃料電池
 - ▶ 蓄電デバイスは直流
 - ▶ 蓄電池、キャパシタ
 - ▶ DC-DCの電圧変換はAC-DC/ DC-ACより高効率

⇒家庭内直流化による省エネの可能性

通信と給電の一体化 (情報通信とエネルギーの統合)

- ▶ 古典的には
 - ▶ 電話機への局給電 (-48V)
- ▶ 周辺機器への給電：バス型
 - ▶ USB (5V, 0.5A (USB2.0), 0.9A(USB3.0))
 - ▶ PoweredUSB (5V,12V,24V, 6A)
 - ▶ IEEE 1394 (8~33V, 1.5A)
- ▶ Power over Ethernet (PoE)

オンデマンド型

PoEとPoE+

PoE (Power over Ethernet) IEEE802.3af

- Ethernetの配線に使うUTPケーブルを利用して電力を供給する技術

1. 検出プロセス

- 接続装置がPoE対応受電装置かどうかの検出を実施。
- 接続装置がIEEE802.3afに準拠した受電装置である場合は、電力クラス分類プロセスへ移行。
- PoEに対応していないネットワーク機器の場合は電力を供給しない

2. 電力クラス分類プロセス

受電装置の消費電力を測定し、受電装置の消費電力が該当する電力クラスを判断して電力供給プロセスへ移行。

3. 電力供給プロセス

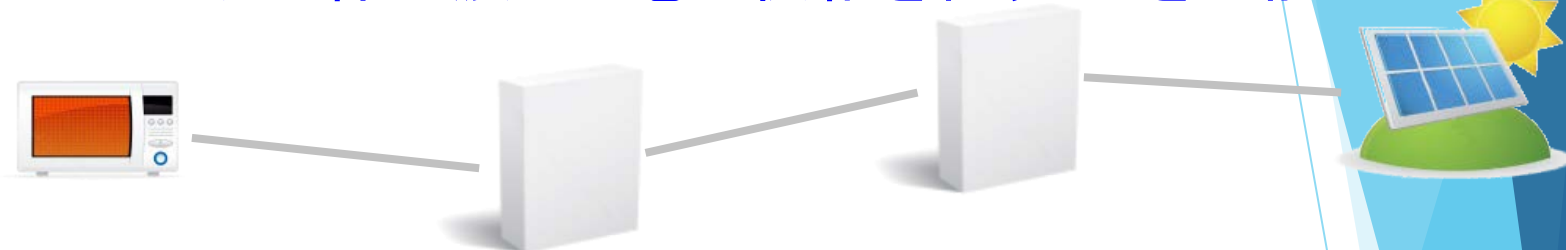
PoE + における拡張 IEEE802.3at

- 給電能力の増強（給電側30W）
- 給電機器と受電機器のデータリンク層通信によるネゴシエーション
 - LLDP-MED



オンデマンド型電力ネットワークのための PoEの拡張

電源から消費機器まで
ネットワーク全体に渡って電力供給を行うことを可能に



消費機器が動的に電力の要求を出すことを可能に

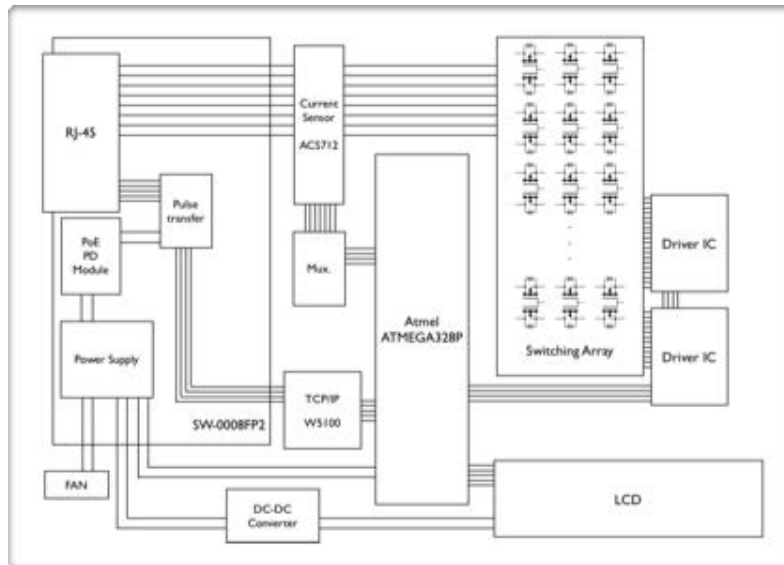


動的+静的 電力供給を実現する PoE 新方式を提案

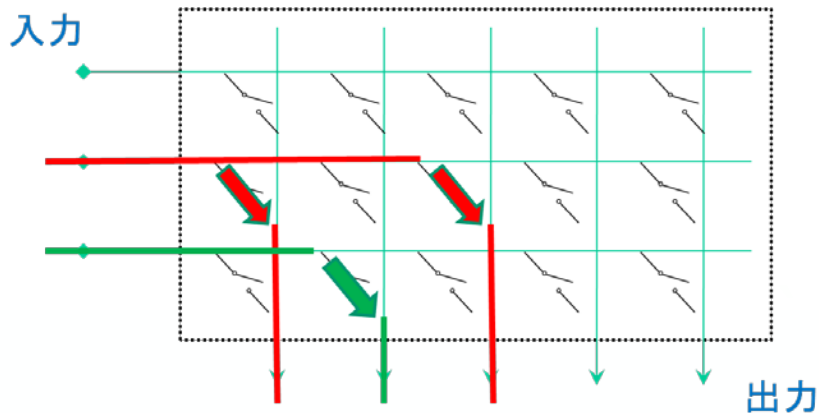
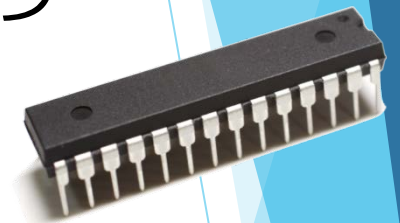


静的：通信インタフェースへの電力供給
動的：機器を動作させるための電力供給

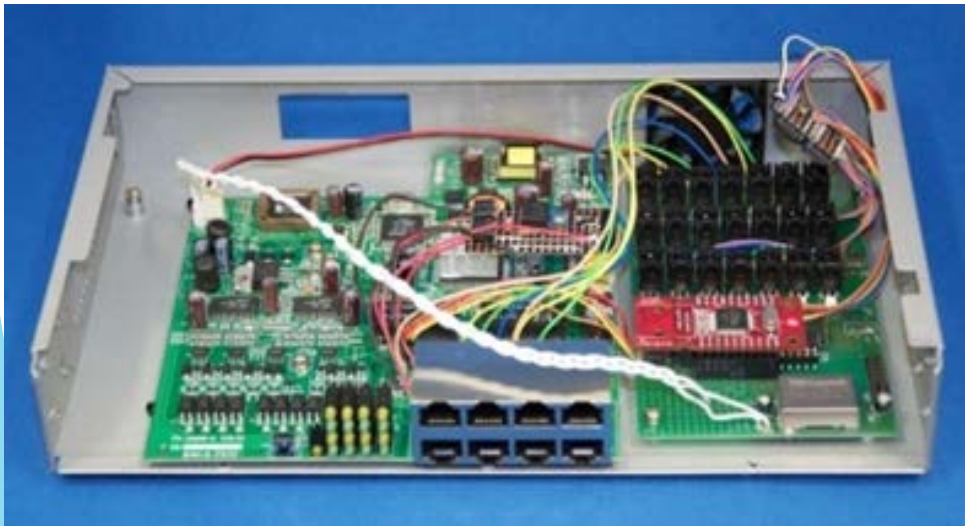
ハードウェア構成

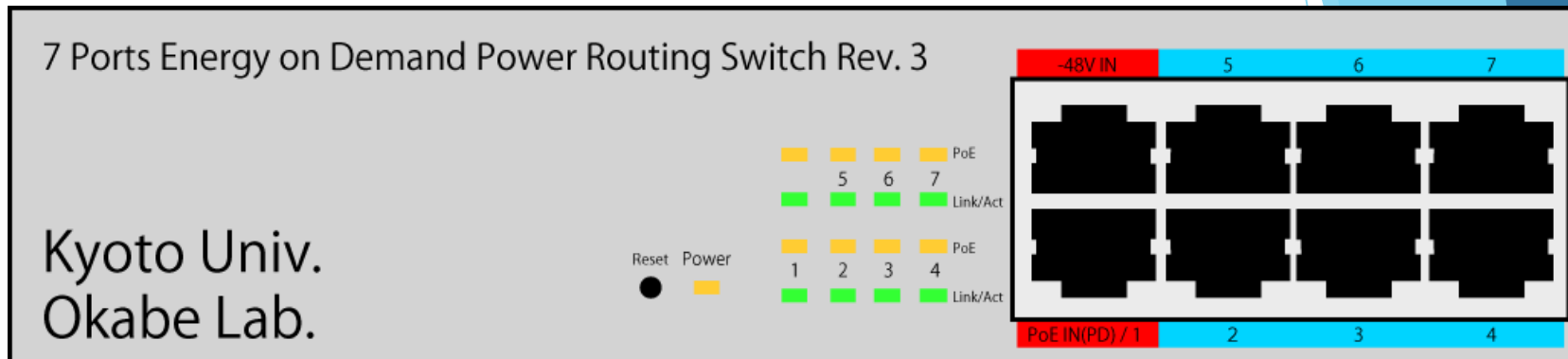


- 回線交換スイッチアレイ
- コントローラ
- 受電回路
- デバッグ/拡張端子
- 電力センサ



実装





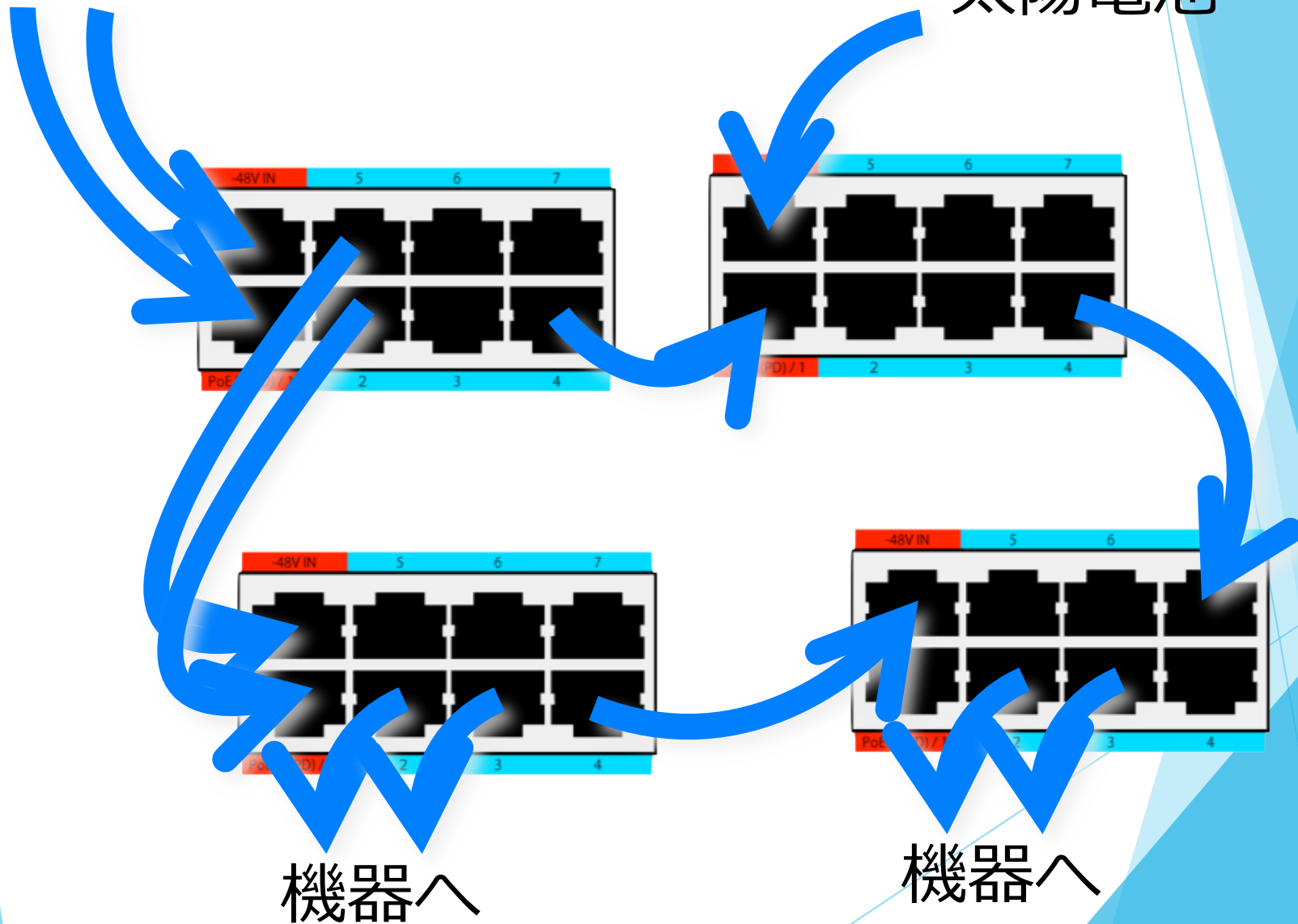
各ポートの機能

-48V IN	PoE'での受電ポート Ethernet通信はできません
PoE IN(PD)/1	PoE(IEEE 802.3af)での受電ポートTypeA/B対応 Ethernet通信可
2-7	PoE(IEEE 802.3af) TypeA給電、Ethernet通信、PoE'回線交換 ポート

接続例

商用電源

太陽電池



PoEにおけるオンデマンド型電力供給のためのリンク層探索プロトコルの拡張提案

Power over Ethernetによる電力供給

LANケーブル上で情報と共に直流電力を供給可能

LLDPプロトコルにより、機器が必要な電力を要求可能

(Link-Layer Discovery Protocol)



オンデマンド型電力供給を可能にするためのLLDPの拡張

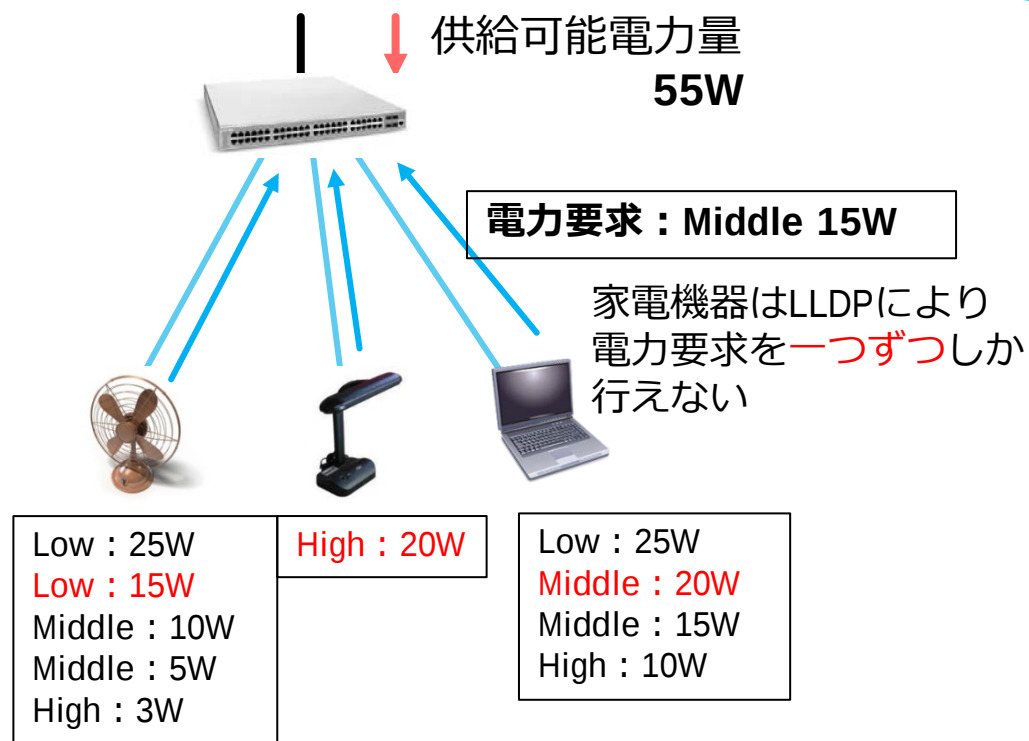
電力要求の問題点

- (1) 機器から**優先度**を伝えることができない（優先度は電力サーバが所持）
- (2) 電力サーバのほうで要求の受理不受理が決定され、機器に結果が送信されない



- (1) 電力サーバから機器への通信にのみ使用される **Power Priority** の変数に機器の優先度を格納することを提案
- (2) 供給可能電力の不足の通知のために**電力抑制メッセージ**を新規に提案

PoEを用いたオンデマンド型電力供給における 公平な電力割り当ての提案



供給可能電力の範囲内で
公平な電力割り当てを行う
アルゴリズムの提案

公平とは

- ・優先度の逆転が起きない
- ・先に電力要求を行ったほうを優先
- ・中間状態でもこの条件を満たす

各機器は**優先度**と**消費電力**の組を持つ表を持つ
優先度は Low ・ Middle ・ High の三種類

反省

- ▶ IoT (Internet of Things)の時代を迎え、各機器がすべての動作において明示的に電力を要求するEoD原理主義はスケーラビリティにおいて無理がありそう
- ▶ そもそもインターネットにおいても事前予約型の品質 (Quality of Service)保証は成功していない
 - ▶ IntServ, DiffServ
 - ▶ ATM SVC
 - ▶ MPLS
- ▶ 電力パケットネットワークにおいては、インターネットの基本思想であるKISS (Keep It Simple and Stupid)に戻るべき
 - ▶ ベストエフォート型電力ネットワーク

電力のパケット化

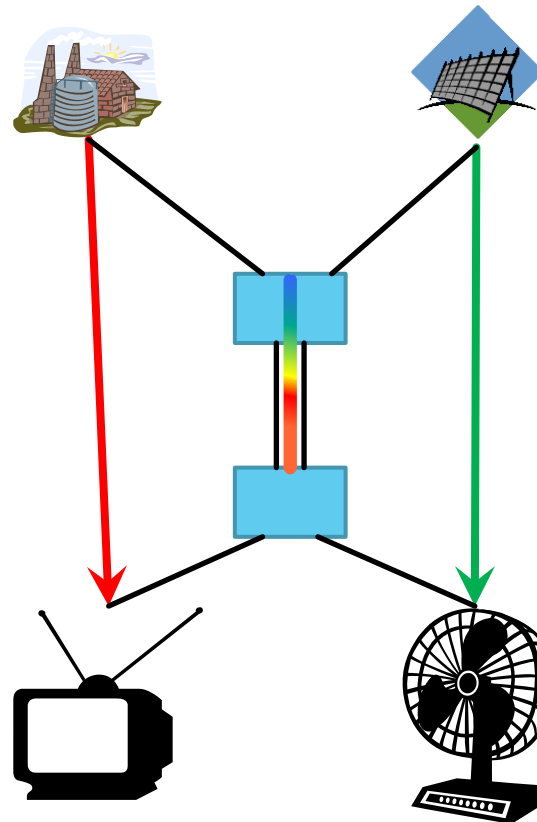
回線交換からパケット交換へ

▶ 要件

- ▶ 従来の「電灯線」
(100V/60Hz)とは独立
の新たな配線の上にオ
ンデマンド型で電力を
配送
- ▶ 直流給電
- ▶ 電力のカラーリング

▶ 実現技術

- ▶ 回線交換型
- ▶ 電力のパケット化



JST研究成果展開事業スーパークラスタプログラム
京都地域「クリーン・低環境負荷社会を実現する高効率
エネルギー利用システムの構築」

<http://kyoto.supercluster.jp/>

サブテーマ

「電力パケット配送プロトコルの設計と実装」

▶ サブテーマの全体概要

- ▶ 入力側となる分散電源から出力側となる電力消費機器まで、電力消費機器による電力要求に応じて**電力パケット**を伝送するオンデマンド型電力ネットワークを考え、その実現技術を研究開発する。

▶ 上位テーマとの関係性

- ▶ SiCパワーデバイスによるDC電力パケット伝送〔引原グループ〕を前提に、電力消費機器が電力パケットを直接受け取って動作する全く新しい電力ネットワークを、家庭内のような小規模で一元的に管理可能な形で実現する。

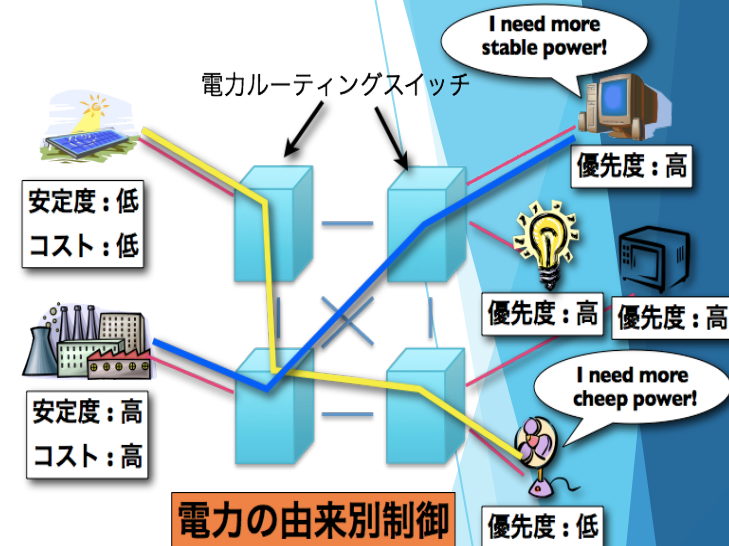
『電力パケット配送プロトコルの設計と実装』研究テーマの概要

目的

- ▶ DC電力パケットを伝送する電力ルータから構成されるDC電力パケット型電力ネットワークにより、分散電源から各電力消費機器への電力の伝送が、オンデマンド型かつ高効率で行えるようにすることで、デジタルの時代にふさわしい全く新しい電力配送ネットワークを実現する。

内容

- ▶ SiCパワーデバイスによる電力パケット化を前提に、電源から電力消費機器へ電力パケットを配送する際に交換されるべき情報と、その情報に基づく電力パケットのヘッダ情報の生成ならびに電力ルータでの制御についてモデル化を行い、それに基づいた高効率かつ低消費電力の電力パケット伝送ならびに経路制御プロトコルを、インターネットのプロトコルであるTCP/IPに倣って設計する。



Si半導体集積回路技術による通信におけるアナログからデジタル、電話からインターネットへの革命を、SiCパワーデバイス技術により電力配送でも実現

Motivation

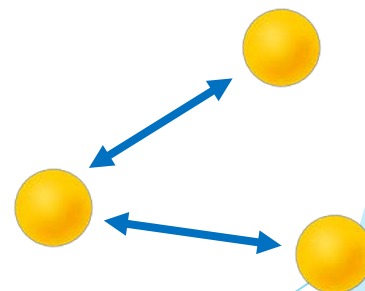
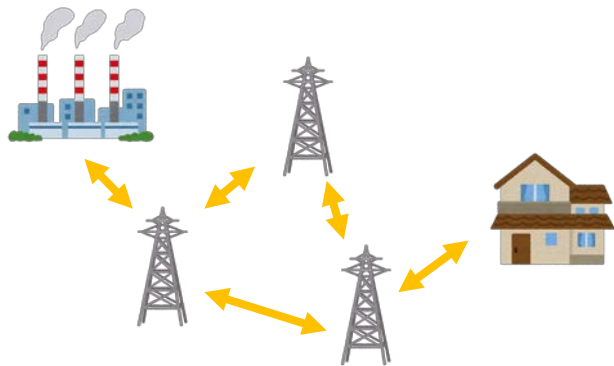
- ▶ 現在の電力ネットワークへの疑問
 - ▶ 交流、50Hz/60Hz、国レベルで周波数と位相が同期
 - ▶ 同時同量の原則
- ⇒根本は19世紀のまま
- ▶ 通信の世界での過去40年の革命
 - ▶ アナログからデジタルへ、そしてパケットへ
 - ▶ 半導体技術、集積回路技術の進歩
 - ▶ TCP/IP : LAN (local area network)の技術を全世界レベルまでにスケールアップ
- ▶ 目標
 - ▶ 通信の世界と同様の変革を電力ネットワークでも実現する
 - ▶ SiCパワー半導体の進歩
 - ▶ “LAN”、すなわち家庭レベルから着手

電力配送へのICT適用の新しい形の模索

▶ 電力配送へのICTの適用

- ▶ どのくらい詳細なレベルにまで適用できるか？
- ▶ そのためにはどんな電力配送技術が考えられるか？

▶ 系統制御からInternet of Electron?まで



通信におけるパケット多重

1. 占有



2. 時分割多重



3. 時分割多重 + タグ



4. 非同期 (パケット多重)



ICT側からの電力配送方式への 要求仕様

パケット交換

- 連続量の取り扱いは難しい
- ICTでは、あらゆるものを離散化・量子化・符号化

ストア・アンド・フォワード

- 様々な問題に対処する時間を確保
- パケットの内容の検証
- 物理層の局所化

ICTにおけるインターネット技術の成功から考える

システム設計の階層化・要素設計の局所化

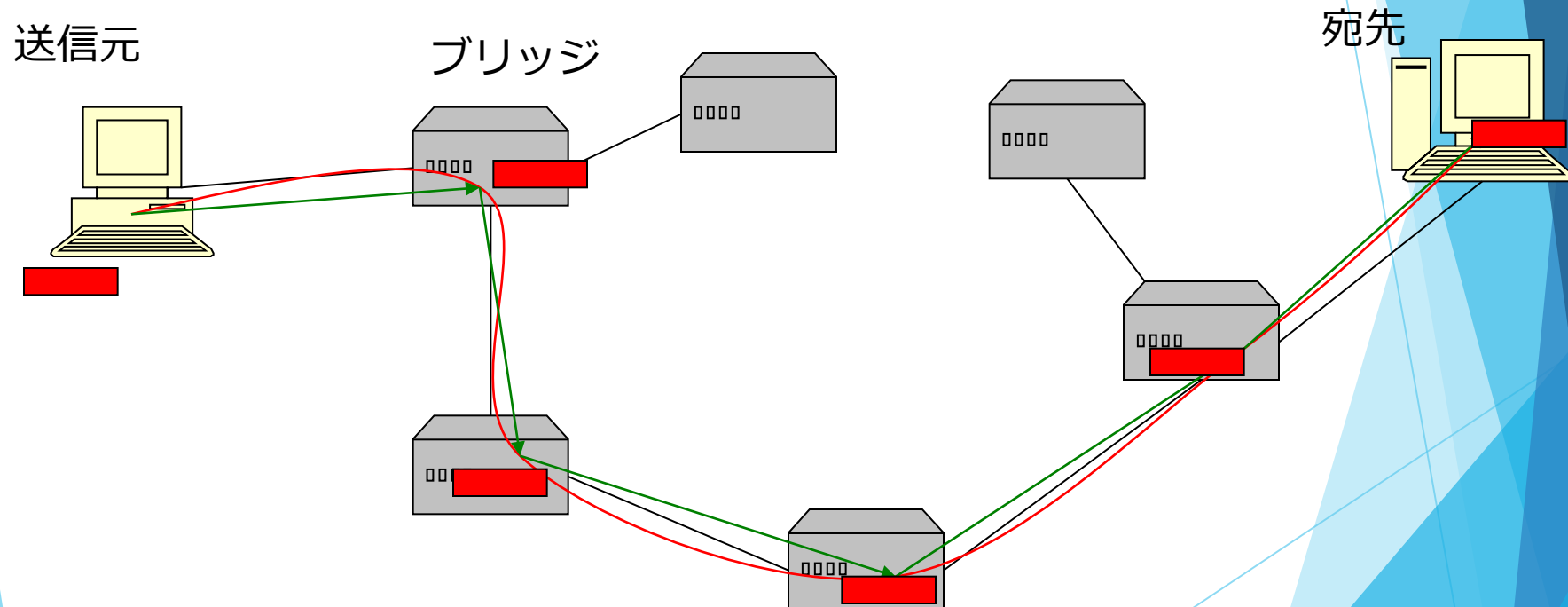
- 大規模、マルチドメイン、ヘテロジニアスなシステム
- 障害、リスクの局所化

自律分散制御

- マルチドメインなネットワーク
- 障害、リスクの局所化

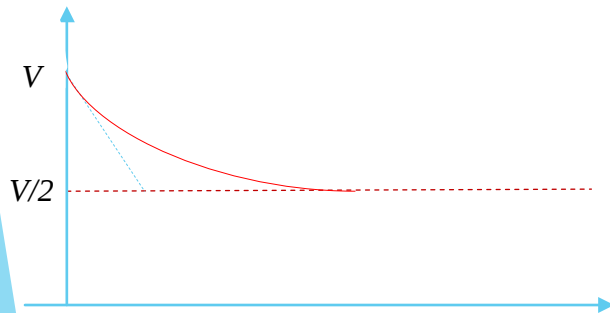
インターネットにおける パケットの配送

パケットはルータないしブリッジで一旦受信され次段へと送信される



Store and Forward

電力パケット配送 — 物理層の設計(1)



(初期状態)

左のキャパシタに電荷 Q 、右のキャパシタは電 荷 0

電圧： $V=Q/C$ エネルギー： $\frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} Q^2/C$

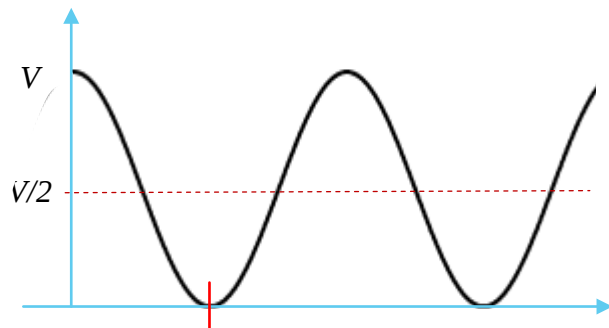
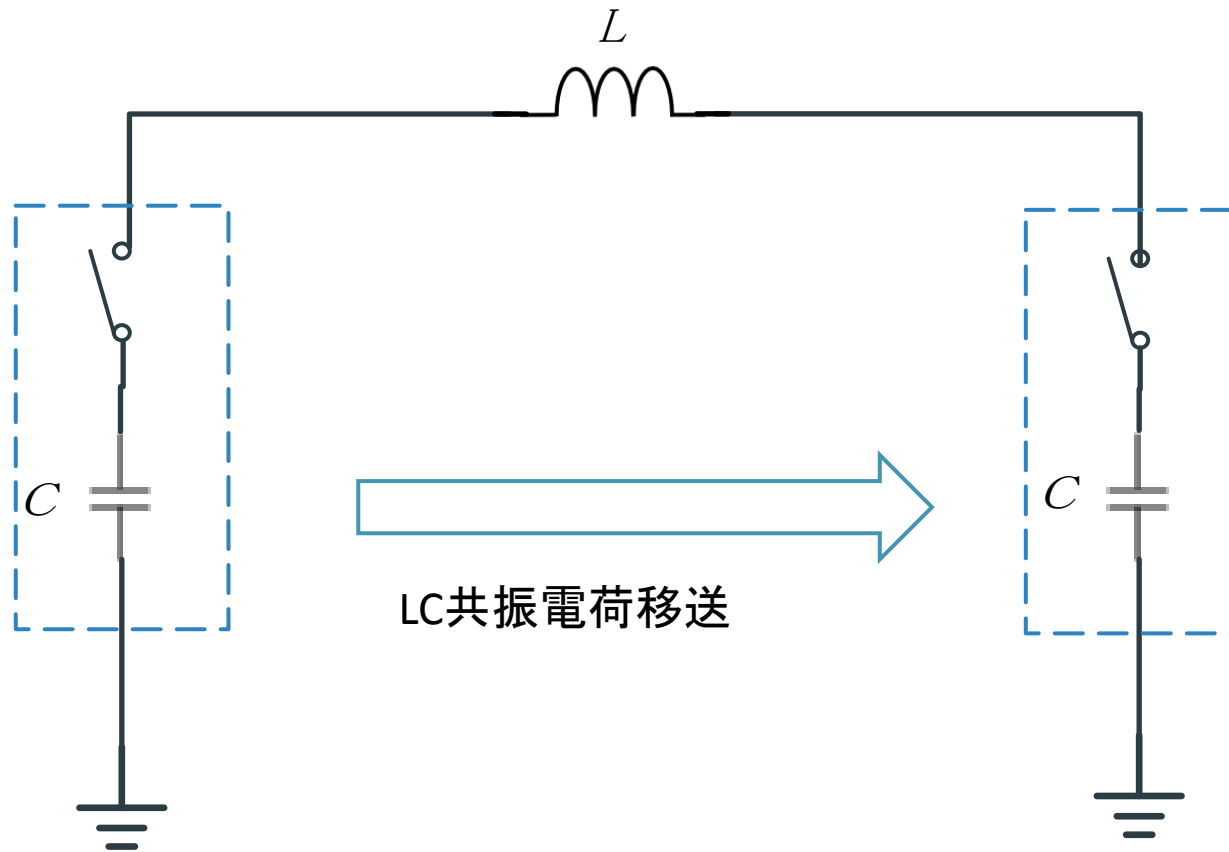
(両方のスイッチをON)

定常状態では電荷は左右均等に $Q/2$ 、電圧はどちらも $V/2$

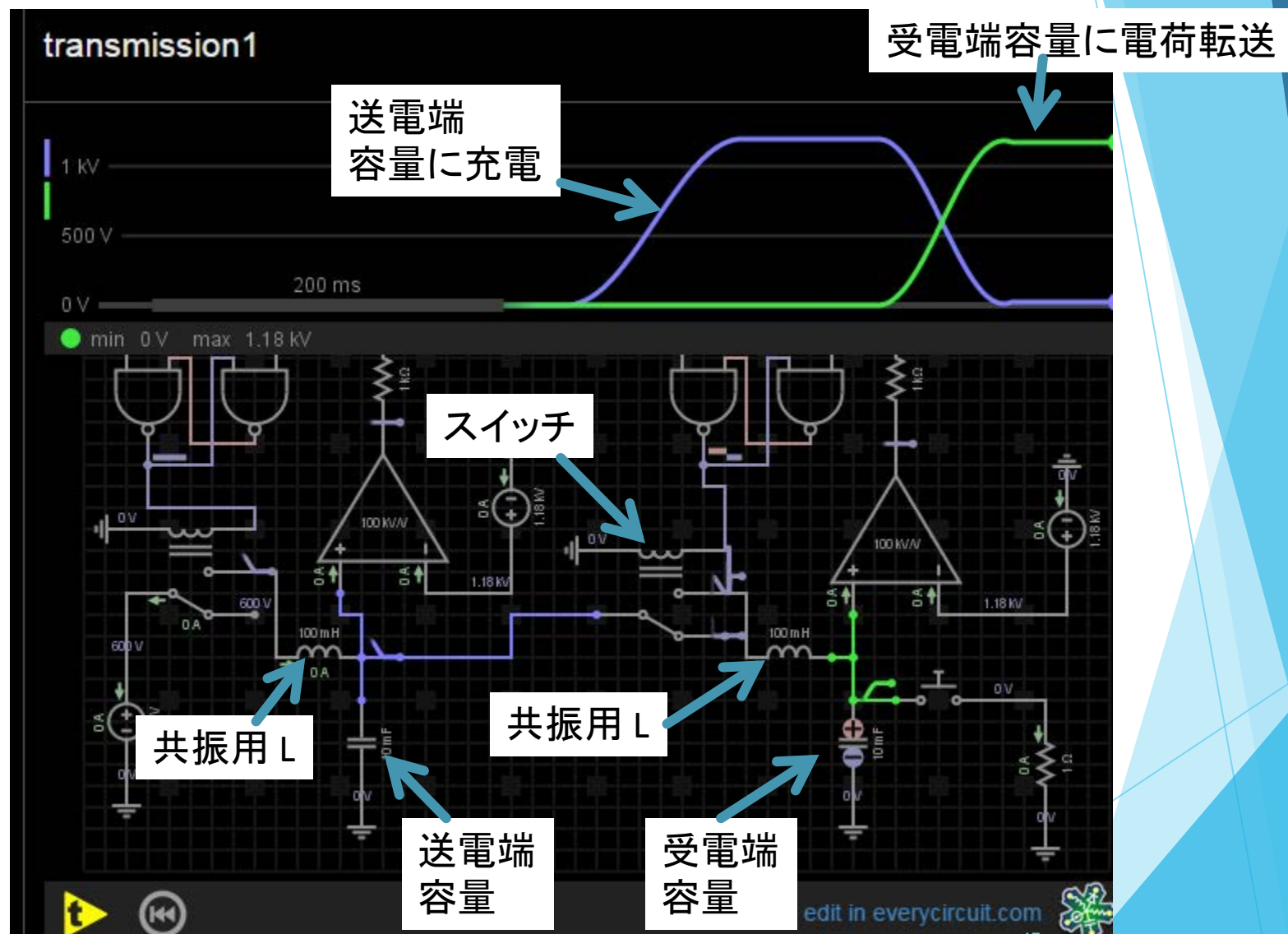
エネルギーは左右それぞれ $\frac{1}{8} CV^2 = \frac{1}{8} Q^2/V$

すなわちこの過程で左から右へ $\frac{1}{8} Q^2/C$ のエネルギーが伝送され同時に $\frac{1}{4} Q^2/C$ のエネルギーが（抵抗で）失われる？

電力パケット配送 — 物理層の設計(2)



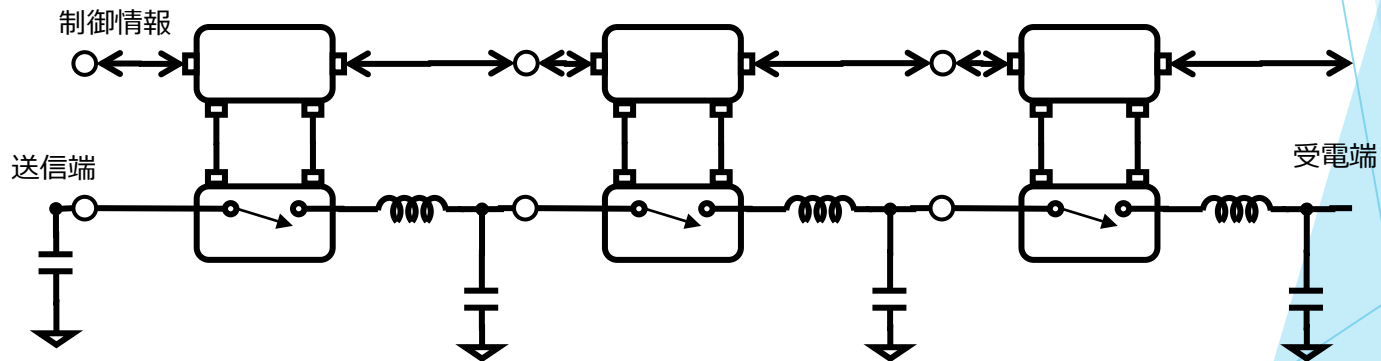
LC共振電荷移送の動作例 (シミュレータEveryCircuitを利用)



スイッチをONして1/2波長共振したところでスイッチをOFFすることで電荷がC1からC2に移送される

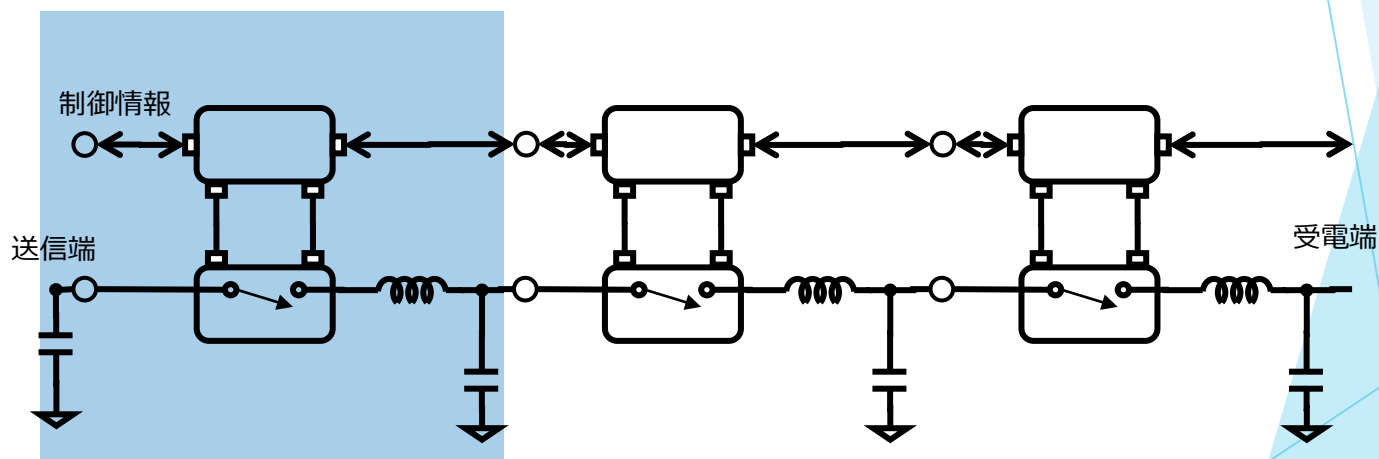
新しい電力パケット配送回路 技術の提示

- ▶ 蓄電素子間で、電荷をバケツリレーする
- ▶ 10段、20段通っても、システムとして致命的な量のエネルギー損失を発生しない素子が必要

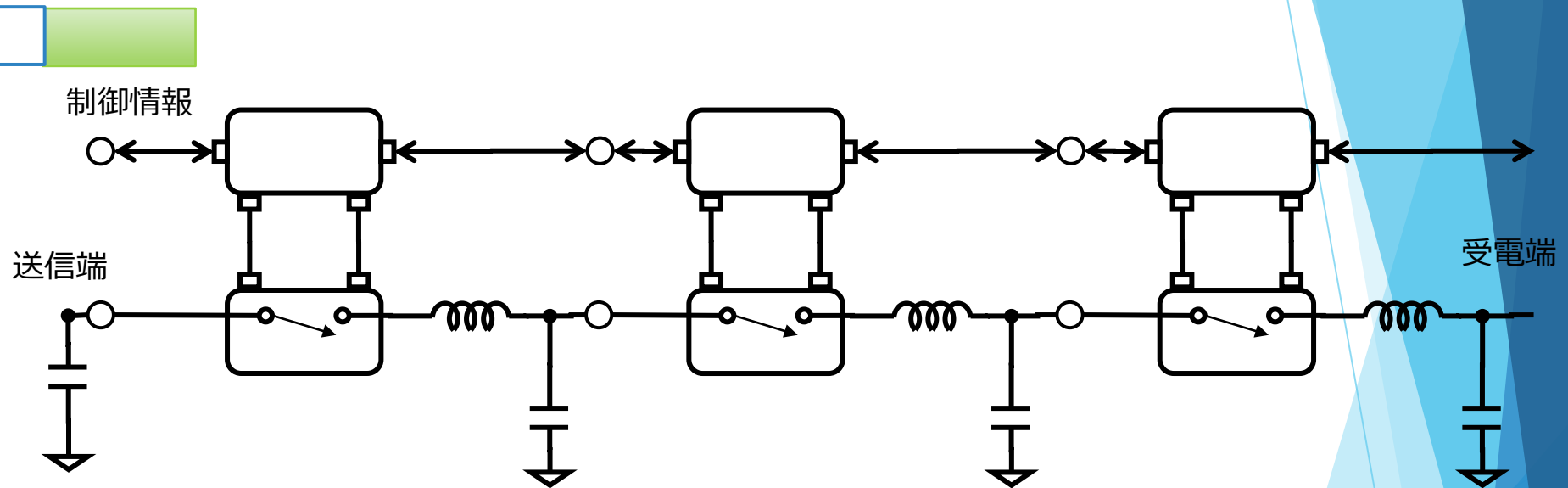


新しい電力パケット配送回路 技術の提示

- ▶ 電力回路の動作は局所的にのみ行われる



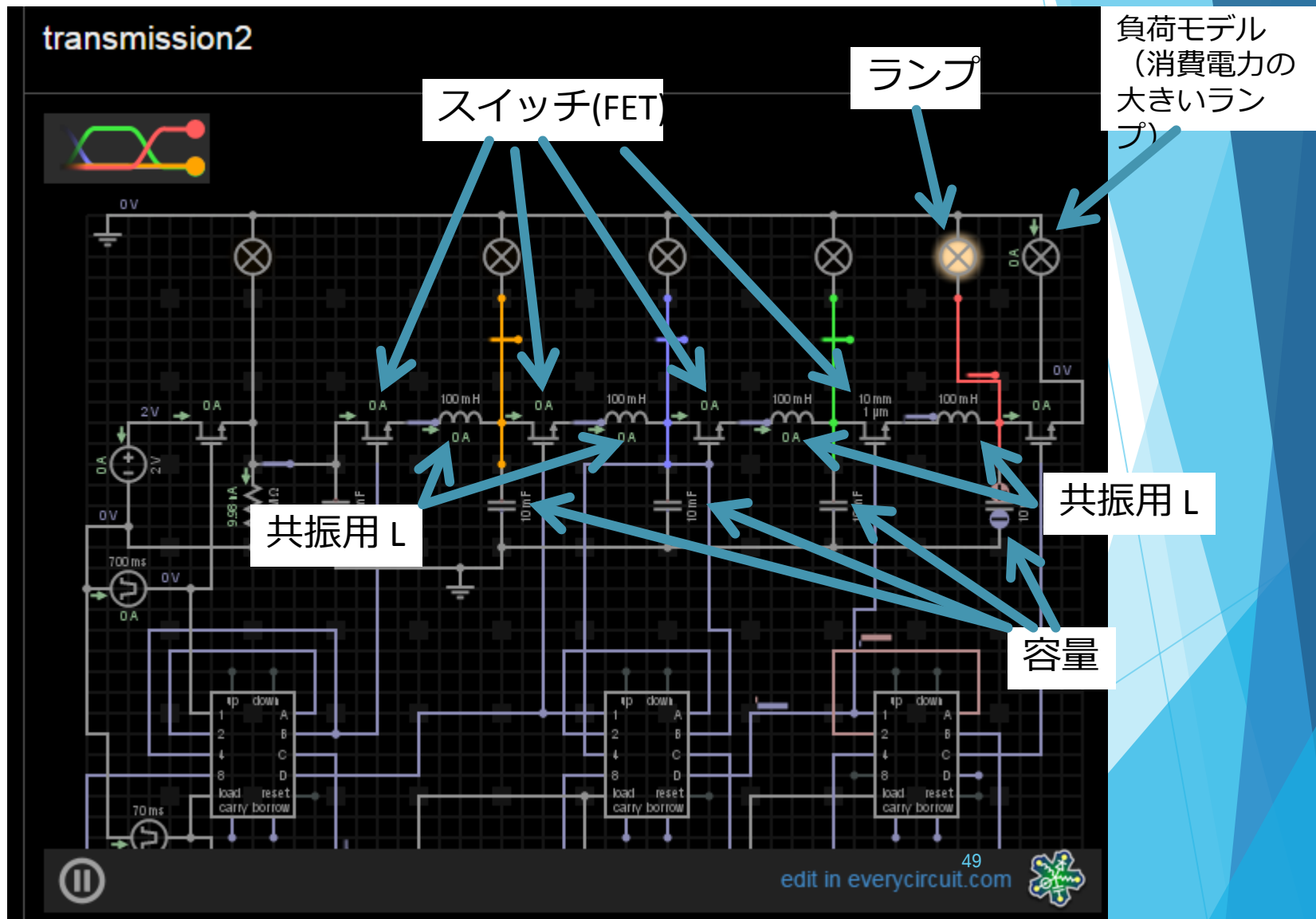
LC共振電荷移送型 電力パケットの基本モデル



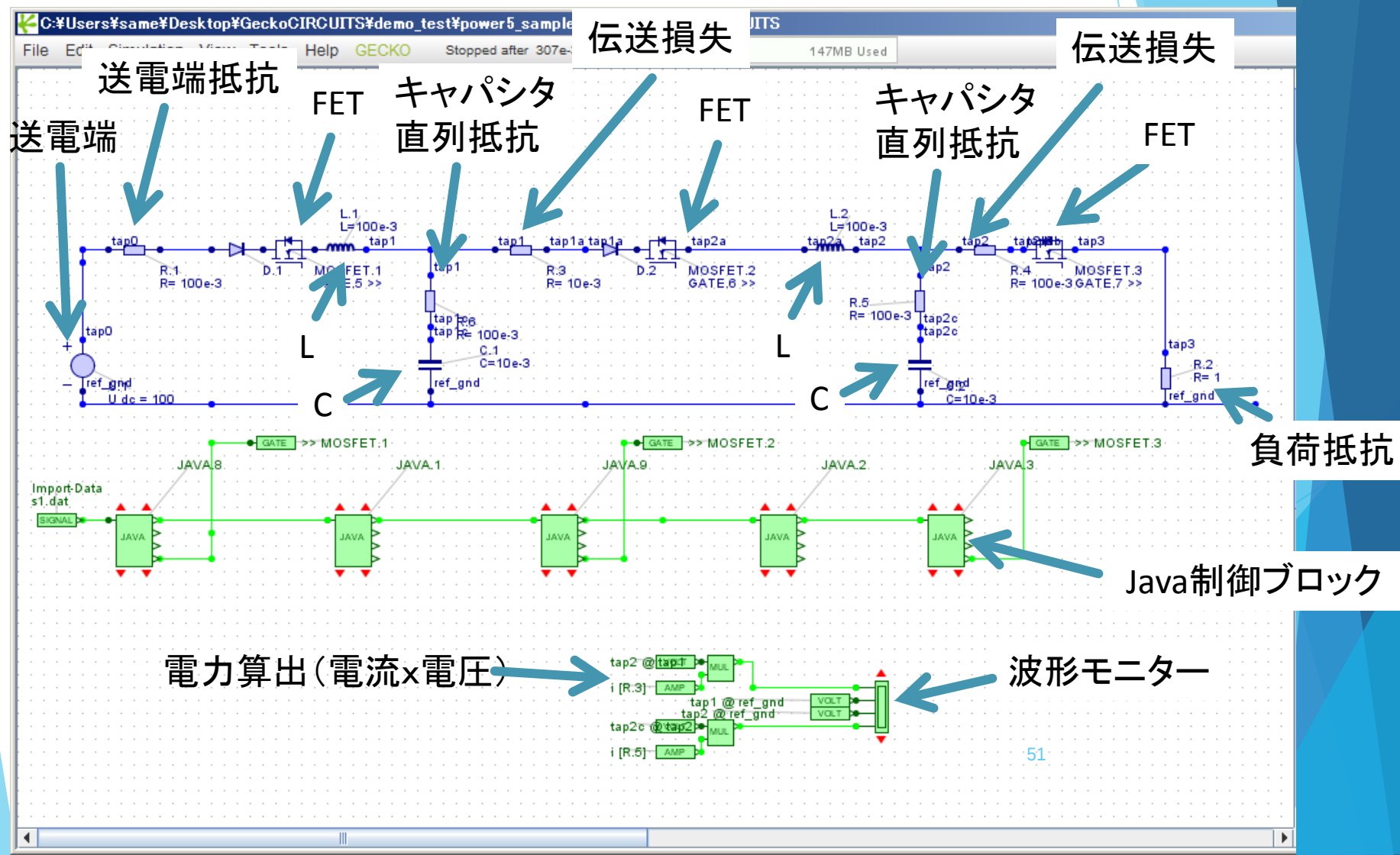
- 電力ルータではpassiveな電力バッファ（キャパシタ）に蓄積された電荷をhop by hop で1段ごとに伝送していく
- ヘッダ（制御情報）は必ずしも電力と同じメディアで配送されるとは限らない

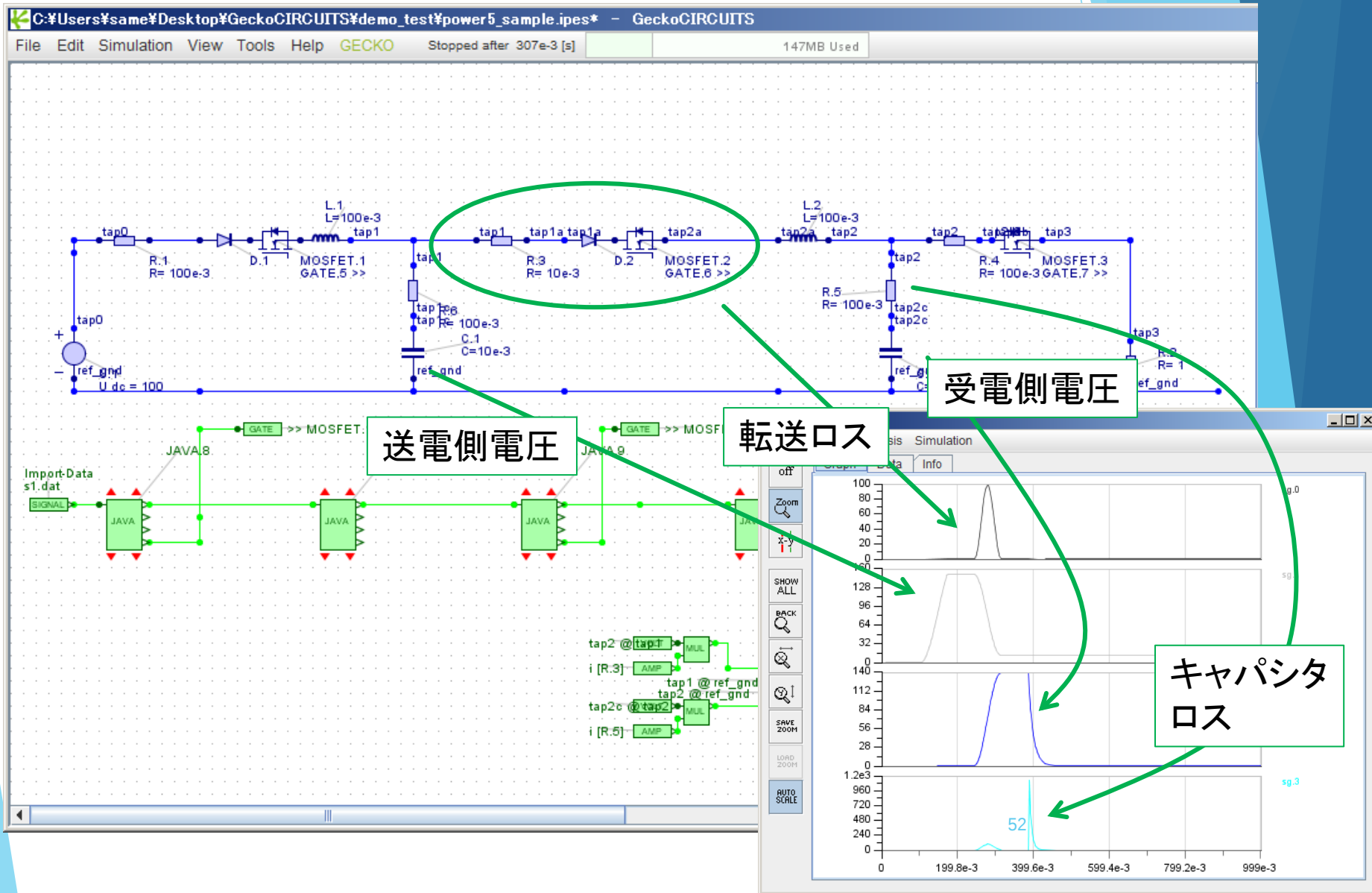
1対1モデル

シフトレジスタのタイミング信号での転送

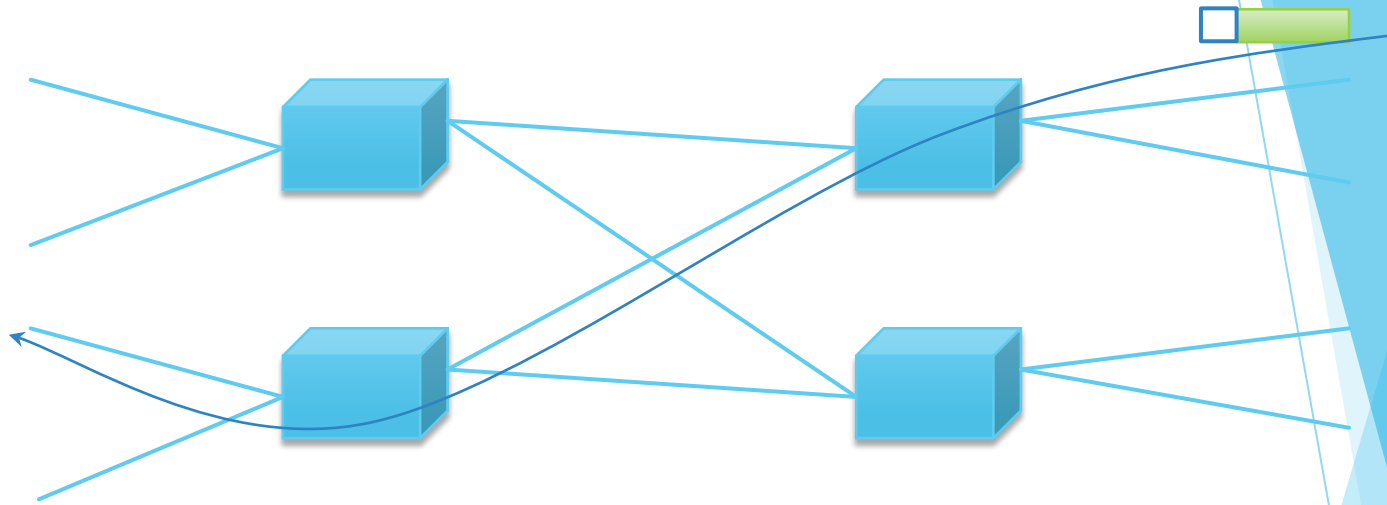


損失見積もりモデル (シミュレータGeckoCircuitを利用)





パケット交換



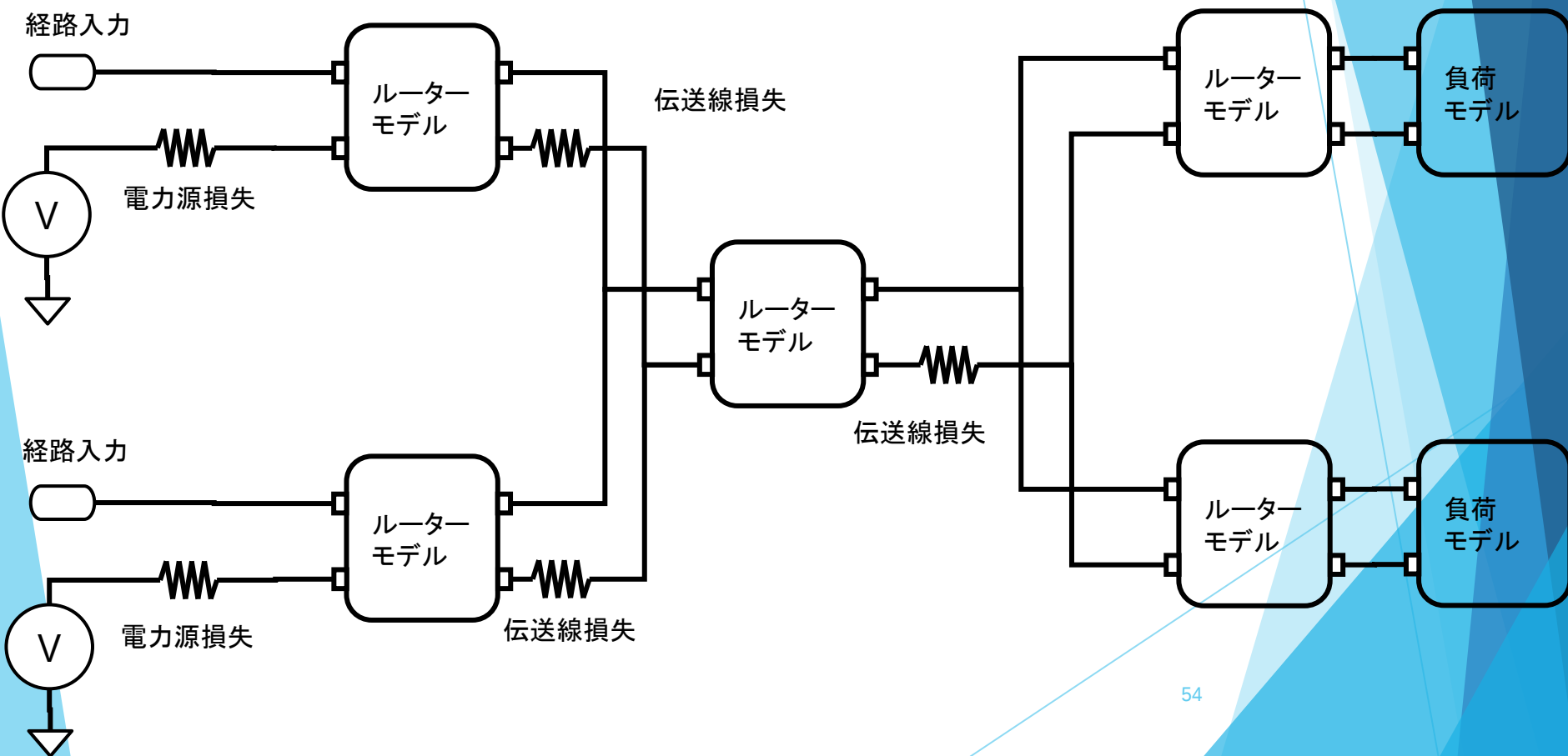
ルータでのパケットの扱い

- ▶ Store and forward
- ▶ Cut through

ヘッダの情報

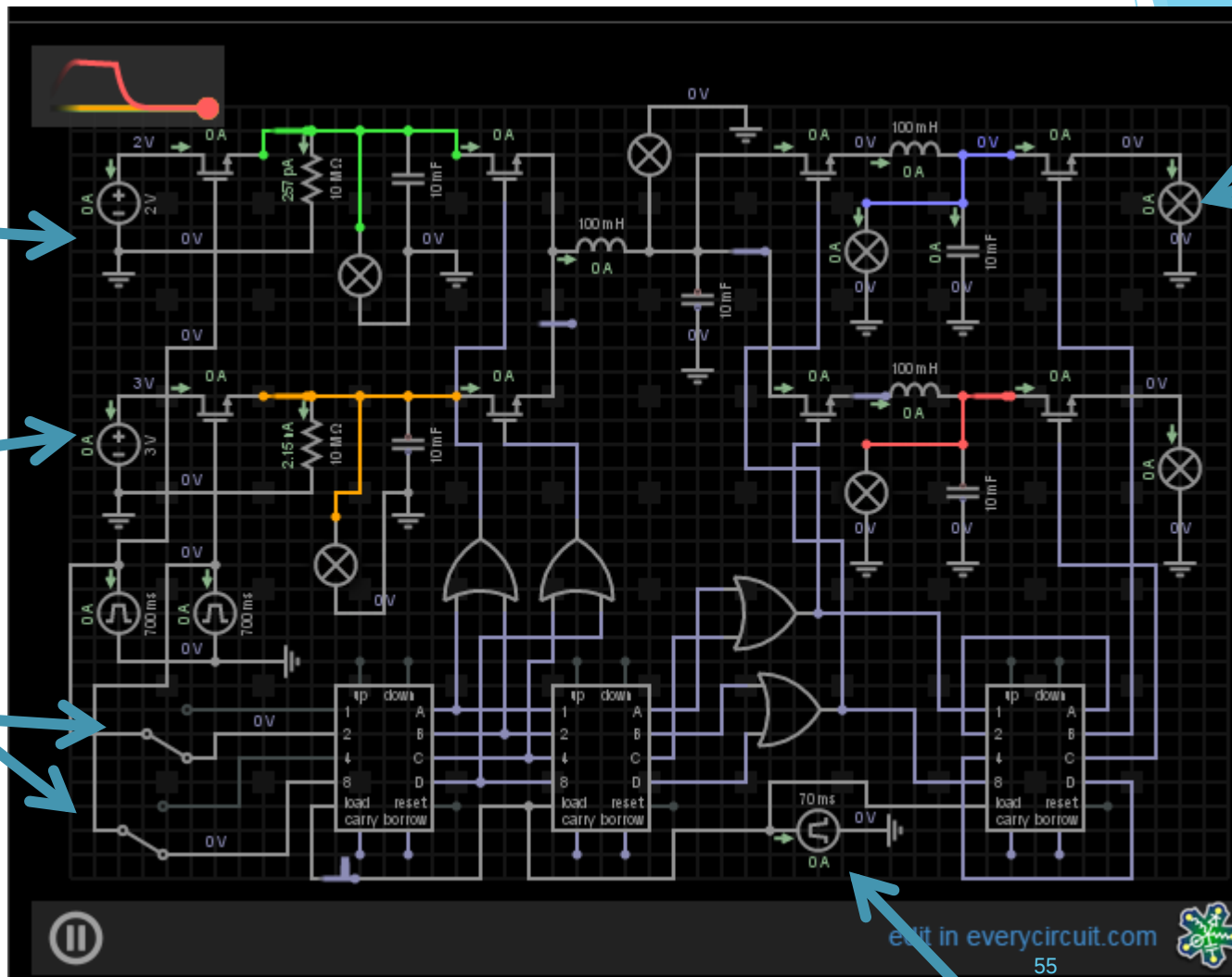
- TCP header
アプリケーションを識別する
ルータでは参照されない
- IP header
ルータはこれによりnext hopを決定
end-to-end で不変
- L2 header
リンクごとに書き換わる

2対2モデル例



2対2動作モデル例

(シミュレータEveryCircuitを利用)



電力源1

電力源2

経路制御

負荷1

負荷2

転送周期クロック源

電力パケット研究の動向

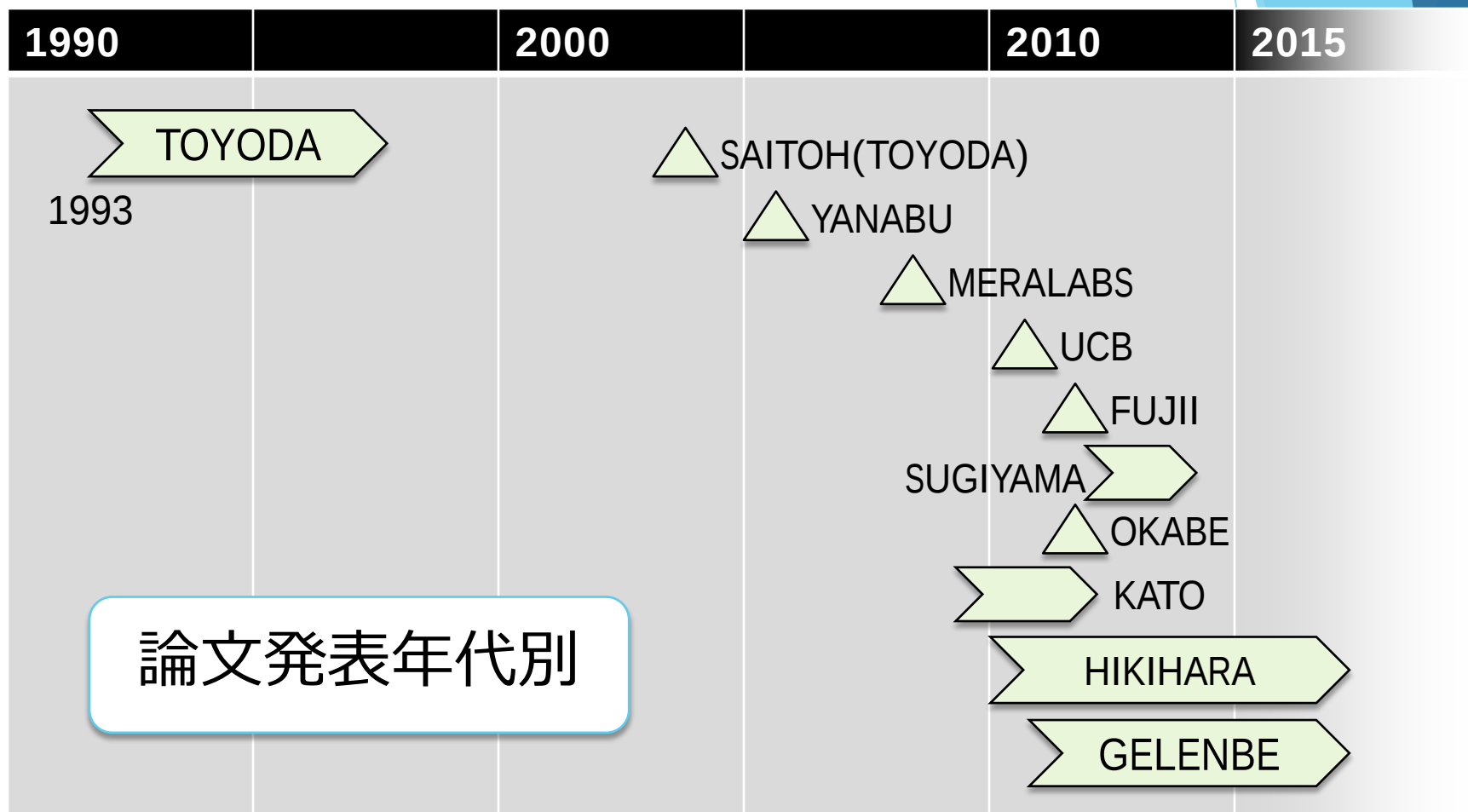
▶ 動機

- ▶ 1990年代、商用電力市場の自由化、商用電力網の不安定性に対する新しい提案
- ▶ 2000年代後半、スマートグリッド
- ▶ 2010年代、エネルギーハーベスティング方面からの参入

▶ 分類

- ▶ コンセプト提案
- ▶ グラフ等をベースにした論理モデルを設定し、ネットワークの動作を検証 [GELENBEら]
- ▶ ネットワークの制御方式の提案
- ▶ 物理的に電力をパケット化 [引原ら]

研究グループ



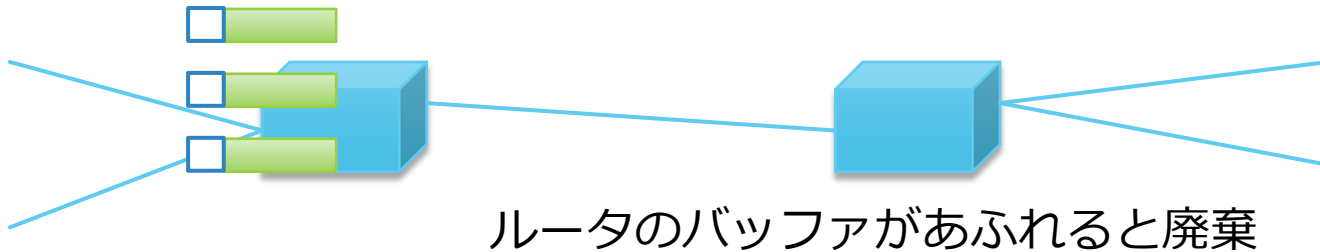
電力パケット研究の分類

	電力パケットに情報は付加されているか?		
	なし	配送に必要な情報のみ	アプリケーションで利用される情報
量的離散化			
なし	既存電力網		OKABE KATO
仮想的	GELENBE	TOYODA, UCB, MERALABS	
物理的		FUJII, SUGIYAMA	YANABU
	HIKIHARA		

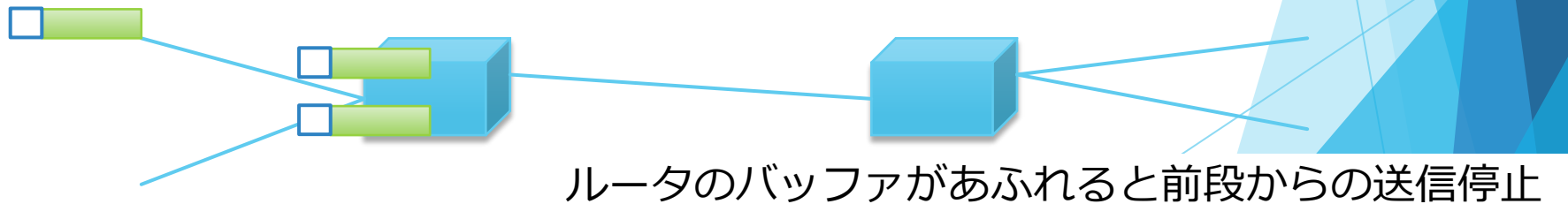
通信のパケットと電力パケットの相違(1)

- ▶ 電力パケットは、転送ごとに「劣化」する
- ▶ 電力パケットは廃棄できない

- ▶ 通信のパケット



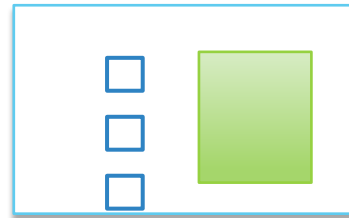
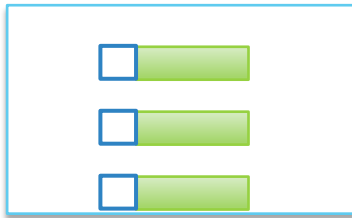
- ▶ 電力パケット



- ▶ 電力パケットは識別する必要がない

通信のパケットと電力パケットの相違(2)

- ▶ 電力パケットのidentity “識別可能性”
- ▶ 電力パケットが持つ電荷量に基本単位はあるか？
 - ▶ ヘッダ情報は同じであるが、電荷量は配送中に徐々に減っていく
- ▶ 同じ電荷量のパケットは、識別可能か？
 - ▶ 電力バッファ（キャパシタ）はパケットごとに別に持つ必要はなく、ルータごとにまとめてよい



RFC3251 “Electricity over IP”

B. Rajagopalan, 1 April 2002

<https://www.ietf.org/rfc/rfc3251.txt>

Mostly Pointless Lamp Switching (MPLampS) is an architecture for carrying electricity over IP (with an MPLS control plane).

According to our marketing department, MPLampS has the potential to dramatically lower the price, ease the distribution and usage, and improve the manageability of delivering electricity. This document is motivated by such work as SONET/SDH over IP/MPLS (with apologies to the authors). Readers of the previous work have been observed scratching their heads and muttering, “What next?”. This document answers that question.

IP over Everything から Everything over IPへ

RFC3251 “Electricity over IP”

B. Rajagopalan, 1 April 2002

<https://www.ietf.org/rfc/rfc3251.txt>

2. Pre-requisite for reading this document

While reading this document, at various points the readers may have the urge to ask questions like, "[does this make sense?](#)", "[is this feasible?](#)," and "[is the author sane?](#)". The readers must have the ability to suppress such questions and read on. Other than this, no specific technical background is required to read this document. In certain cases (present document included), it may be REQUIRED that [readers have no specific technical background](#).

まとめにかえて

- ▶ ホームネットワークからスマートグリッドを考える
 - ▶ 電力会社主導から生活者主導へ
 - ▶ インターネットの革命は何だったのか？
 - ▶ コンピュータとLAN技術から発展したインターネットが、電話会社のネットワークを駆逐
 - ▶ 情報通信の技術者にこそエネルギー革命への貢献のチャンス
 - ▶ 真のイノベーションは従来技術の延長線上にはない
- ▶ 今後の展望
 - ▶ Energy on Demand のさらなる展開
 - ▶ ベストエフォート型電力パケットネットワーク
 - ▶ PHVなど蓄電要素との連携
 - ▶ 非接触・ワイヤレス給電

...