

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・教授

京都大学学際融合教育研究推進センター

スマートエネルギーマネジメント研究ユニット

ユニット長

ユニットHP

<http://www.smart.kyoto-u.ac.jp>



The screenshot shows a web browser window displaying the homepage of the Smart Energy Management Research Unit at Kyoto University. The browser's address bar shows the URL site.smart.kyoto-u.ac.jp. The page features the Kyoto University logo and name in both Japanese (京都大学) and English (KYOTO UNIVERSITY), along with the text "Research Unit for Smart Energy Management". A navigation menu on the left includes links for Home, Concept, Members, Hot News, Events, Contact Us, and a Link section with sub-links to the International Education Research Promotion Center and the Environmental Safety and Health Institute. The main content area is titled "Home" and contains the text "京都大学学際融合教育研究推進センター" and "スマートエネルギーマネジメント研究ユニット". Below this text is a photograph of a building. A "Hot News" section at the bottom right contains two news items: one dated May 11, 2016, about a symposium, and another dated April 1, 2016, about the unit's establishment. A small number "2" is visible above the first news item.

ファイル(E) 編集(E) 表示(V) 履歴(S) ブックマーク(B) ツール(I) ヘルプ(H)

Smart Energy Manage... ×

site.smart.kyoto-u.ac.jp

このサイトを検索

 **京都大学**
KYOTO UNIVERSITY
Research Unit for Smart Energy Management

Navigation

- Home
- Concept
- Members
- Hot News
- Events
- Contact Us
- Link
 - 学際融合教育研究推進センター
 - 環境安全保健機構

Home

京都大学学際融合教育研究推進センター
スマートエネルギーマネジメント研究ユニット



Hot News

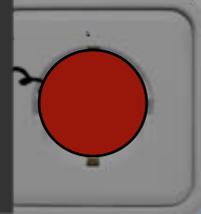
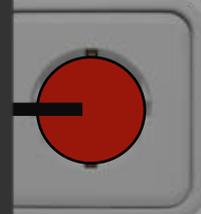
- 2016年5月11日、ユニット創設記念シンポジウムを開催します。
- 2016年4月1日、スマートエネルギーマネジメント研究ユニットが創設されました。

スマートエネルギーマネジメント研究ユニット創設記念シンポジウム この振。本研究ユニットの創設を記念して、ユニットの主なメンバの教員がそれぞれの専門の研

家庭内の電力ネットワーク

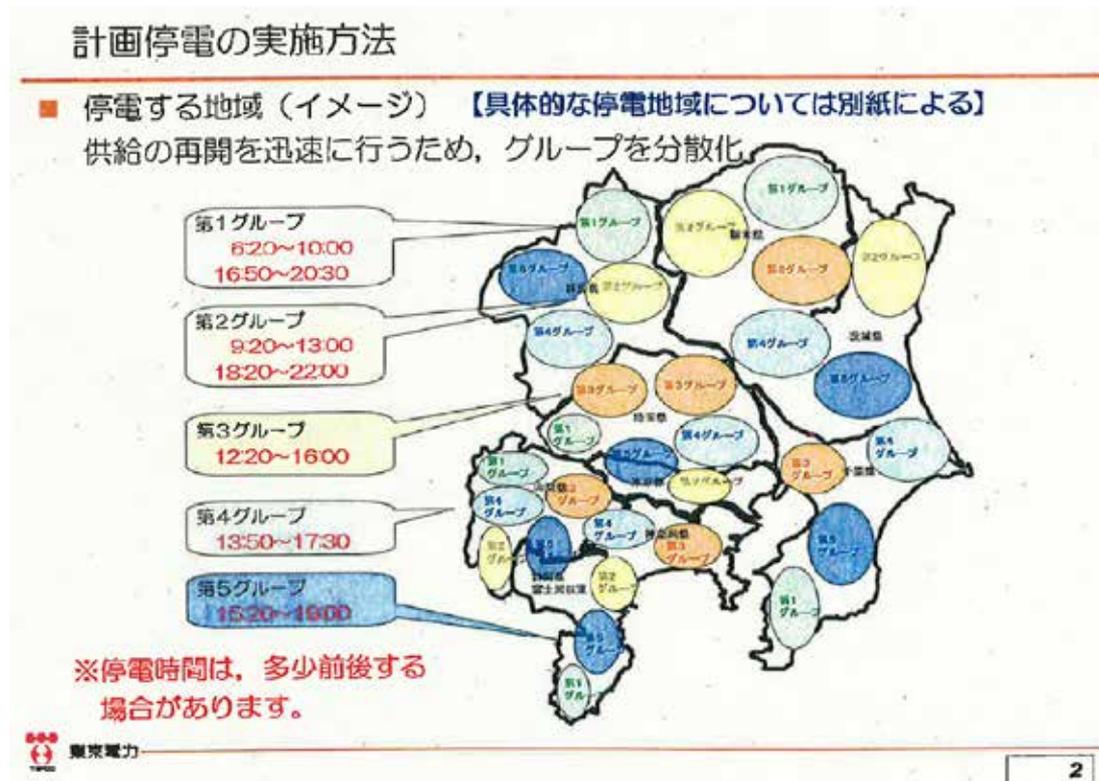
- u 家庭内で並
- u すべての機
送
- u つなげば即

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

- u 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？



なぜ確実な節電が困難か？

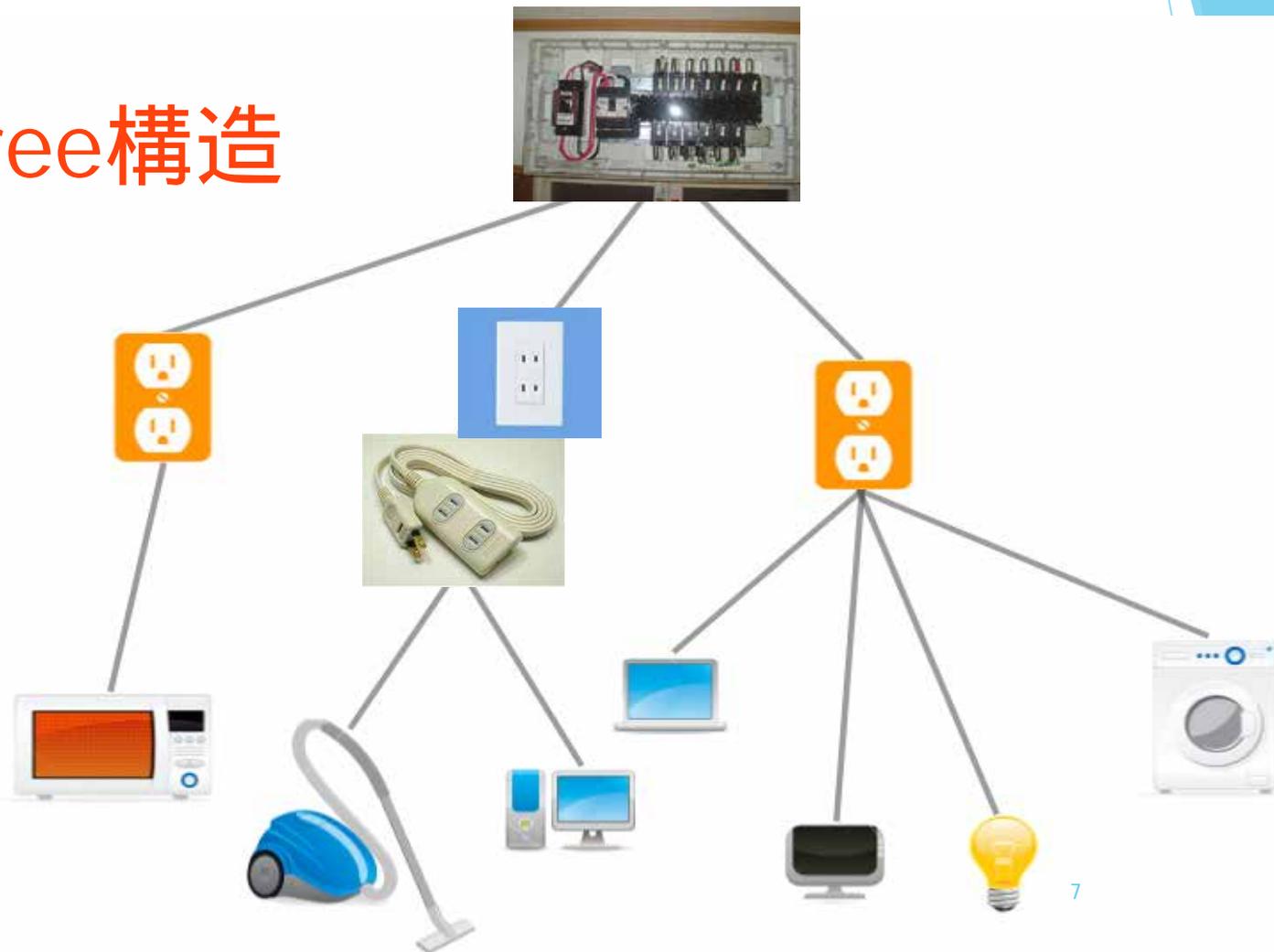
- u 電気はコンセントにつなげばいつでもいくらでも使えてしまう
 - u まじめな人は涙ぐましい節電努力をしている一方で、ほとんど何もしていない人を咎めるすべはない
- u 制限がかかるのは回路の容量あるいは家全体で契約容量を超えてブレーカ断になる場合だけ
 - u 家庭の電源容量が小さかった昔は、ブレーカが落ちないように生活者が家電の利用の組み合わせを工夫していたが...
- u これでは計画的かつ公平な節電は不可能

確実な節電を実現するために

- u 指定された上限以上の電力を使えないようにする
 - u 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)
- u 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
 - u 電力消費機器による需要予測
 - u 機器間の協調・優先度制御
- u 単なる節電ではなくCO2排出削減を実現する
 - u 電力の由来別・品質別制御 (電力カラーリング)
 - u 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



OoEn (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
- u 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

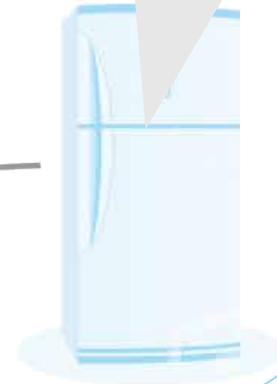


プロアクティブ制御による きめ細かな電力制御

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



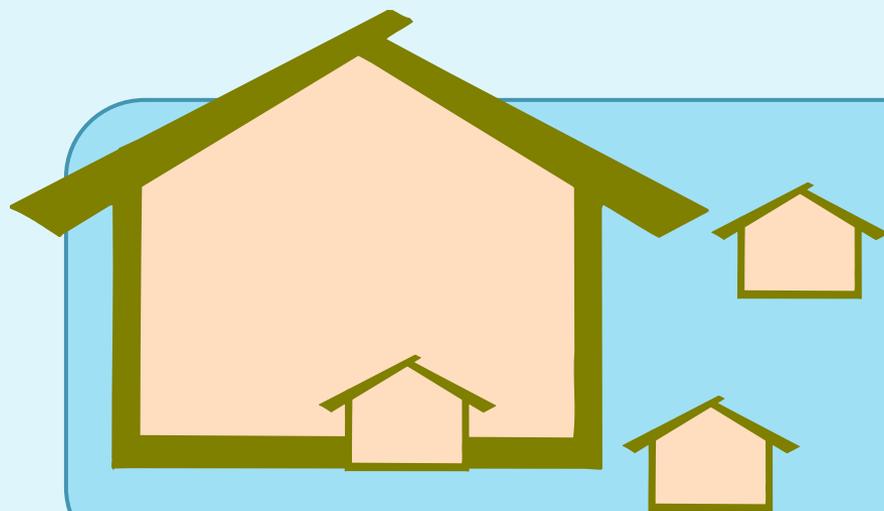
個々の機器が持つ
センサ情報を統合

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



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)

- u 戦略重点科学技術施策（総務省）
- u 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



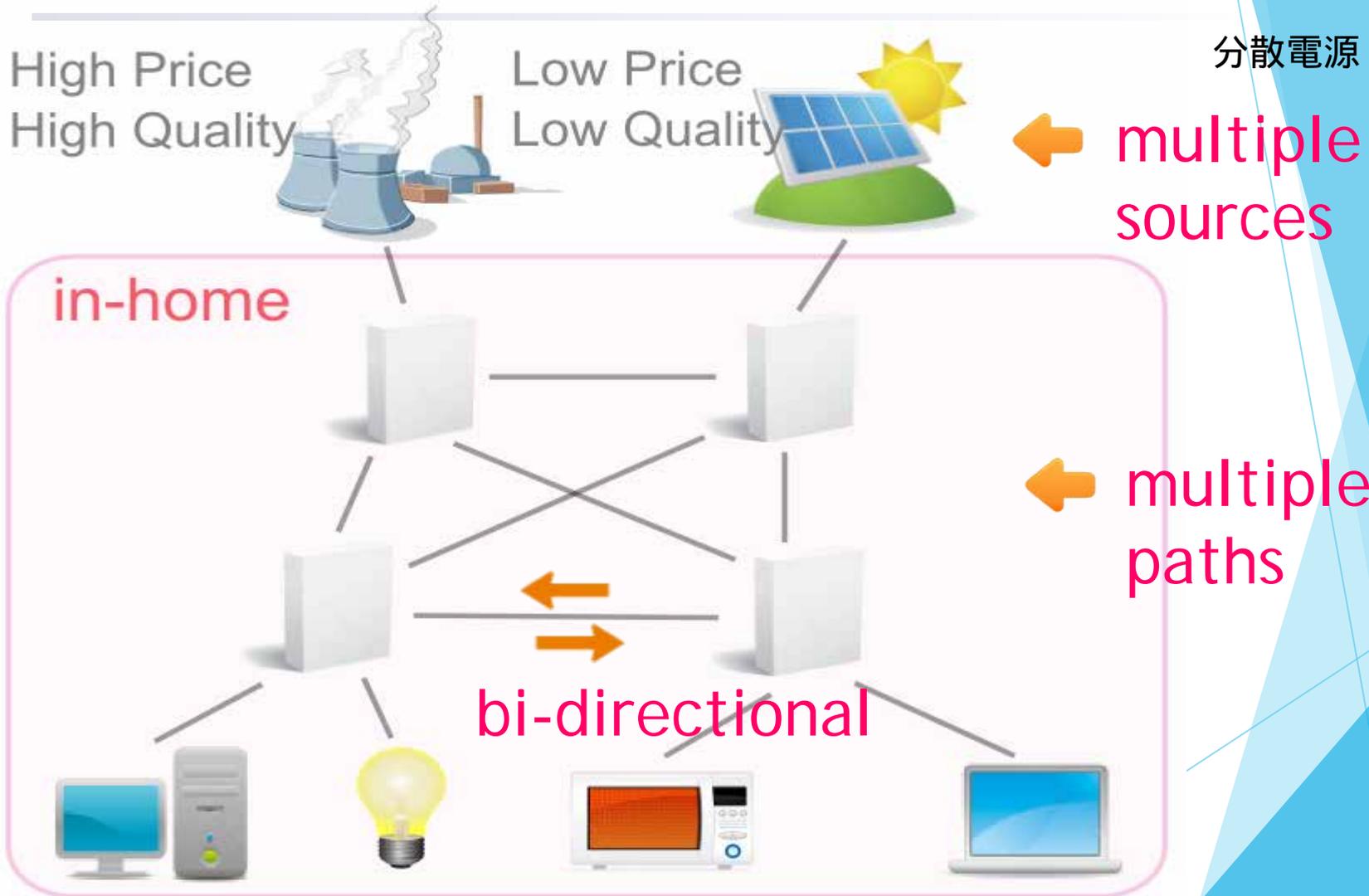
4ポートスマートタップ³
(AC100V)

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

- u IP (Internet Protocol)ネットワークと同様の自律分散型
 - u 固定的なサーバに依存しない
- u 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
 - u QoSルーティングプロトコル
 - u リンクステート型、階層型
 - u 資源予約プロトコル
 - u 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

想定する家庭内ネットワーク



制約条件

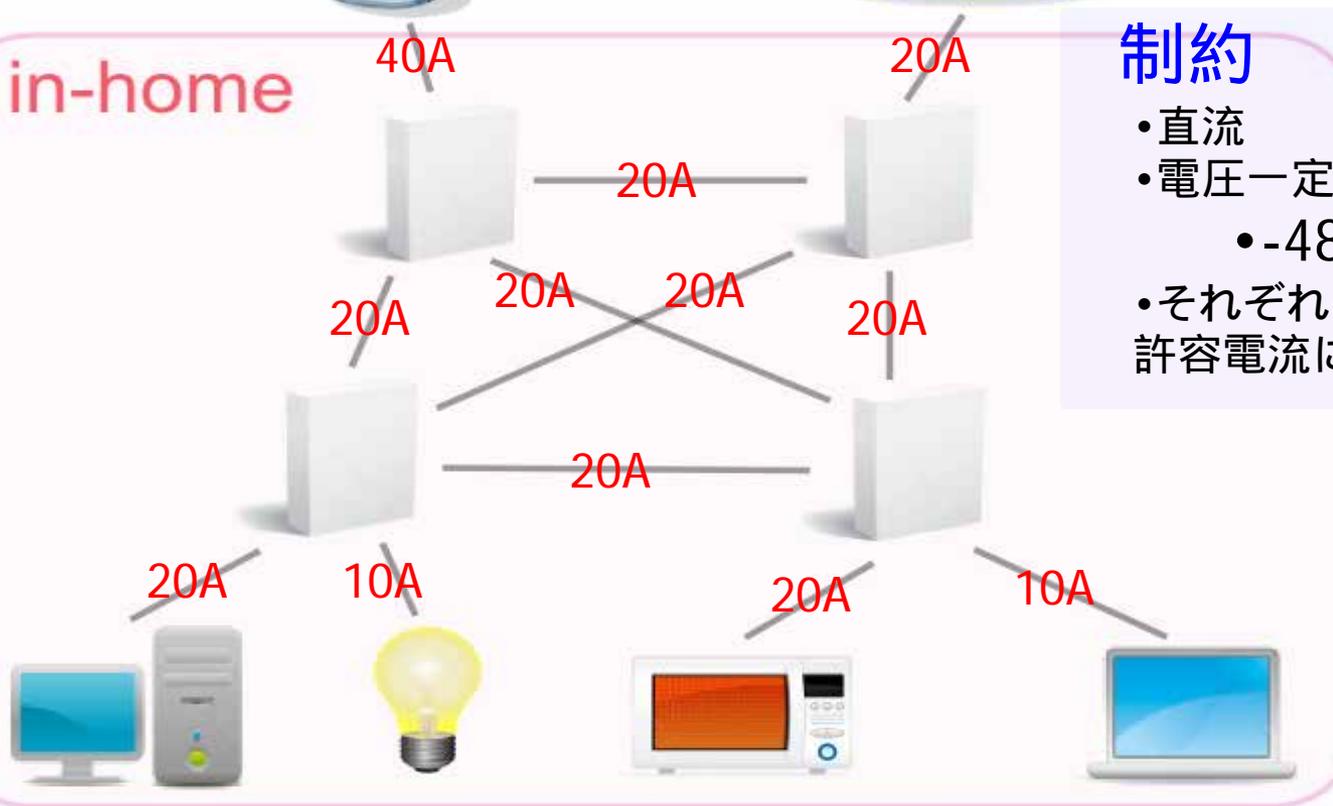
High Price
High Quality



Low Price
Low Quality



in-home



制約

- 直流
- 電圧一定
 - -48V
- それぞれの電線は許容電流に上限

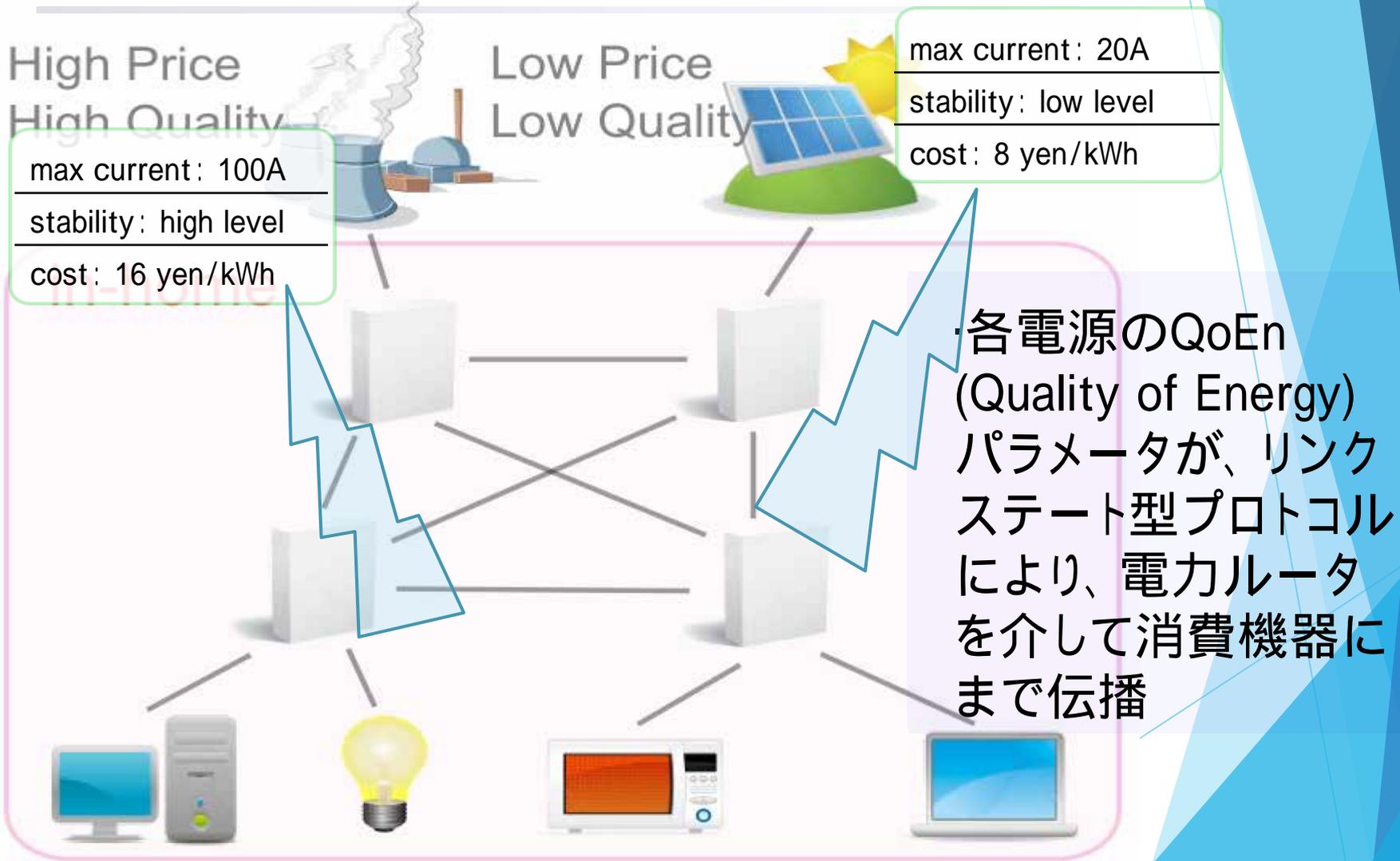
電源選択 (マatching)

High Price
High Quality

max current : 100A
stability : high level
cost : 16 yen/kWh

Low Price
Low Quality

max current : 20A
stability : low level
cost : 8 yen/kWh



各電源のQoEn (Quality of Energy) パラメータが、リンクステート型プロトコルにより、電力ルータを介して消費機器にまで伝播

電源および経路の予約

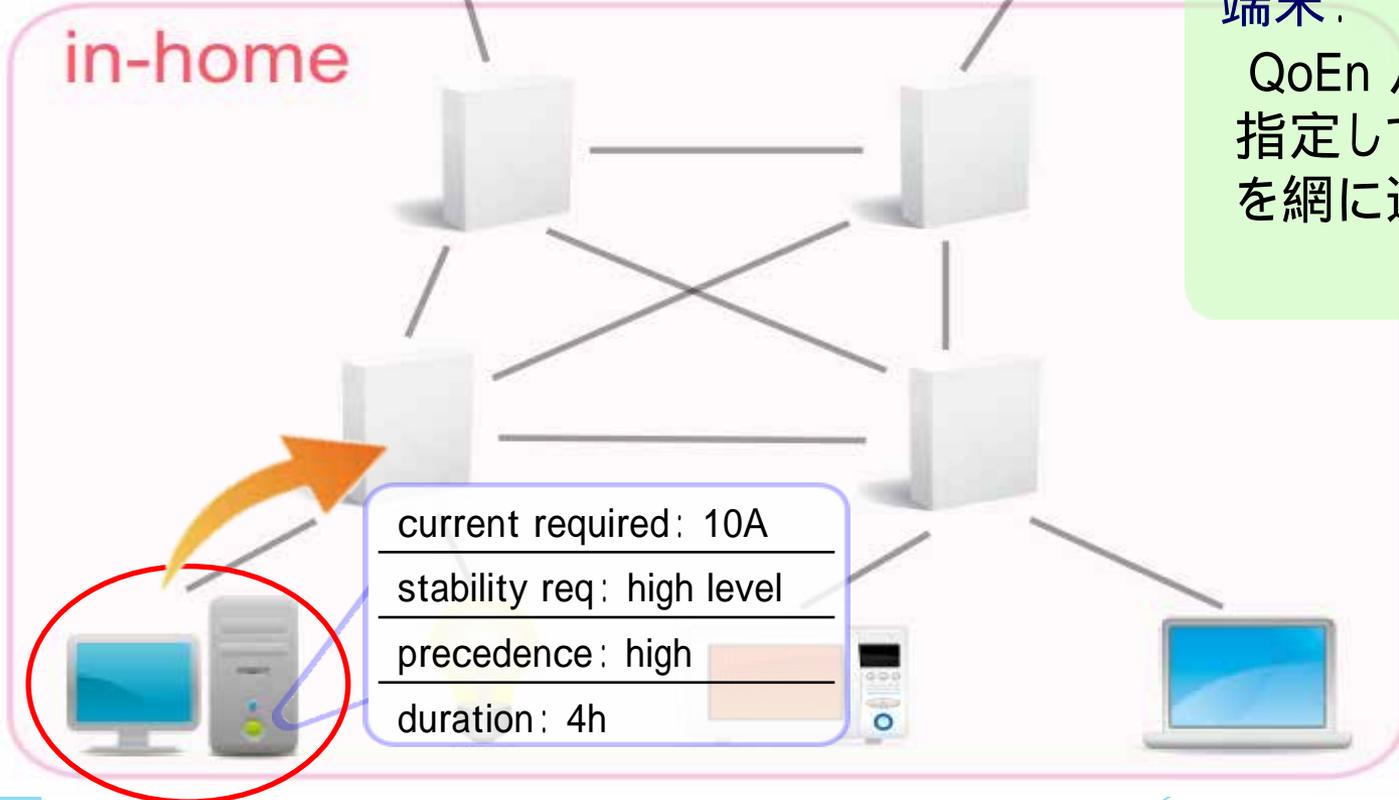
High Price
High Quality



Low Price
Low Quality



in-home



current required: 10A
stability req: high level
precedence: high
duration: 4h

端末:

QoEn パラメータを
指定して電力要求
を網に送信

QoEnルーティング

High Price
High Quality

max cur.: 100A
stabil.: high level
cost: 16 yen/kWh

Low Price
Low Quality

max cur.: 20A
stabil.: low level
cost: 8 yen/kWh

in-home

Power source selection

Available QoEn?

QoEn reservation

10A
high level
high
4h

ルータ

QoEnに合わせて上流に要求を転送



電源に向けて最適な経路が選択され



電源から端末までend-to-endで経路が確立



横取り

High Price
High Quality



Low Price
Low Quality

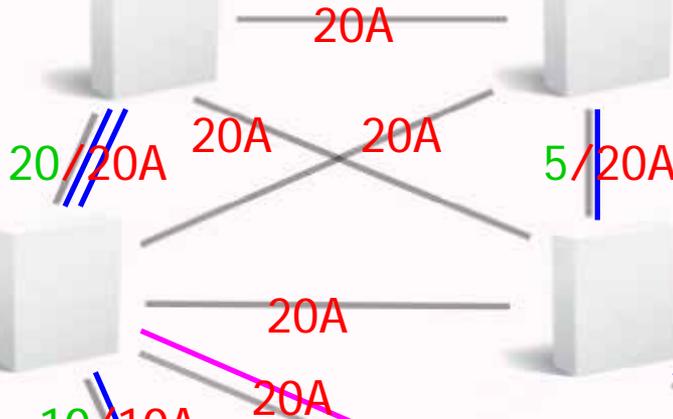


in-home

20/40A

5/20A

preemption



10/20A

10/10A

5/10A

10A

high level

high

4h

10A

high level

low

3h

10A

high level

high

10m

5A

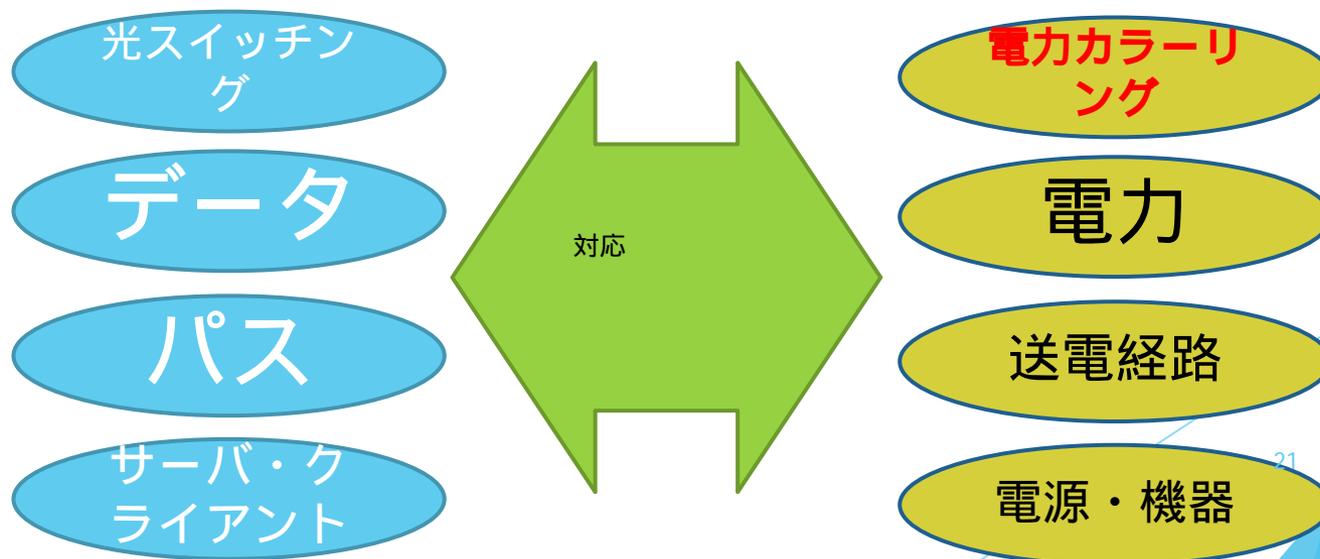
low level

low

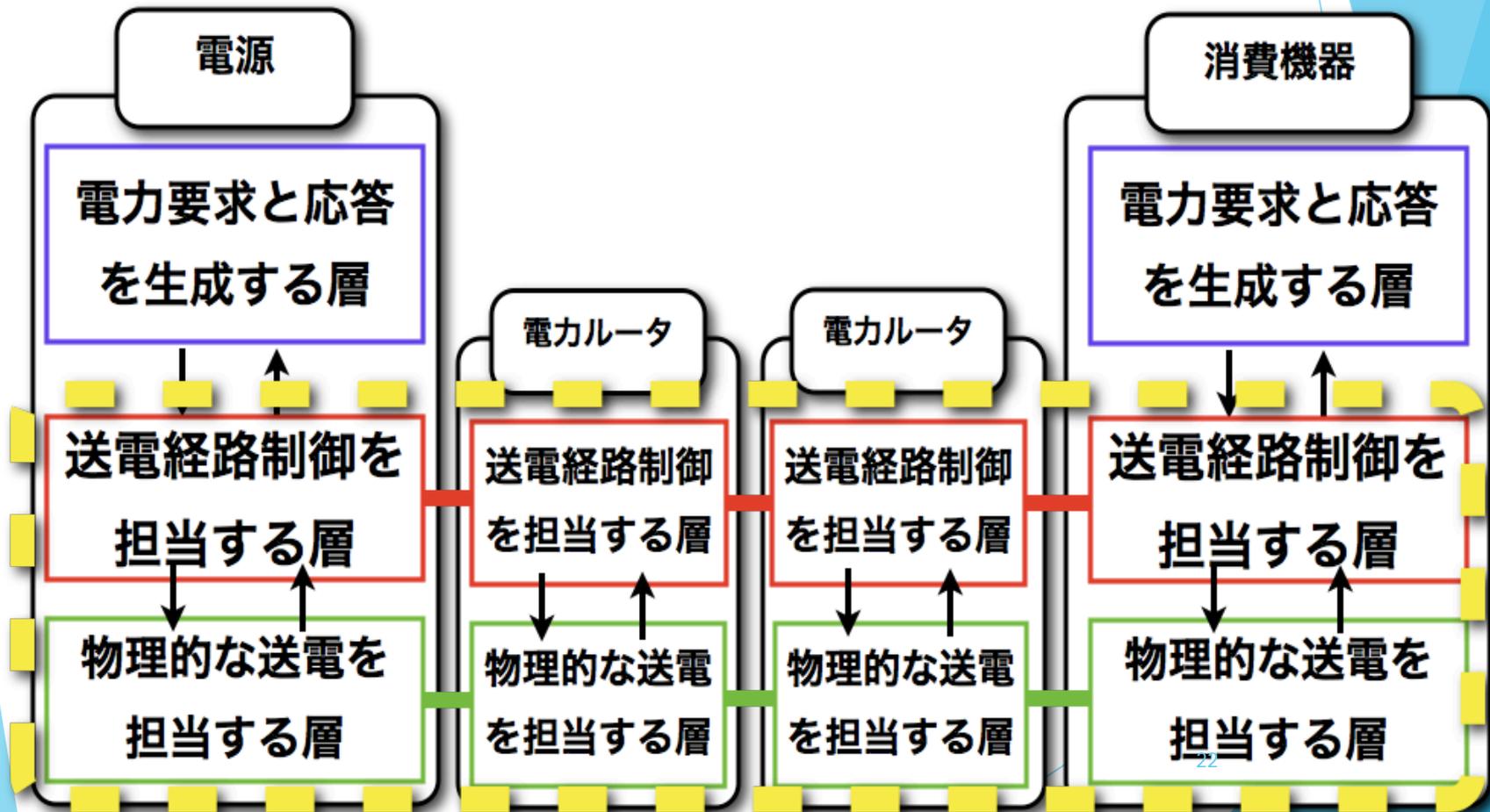
30m

電力カラーリングと IPネットワークの経路制御

- u 電力カラーリング：
 - u 電力の由来別制御、電源と消費機器のマッチング
- o インターネットのラベルスイッチプロトコル (GMPLS)との親和性



電力経路制御の階層モデル

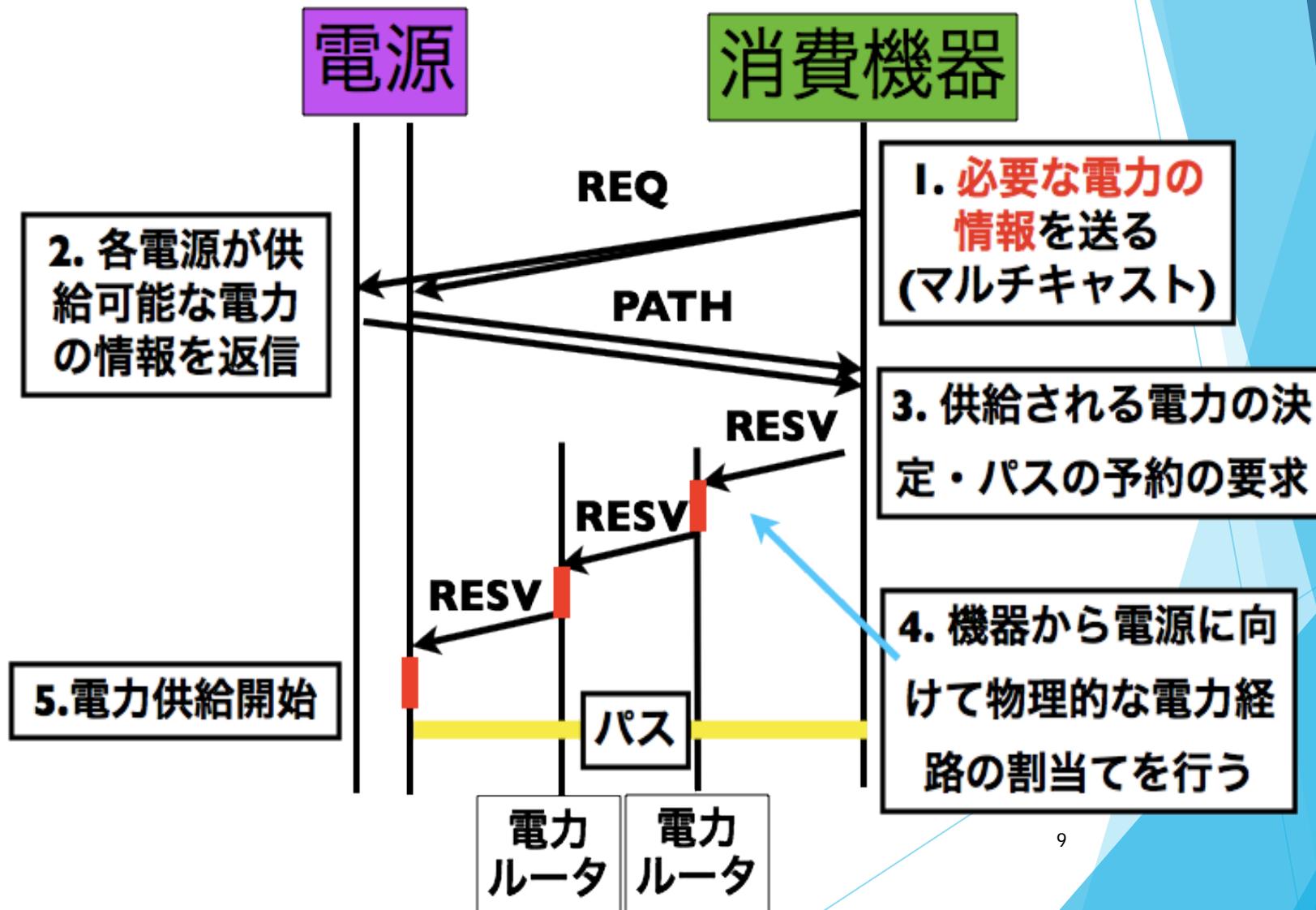


電力経路資源予約プロトコル

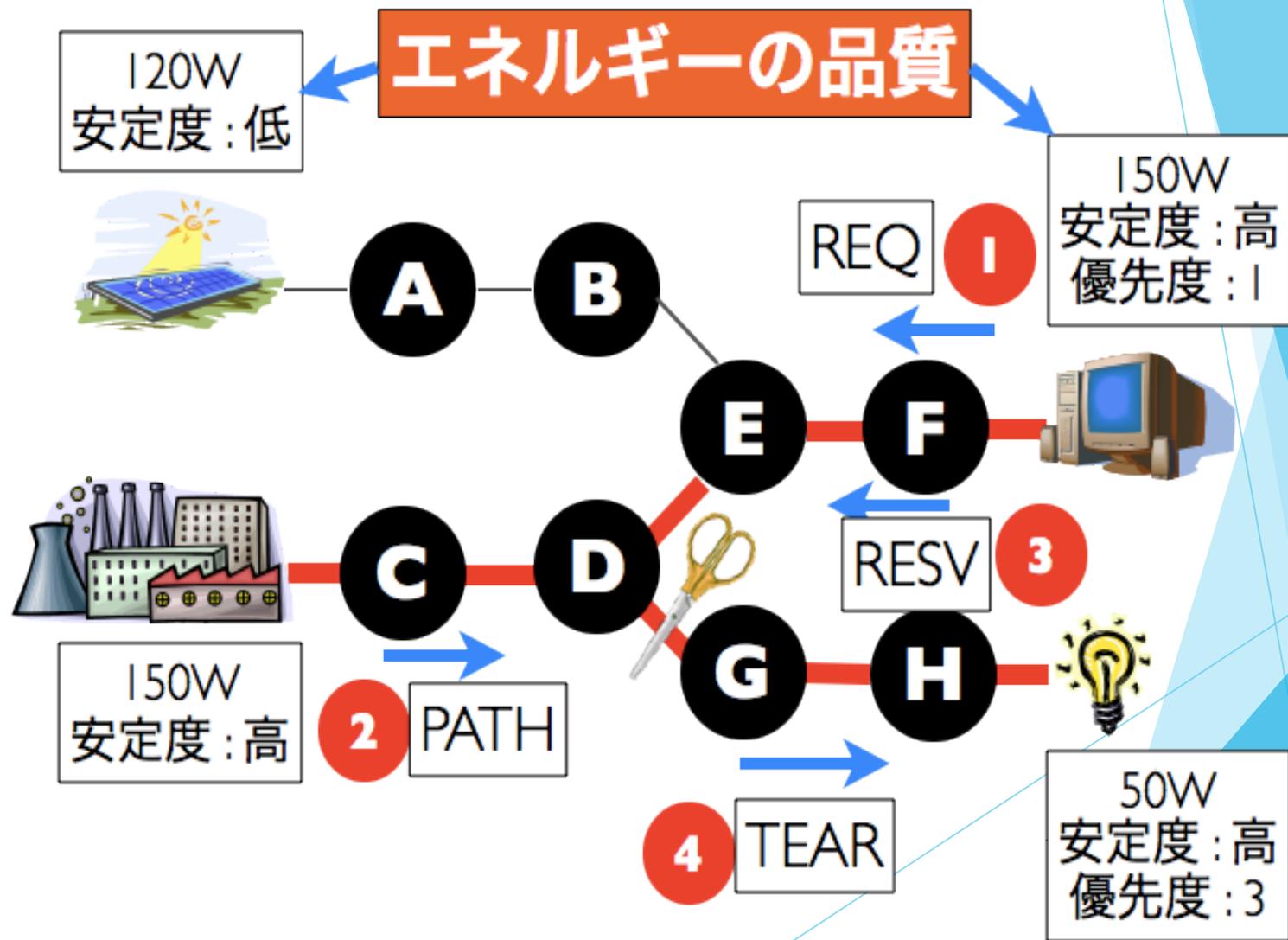
- u インターネットプロトコルに倣った電源選択・電力経路予約プロトコル
- u GMPLS , OSPF-TE , RSVP-TEの応用
- u 資源予約プロトコルRSVP-TEに手順を追加することで受信者主導のプロトコルに改良
- u 優先度の低い機器への電力供給を横取り , 生活品質 (Quality of Life)を下げない制御の実現



電力経路の予約の流れ



電力の横取り制御



オンデマンド型電力ネットワーク の要件と実装

u 要件

- u 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
- u 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
 - u 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

u 実装

- u 独立配線 + 電力ルーティングスイッチ（回線交換）
 - u プロトタイプとしてPoE (Power over Ethernet)をベースに拡張
- u 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

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

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

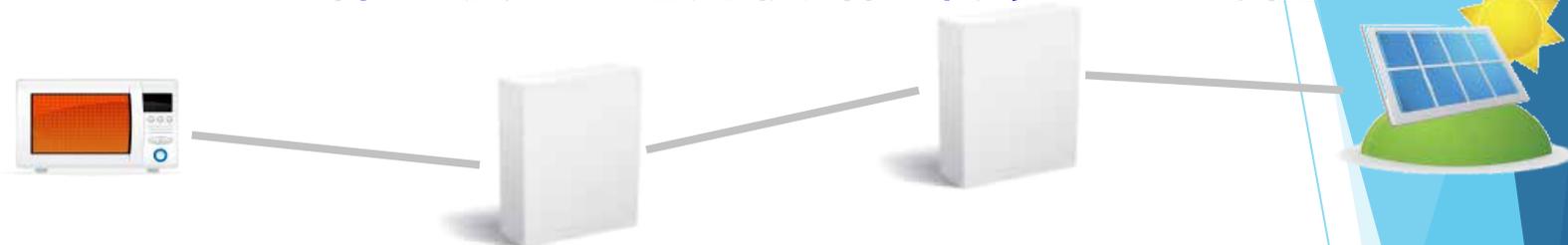
PoE + における拡張 IEEE802.3at

- 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

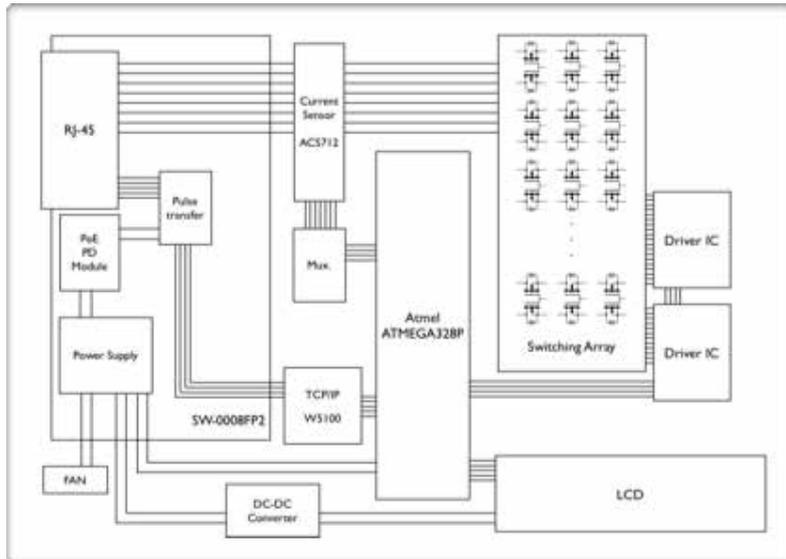


動的+静的 電力供給を実現する PoE 新方式を提案

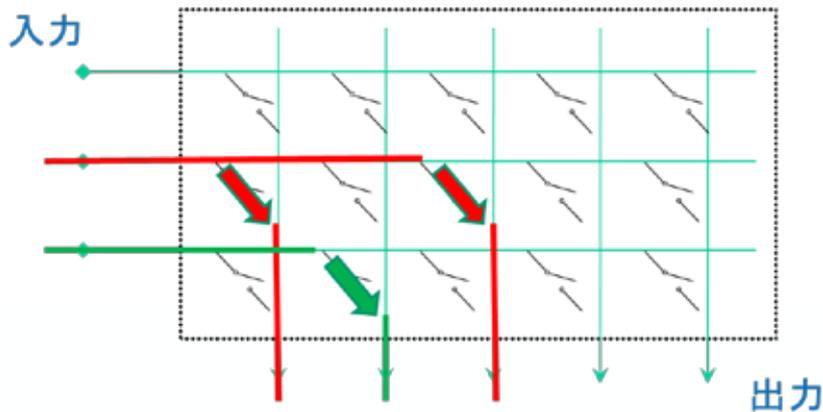


静的：通信インタフェースへの電力供給
動的：機器を動作させるための電力供給

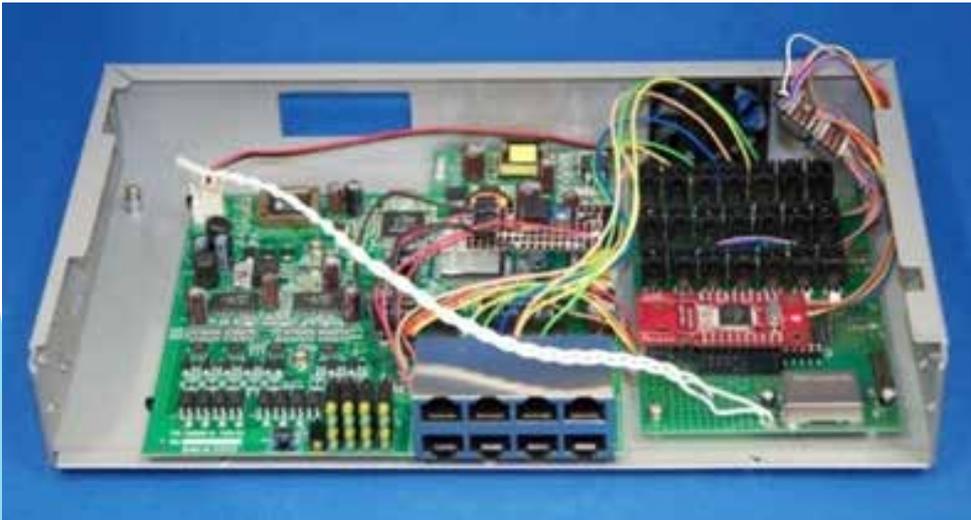
ハードウェア構成



- 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



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

(Linklayer 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

電力のパケット化

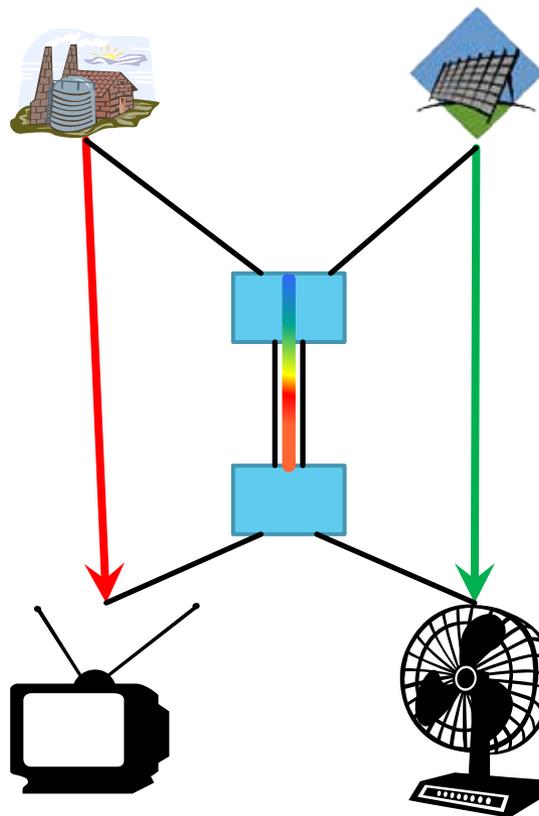
回線交換からパケット交換へ

u 要件

- u 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
- u 直流給電
- u 電力のカラーリング

u 実現技術

- u 回線交換型
- u 電力のパケット化



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)



情報通信の世界でこの40年間に起きた革命

- u アナログからデジタルへ
 - u NHK アナログハイビジョン MUSE
 - u 実用化試験放送 (1994 ~ 2007)
- u 回線交換からパケットへ
 - u ISDN (時分割多重)
 - u B-ISDN, ATM
 - u Internet Protocol
- u 半導体技術の想定以上の進歩が原動力

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」

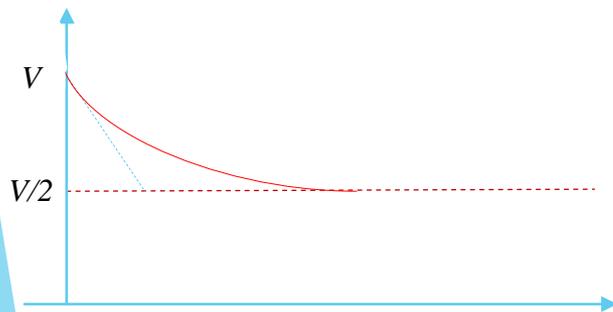
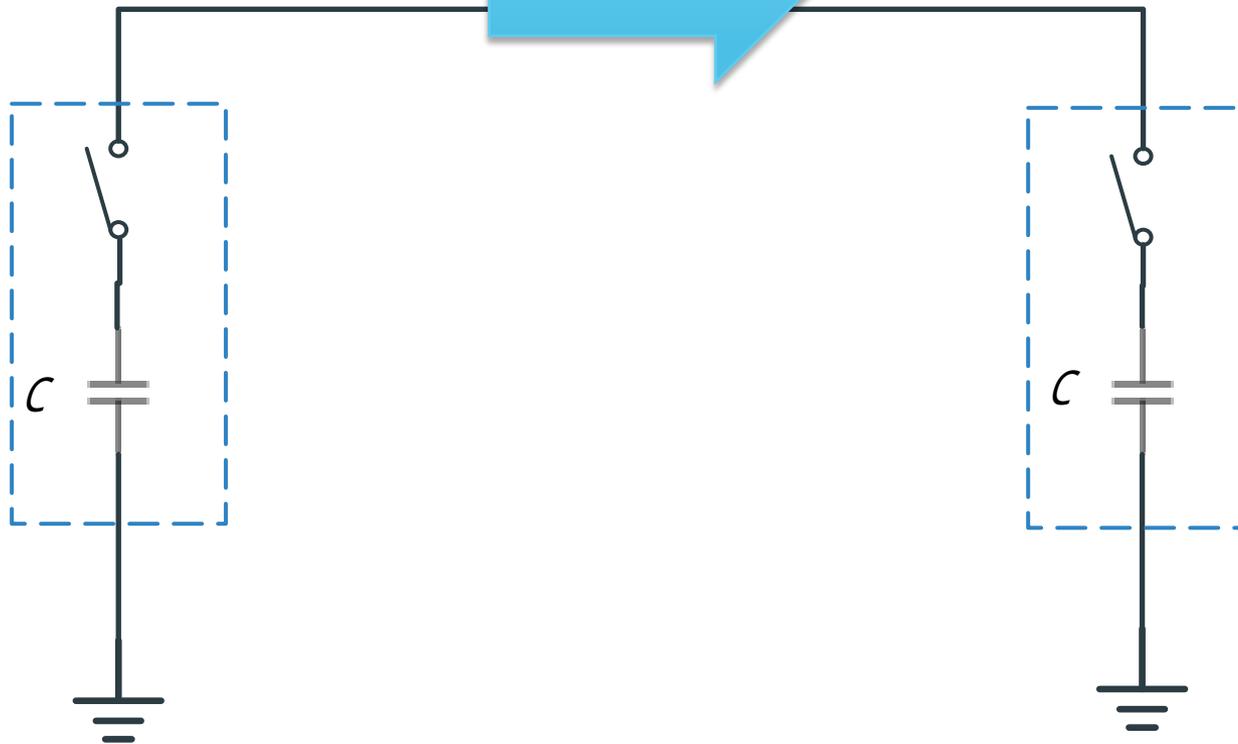
u サブテーマの全体概要

- u 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。

u 上位テーマとの関係性

- u 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。

電力パッケージ配送 — 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： $1/2 CV^2 = 1/2 Q^2/C$

(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 $V/2$

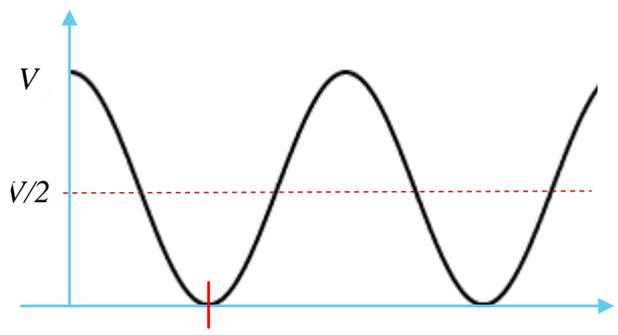
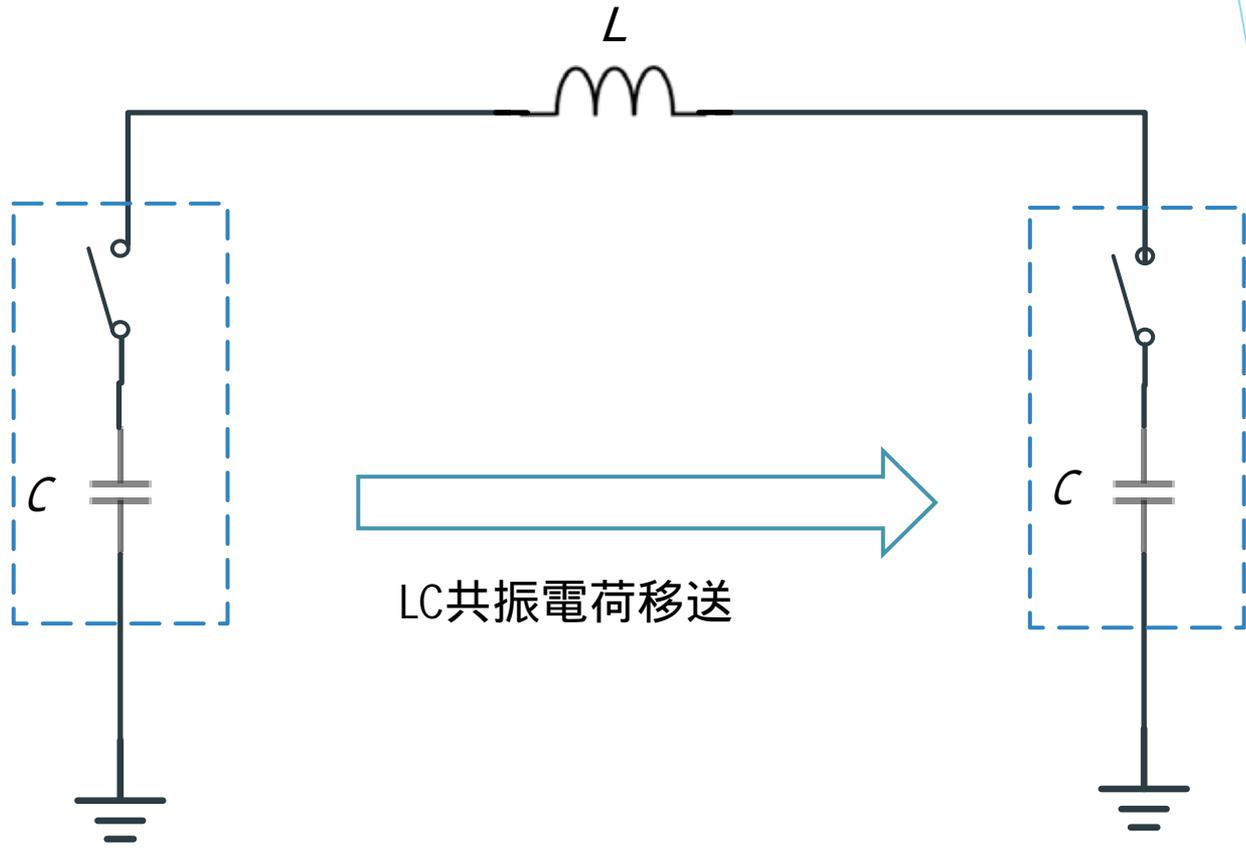
エネルギーは左右それぞれ $1/8 CV^2 = 1/8 Q^2/C$

すなわちこの過程で左から右へ $1/8 Q^2/C$ のエネルギーが伝送され

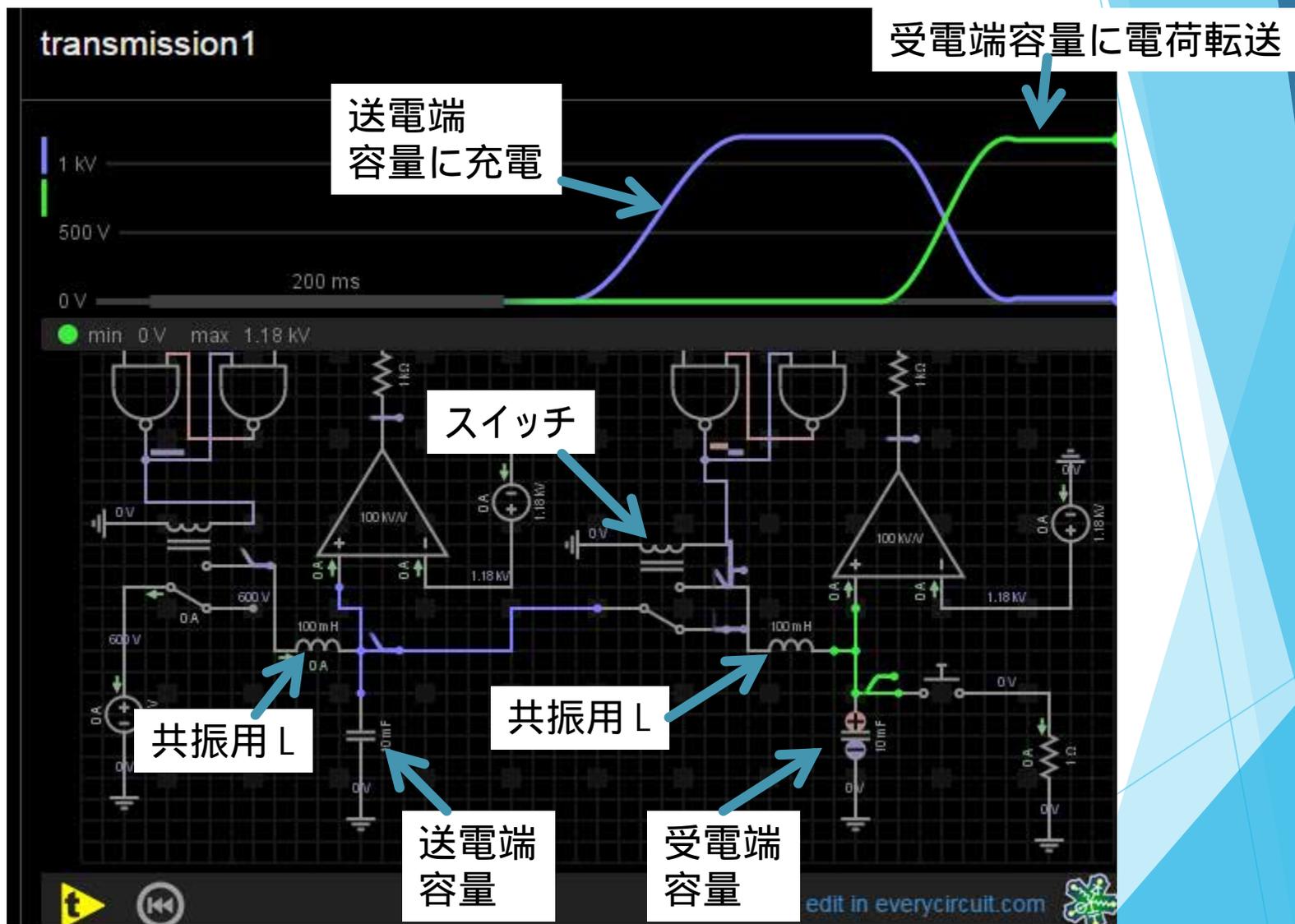
同時に $1/4 Q^2/C$ のエネルギーが (抵抗で) 失われる？



電力パケット配送 — 物理層の設計(2)

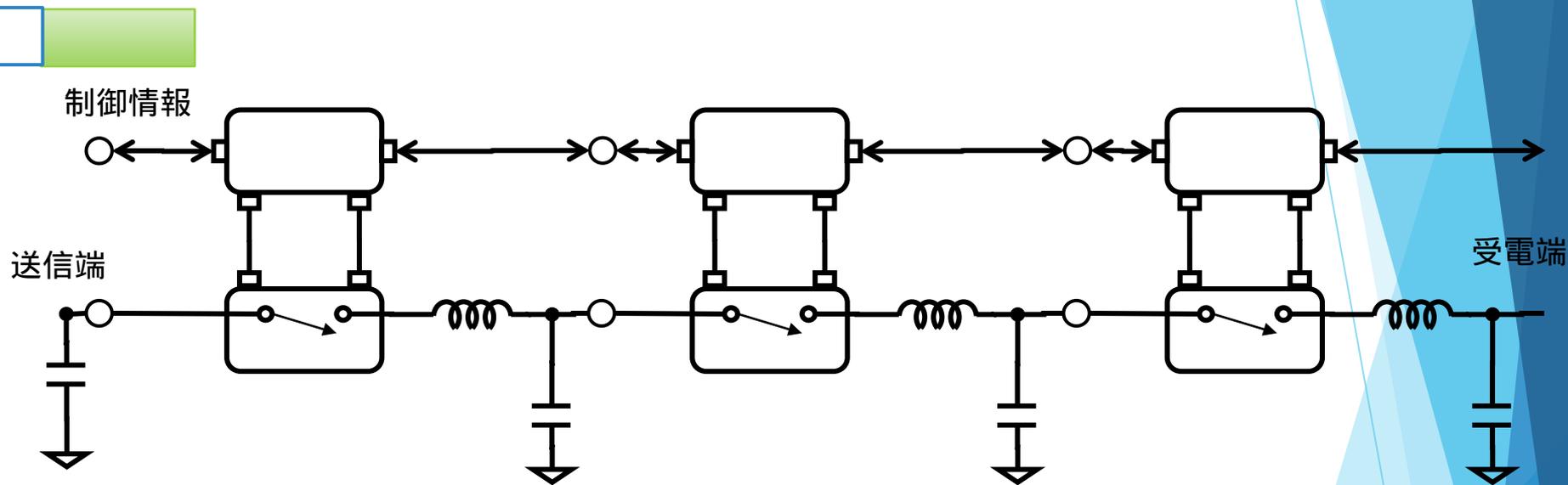


LC共振電荷移送の動作例 (シミュレータEveryCircuitを利用)



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

我々が考える 電力パケットの基本モデル

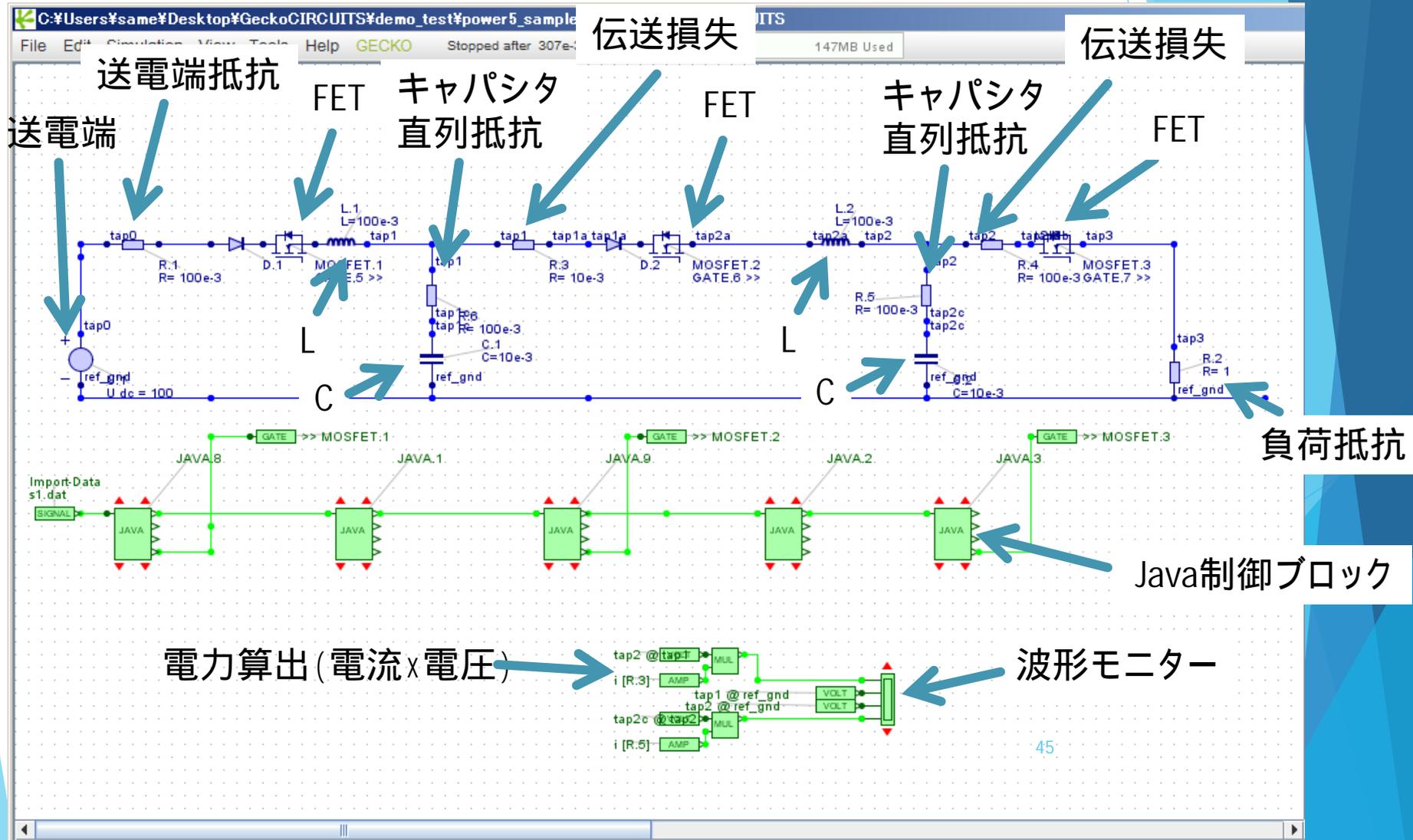


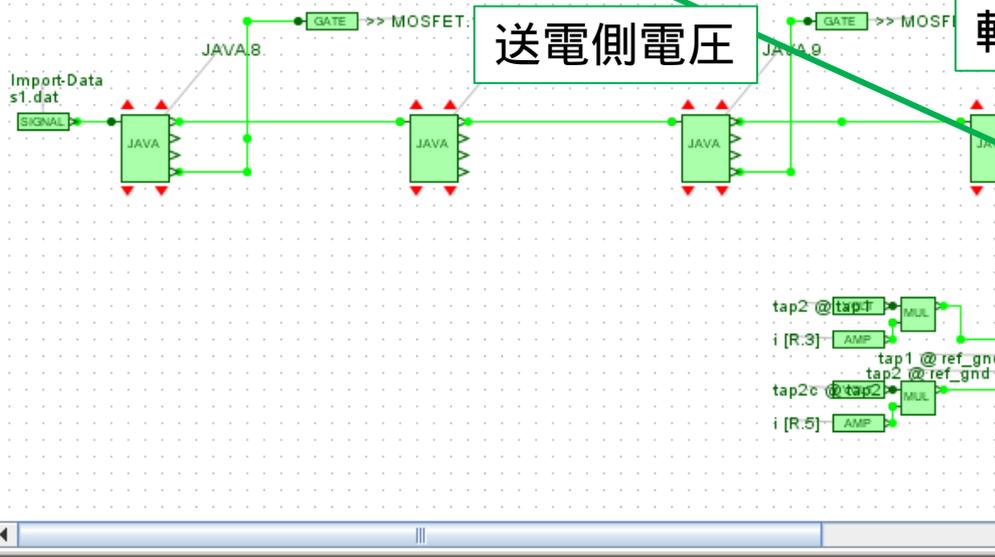
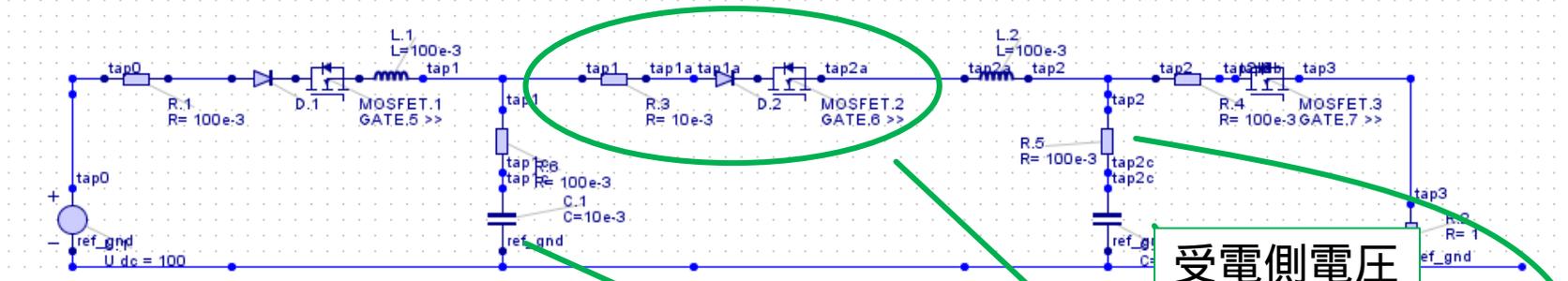
- 電力ルータではpassiveな電力バッファ（キャパシタ）に蓄積された電荷をhop by hop で1段ごとに伝送していく
- ヘッダ（制御情報）は必ずしも電力と同じメディアで配送されるとは限らない



損失見積もりモデル

(シミュレータGeckoCircuitを利用)



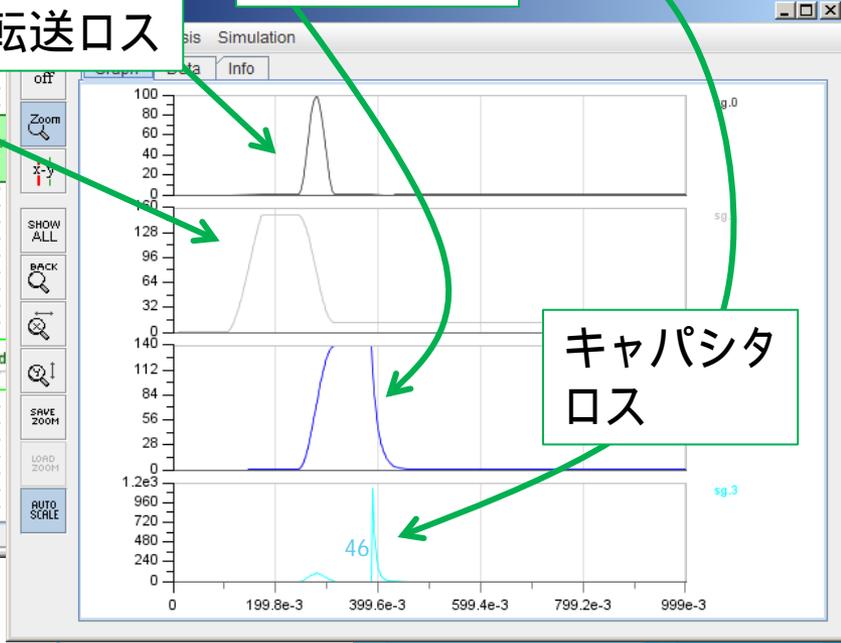


送電側電圧

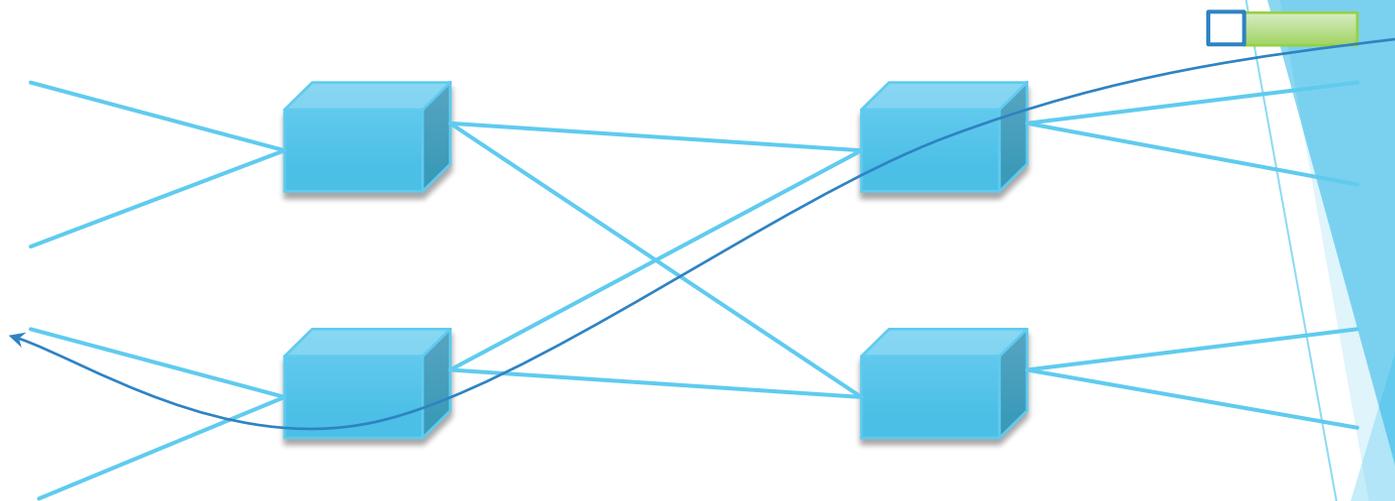
転送ロス

受電側電圧

キャパシタロス



パケット交換



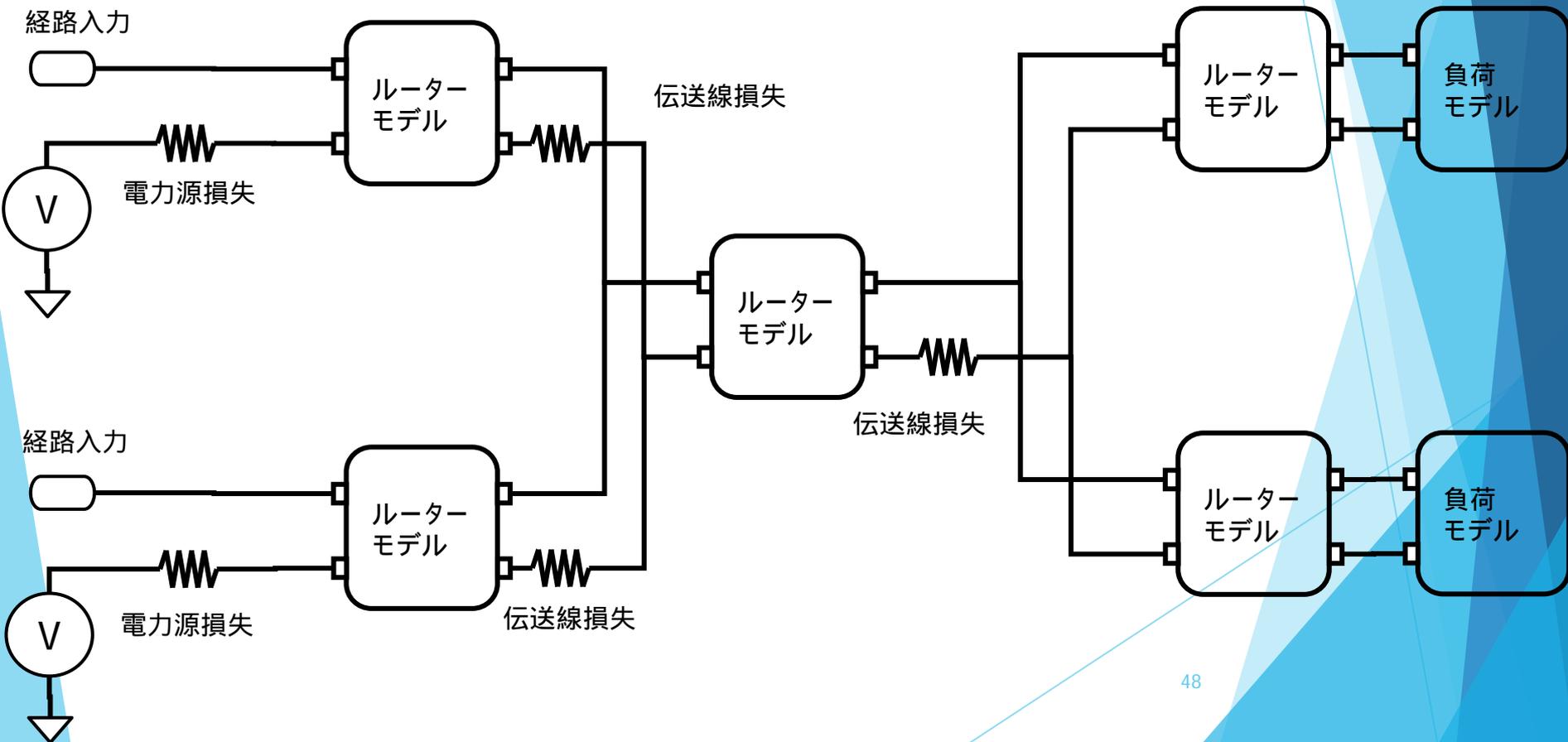
ルータでのパケットの扱い

- u Store and forward
- u Cut through

ヘッダの情報

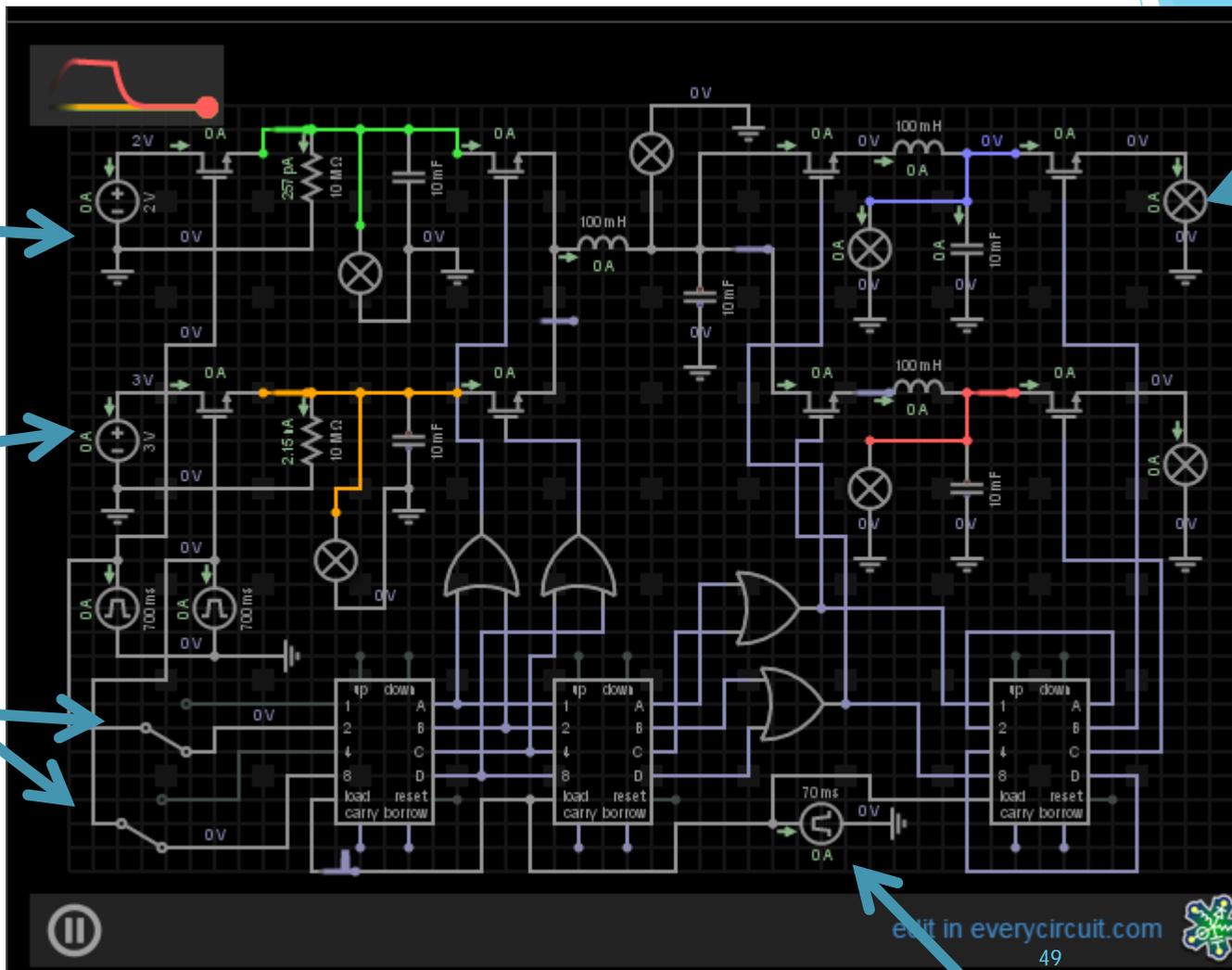
- TCP header
アプリケーションを識別する
ルータでは参照されない
- IP header
ルータはこれによりnext hopを決定
end-to-end で不変
- L2 header
リンクごとに書き換わる

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)



電源1

電源2

経路制御

負荷1

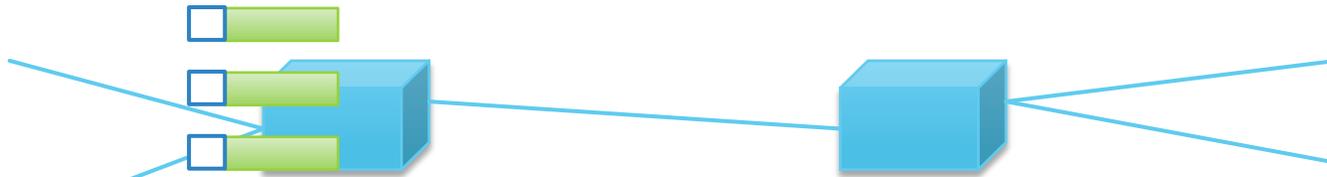
負荷2

転送周期クロック源

通信のパケットと電力パケットの相違

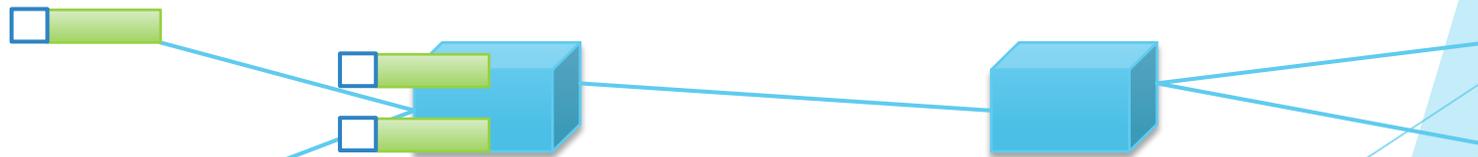
- u 電力パケットは、転送ごとに「劣化」する
- u 電力パケットは廃棄できない

u 通信のパケット



ルータのバッファがあふれると廃棄

u 電力パケット



ルータのバッファがあふれると前段からの送信停止

- u 電力パケットは識別する必要がない

まとめにかえて

- u ホームネットワークからスマートグリッドを考える
 - u 電力会社主導から生活者主導へ
 - u インターネットの革命は何だったのか？
 - u 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
 - u 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
 - u 真のイノベーションは従来技術の延長線上にはない
- u 今後の展望
 - u Energy on Demand のさらなる展開
 - u ベストエフォート型電力パケットネットワーク
 - u PHVなど蓄電要素との連携
 - u 非接触・ワイヤレス給電
 - ...