



カーボンニュートラルに向けた これからの建築の役割 ～海外の動向を含めて～

2021.7.16

大阪大学 大学院工学研究科
環境エネルギー工学専攻

下田 吉之



脱炭素社会(カーボンニュートラル)とは？

茅恒等式：CO2排出削減を検討する基礎として、IPCCなどで広く使用されてきた。

$$\text{CO2排出量} = \frac{\text{CO2発生量}}{\text{エネルギー消費}} \times \frac{\text{エネルギー消費}}{\text{総生産}} \times \frac{\text{総生産}}{\text{人口}} \times \text{人口}$$

カーボンフリーエネルギー
省エネ
経済活動

脱炭素社会は100%のカーボンフリーエネルギーによってもたらせる？

安価な再生可能エネルギーが普及すれば、省エネ以下は不要？
 大量消費社会は持続可能か？



脱炭素社会とは

RE100なら脱炭素？

茅恒等式

$$\text{CO2排出量} = \left(\frac{\text{CO2発生量}}{\text{エネルギー消費}} \right) \times \frac{\text{エネルギー消費}}{\text{総生産}} \times \frac{\text{総生産}}{\text{人口}} \times \text{人口}$$



$$\text{カーボンフリーエネルギー} \geq \frac{\text{エネルギー需要}}{\text{サービス}} \times \frac{\text{サービス}}{\text{充足度}} \times \frac{\text{充足度}}{\text{人口}} \times \text{人口}$$

- 上の式は脱炭素社会への2つの観点からの制約を示す。
- 年間ベースで 脱炭素条件の達成
- 瞬時ベースで 電力における需給バランス
- 脱炭素社会では建築の需要端で使うエネルギーはほとんど電力になる。（例外：水素、バイオマス）



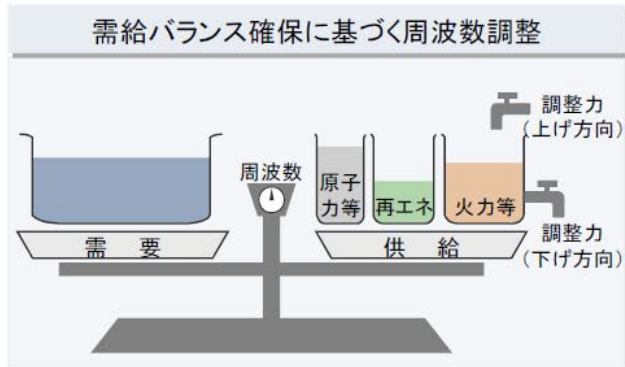
電力システムに変動再生可能エネルギーが増えることの課題

- これまでは数多くの需要家を束ねた電力需要に対して、(旧)一般電力事業者が地域独占・総括原価の下で安定した需給制御をおこなってきた。需要家がどのような変化を示そうとも、電力供給側がそれに合わせてきた。
- 分散型電源の増加、特に太陽光発電や風力発電等変動性の電源増加による供給側の不安定化
- 電力自由化による経営効率化のための余剰電源の減少
- 系統全体における周波数維持の問題(後述)
- 配電系統における電圧コントロールの問題(後述)
- 脱炭素化のため、電化は進む。需給安定のため、電池だけでなく電力需要側の協力が必要に。

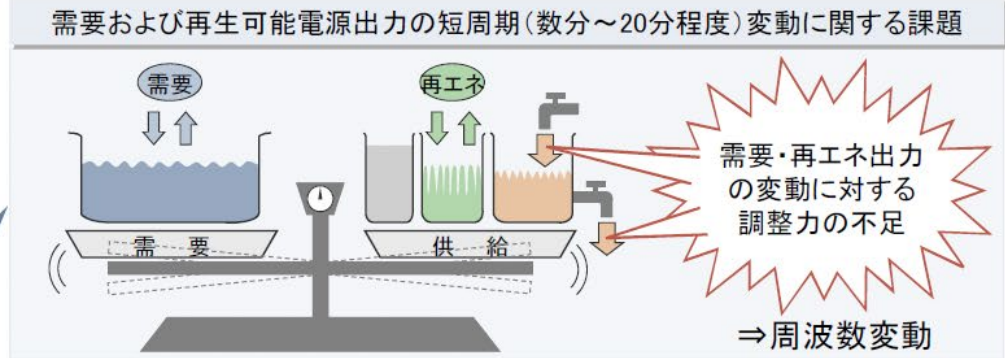
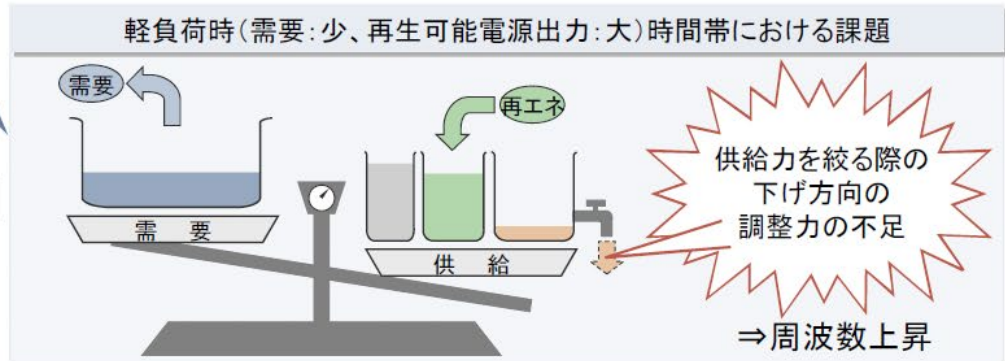


周波数維持の問題

電力システムは、常に需要と供給がバランスしている必要がある（同時同量）。バランスが崩れると周波数が増減し、閾値を超えると停電する。このため、主として火力と水力が、中央給電指令所の指令により発電量を増減させたり、特定の発電所が周波数を自己感知して出力を増減させたりして需給を保つ。



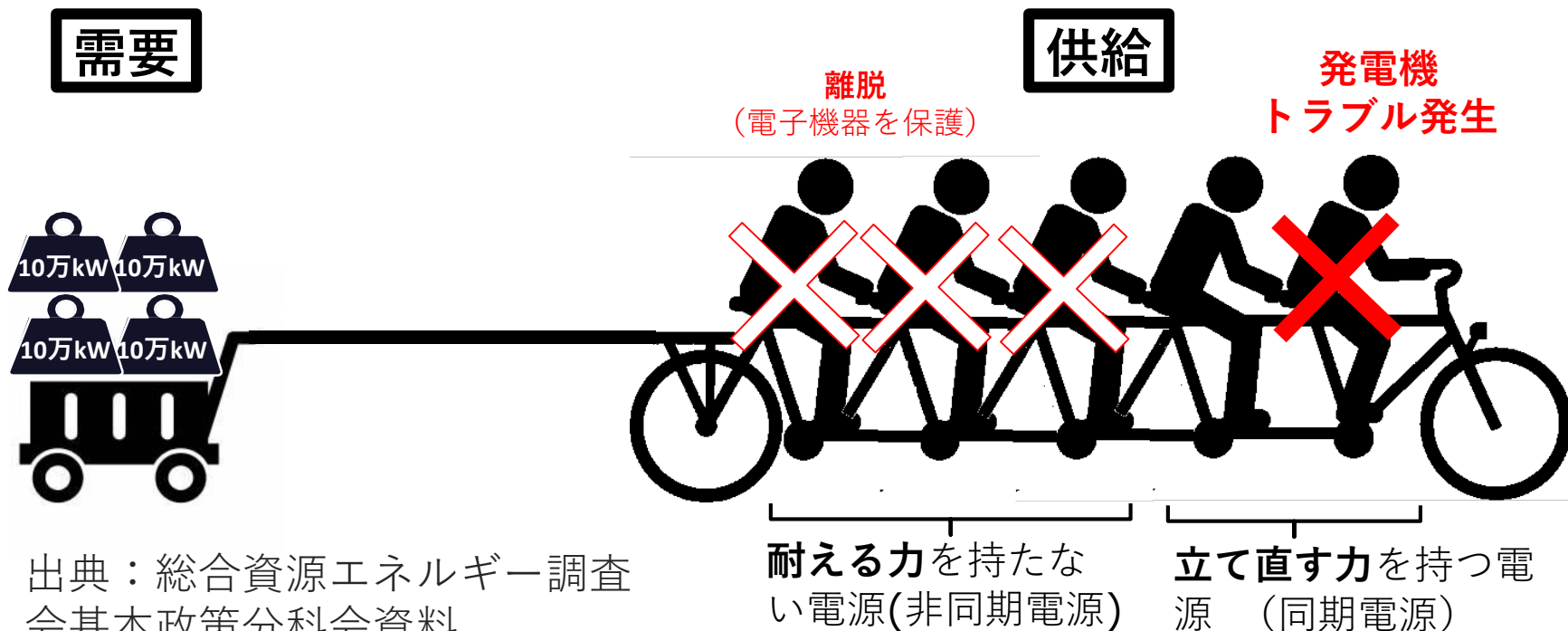
注) 調整力: 周波数調整を行うことのできる発電所の持つ、調整可能な容量。





非同期電源の増加と電源の安定性

- 系統で突発的なトラブル（需給のバランスの崩れ）が生じた場合、
 - ✓ 太陽光, 風力, 蓄電池などの非同期電源は、50Hzや60Hzの交流に変換するため電子機器を使用。周波数や電流の急激な変化に対して、周波数を維持する機能を持たず、周波数の変化が一定の閾値を超えると、その電子機器を守るため離脱（解列）する。
 - ✓ 火力、原子力、水力などの同期電源（50Hzや60Hzの回転速度で回る電源）は、タービン（機械）の回転で発電しており、周波数や電流の急激な変化に対して、同じ周期で回転を維持する力（慣性力）が働くため、相対的に周波数や電流の急激な変化に対して、発電を継続し、周波数を維持する機能を有する。



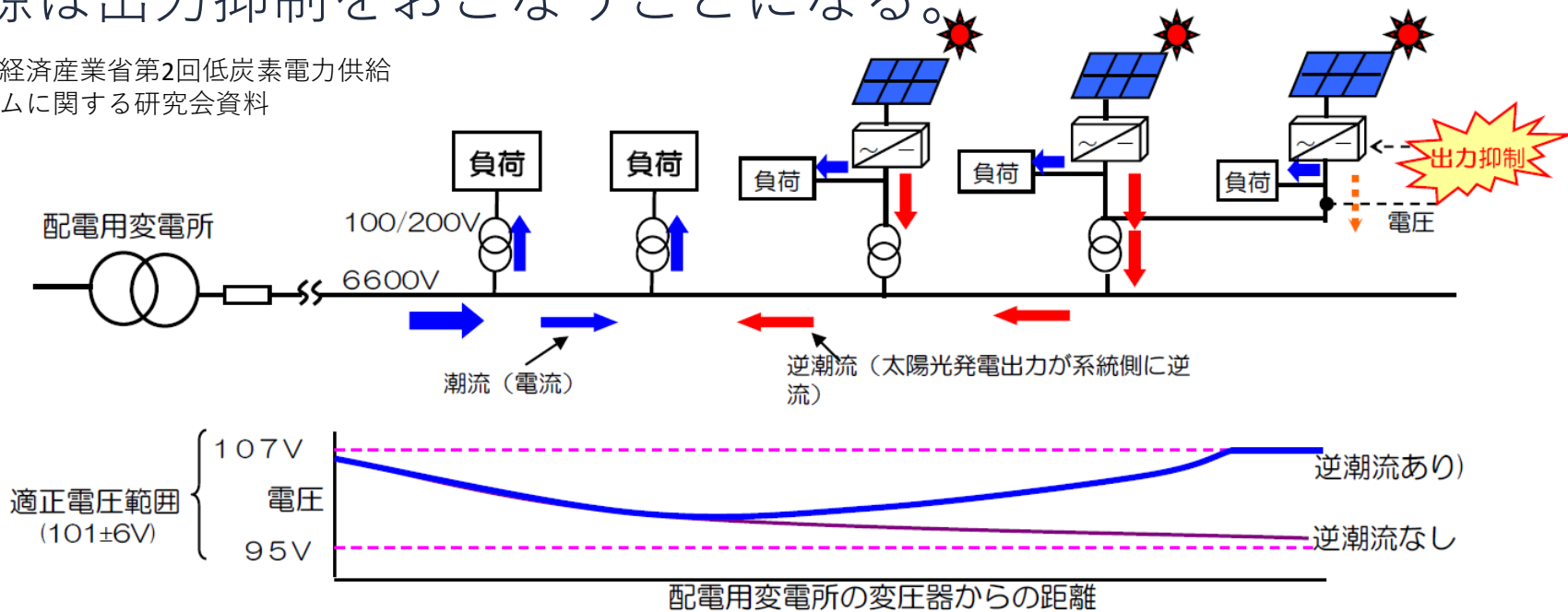
出典：総合資源エネルギー調査会基本政策分科会資料



太陽光発電大量普及による電圧影響問題

太陽光発電等の分散電源が余剰電力を逆潮流するためには、その点での電圧を高める必要がある。逆潮流が周辺で増加していくとその地点の電圧が規定以上となり、いくつかの分散電源は出力抑制をおこなうことになる。

出所：経済産業省第2回低炭素電力供給システムに関する研究会資料



RE100, EP100, EV100とは

- RE100, EP100, EV100とは**国際企業イニシアティブ**。非営利団体The Climate Group等が運営。日本では日本気候リーダーズパートナーシップ(JCLP)が窓口を務める。
- **影響力の大きい企業がシグナルを市場に届ける**ことが目的。3点は脱炭素経営の3本柱
- RE100 事業で使用する電力の再生可能エネルギー100%にコミットする。CDPと共同で運営。世界で260社以上、日本は43社が参加
- EP100 事業のエネルギー効率を倍増（50%省エネ）させる。Alliance to Save Energyと共同で運営。世界で100社以上、日本は3社が参加
- EV100 輸送部門の電化。The Climate Groupが運営。世界で100社以上、日本は5社が参加

参加企業は2021年1月末現在。The climate groupおよびJCLPのホームページ及びJCLP資料を参考に作成。



本講の目的

- RE100, EP100, EV100は企業イニシアティブであるが、**脱炭素社会を創出するための3本柱**でもある。以下、この3つの動向が建築に与える影響を議論する。



RE100と建築

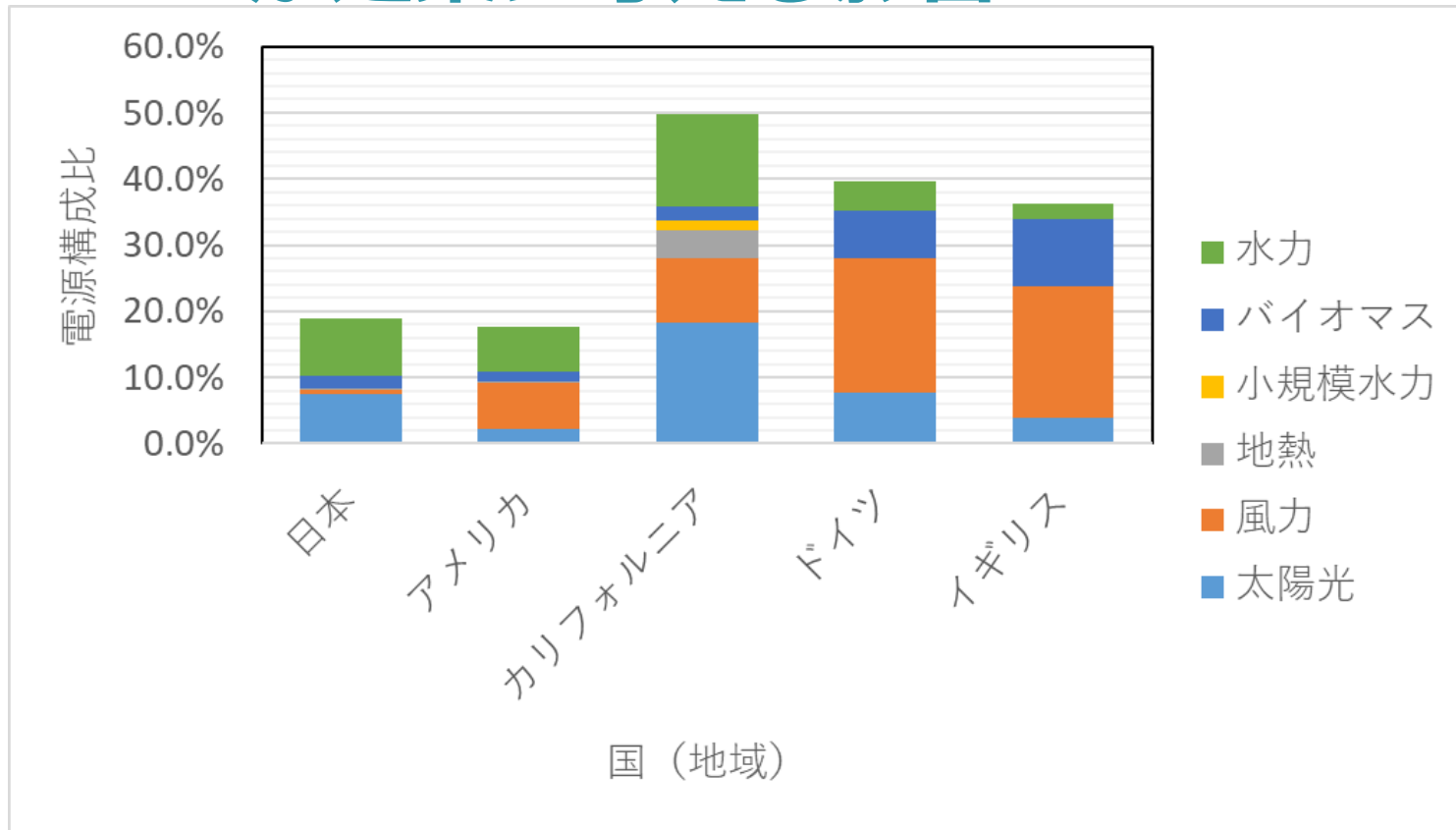
■ 建築で使用することのできる再生可能エネルギー

- 太陽光発電
- バイオマス熱利用(ペレットストーブ)
- 太陽熱利用(アクティブ・パッシブ)
- 電力以外の熱利用は電化の進行に伴う電力ピーク上昇を押し下げ、後述の電力システムへの影響を緩和する効果がある。

■ 太陽光発電

- 住宅・建築に統合された太陽光発電(Building-Integrated PV)は、エネルギー的には送配電ロスが無く利用できること、経済的には住宅・建築の電力小売価格（10円～25円/kWh?）との競争となり、メガソーラーが発電所としての製造原価での比較となるのに比べて優位。
- 住宅で昼間に余剰となる電力の融通が課題(HP給湯器やEVでの利用)

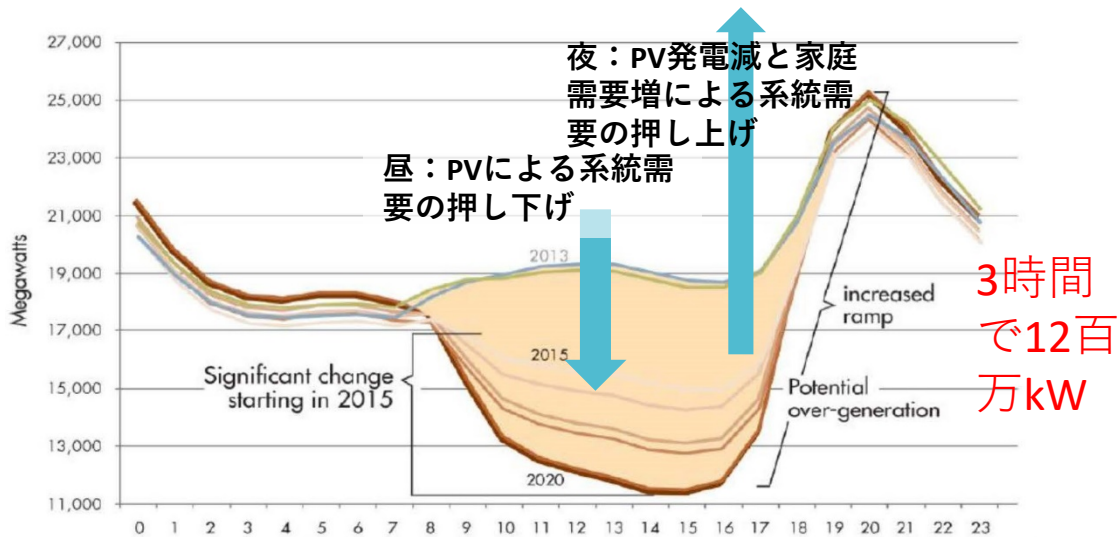
RE100が建築に与える影響



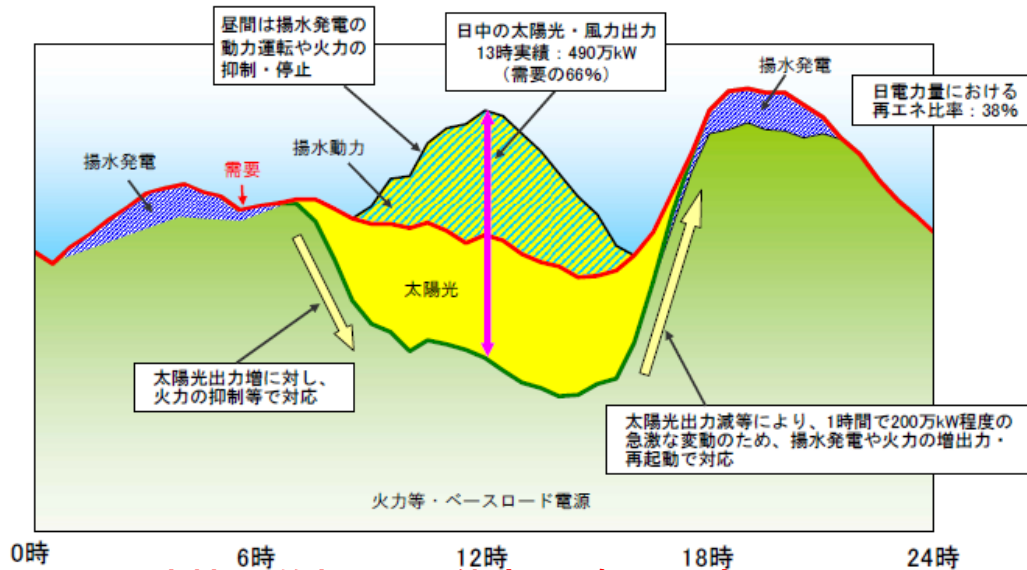
2019年度の各国再生可能エネルギー割合。日本の再生可能エネルギー構成比は大規模水力を除けば太陽光発電が支配的：カリフォルニアの状況に似ている。ドイツ・イギリスは風力が支配的

出典:IEA Electricity information. カリフォルニアはCalifornia Energy Commission資料から下田推定。

RE100が建築に与える影響



カリフォルニアのダックカーブ(CA ISO) 夕方の急激な系統発電要求上昇に対応するため、火力発電を準備する必要。2020年8月にはこの時間帯に計画停電実施。



九州電力管内の電力需給 (2016年5月4日)

出典: 九州電力資料 (2016年7月)

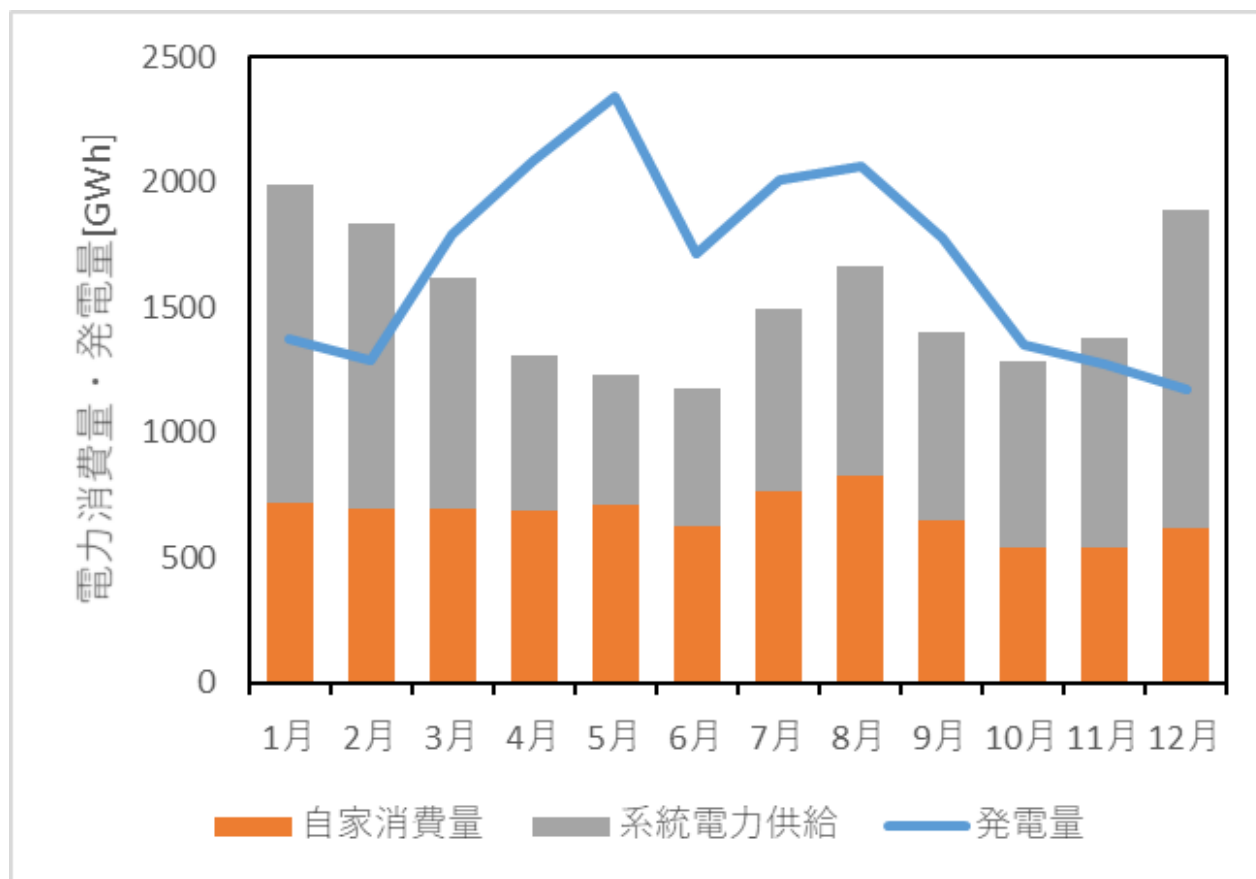
ダックカーブに対応した建築を考える必要がある。

昼間の余剰の自己消費(ヒートポンプ給湯機)
 デマンドレスポンスによる夕方の需要急上昇の緩和
 蓄電、蓄熱、駆体蓄熱
 バイオマス・太陽熱の利用。



RE100が建築に与える影響

- 年間のPV発電と家庭部門電力消費（全電化を仮定）をバランスさせたとしても、季節バランスで見ると冬に足りなくなる。



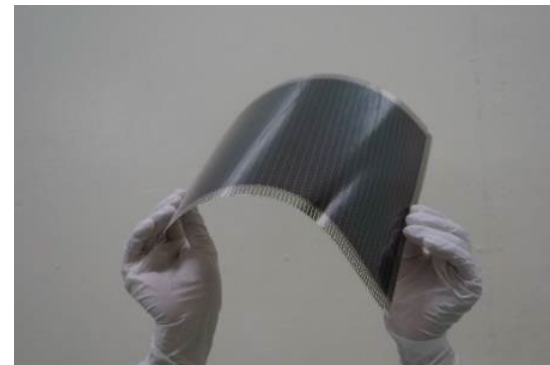
長期蓄電媒体
としての水素
の必要性

下田他：家庭部門ゼロエミッション条件達成時のエネルギー需要とエネルギーマネジメントのあり方，エネルギー・資源学会研究発表会（2020）



ペロブスカイト太陽電池

- ペロブスカイトと呼ばれる結晶構造の材料を用いた新しいタイプの太陽電池(日本発)グリーン成長戦略14項目の一つ。
- シリコン系太陽電池や化合物系太陽電池にも匹敵する高い変換効率を達成している。
- ペロブスカイト膜は、塗布（スピンコート）技術で低温で容易に作製できるため、既存の太陽電池よりも低価格になる。
- さらに、フレキシブルで軽量な太陽電池が実現でき、曲面などシリコン系太陽電池では困難なところにも設置することが可能になる。



出典：NEDO、資源エネルギー庁基本政策分科会







EP100と建築

- **ゼロエミッションを語る**とき、**エネルギー供給の脱炭素化が注目を浴び、ともすれば省エネルギー、エネルギー需要の削減が重要視されない**きらいがある。
- **RE100のためには需要側の省エネルギーも重要。**
 - **現在のRE20%弱**
 - **エネルギー効率が倍(エネルギー消費が半分)になれば40%になる。**
 - **その上で再生可能エネルギーなどを倍にするとRE80%。ゼロエミッションが見えてくる。**

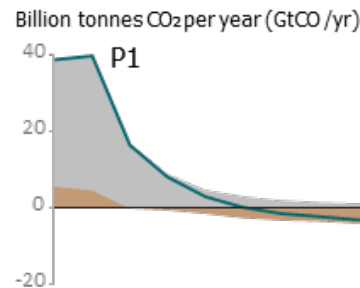


EP100と建築

- IPCC 1.5°C報告書における1.5°Cを達成する4つのシナリオ
- IPCCは5次報告書まで1.5°Cシナリオは実現不可能としてきた。

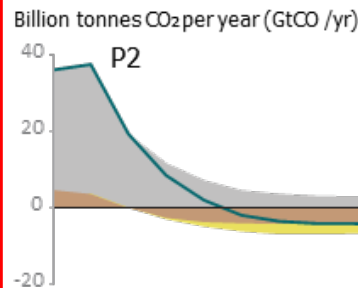
Breakdown of contributions to global net CO2 emissions in four illustrative model pathways

● Fossil fuel and industry ● AFOLU ● BECCS

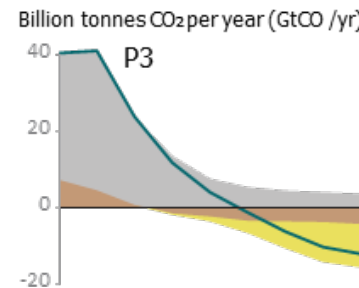


需要32%減、RE
77%BECCS無し

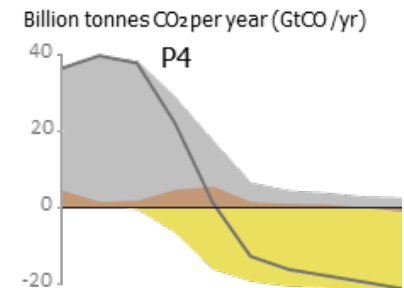
LEDシナリオ
(Low Energy
Demand)



需要2%増、RE 81%、
BECCS 151Gt



需要21%増、RE
63%、BECCS 414Gt



需要44%増、RE
70% BECCS 1191Gt

残りのシナリオではネガティブエミッション技術が必要！

出典：IPCC 1.5°C特別報告書政策決定者向け要約



EP100と建築

- IIASAのLEDシナリオ（Grubler et al. 2018）
- 長期的な変化がQuality of Lifeの充実，都市化，革新的エネルギーサービス，最終需要家の役割の変容，情報革新の5つのドライバーからもたらされる。
- 最終需要とエネルギーサービス（エネルギーを使って何を求めているのか？）に着目
- 徹底的な省エネルギーが情報化（デジタル化、テレワークなど）、シェアリングエコノミー、電化によりもたらされる。



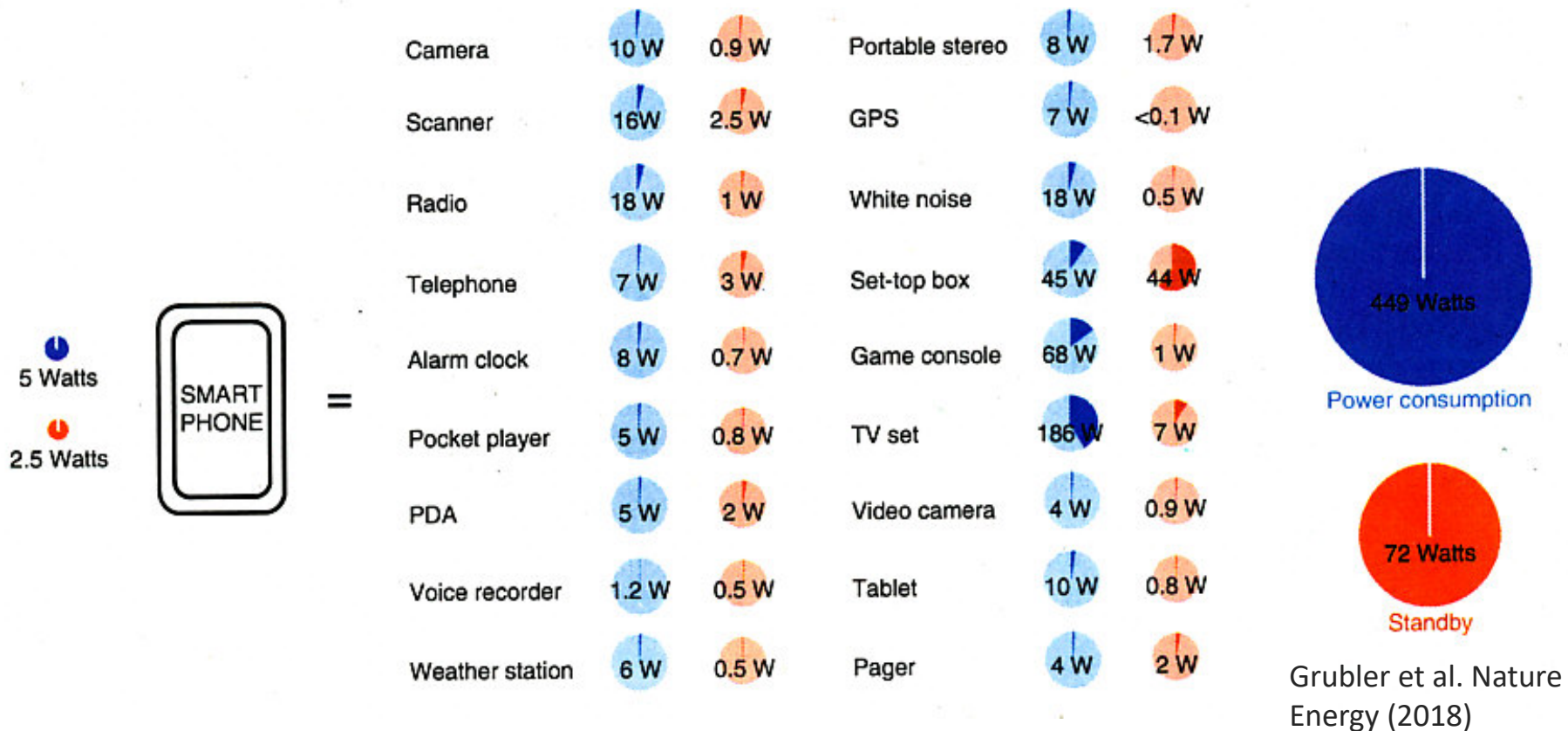
LEDシナリオ

- 住宅の冷暖房は、途上国の生活レベルを向上させ、世界の人々全てに一人当たり 30m^2 の居住面積を確保した上で、先進国では、高効率機器と建物改修により $160\text{-}170\text{MJ}/\text{m}^2$ 、途上国では新築建築の基準設定により $40\text{MJ}/\text{m}^2$ のエネルギー消費とする。
- 消費者機器は先進国で42台/人、途上国で24台/人とした上で、照明・機器における大幅な省エネで平均電力消費を $82\text{kWh}/\text{機器}$ とする。



EP100と建築

- IIASAのLEDシナリオ (Grubler et al. 2018)
- 機能統合 : デバイス数の削減。



著者らの最近の講演ではライフサイクルCO2の減少も併せて示している。



2050年ゼロエミッションシナリオの構築

■ 2050年BAUケース：

- 現状以上の追加対策をせずに（ただし、**全電化を仮定**）、ストックの更新によって高効率な住宅・機器が普及したケース
- 全戸建住宅に太陽電池設置（集合住宅設置と集合住宅の共用部消費は非考慮）

■ 2050年対策ケース：

A) エネルギー効率の改善

A-1)全住宅ストックの最新の断熱基準の適合

A-2)ヒートポンプ機器のCOPの向上

B) サービス量の変更

B-1)機器保有数量の上限を1台に

B-2)昼光利用による日中の照明使用の減少

C) 太陽電池の増設

C-1)戸建住宅の太陽電池を5kWまで増設

D) マクロフレームの変更

D-1)同居の促進による世帯数の減少

D-2)戸建住宅の比率を75%に

D-3)集合住宅の比率を75%に

2050年予測のポイント

- ✓ 具体的な方針が未定
- ✓ 住宅・機器の分布の変化だけでなく、世帯数の変化も不確定

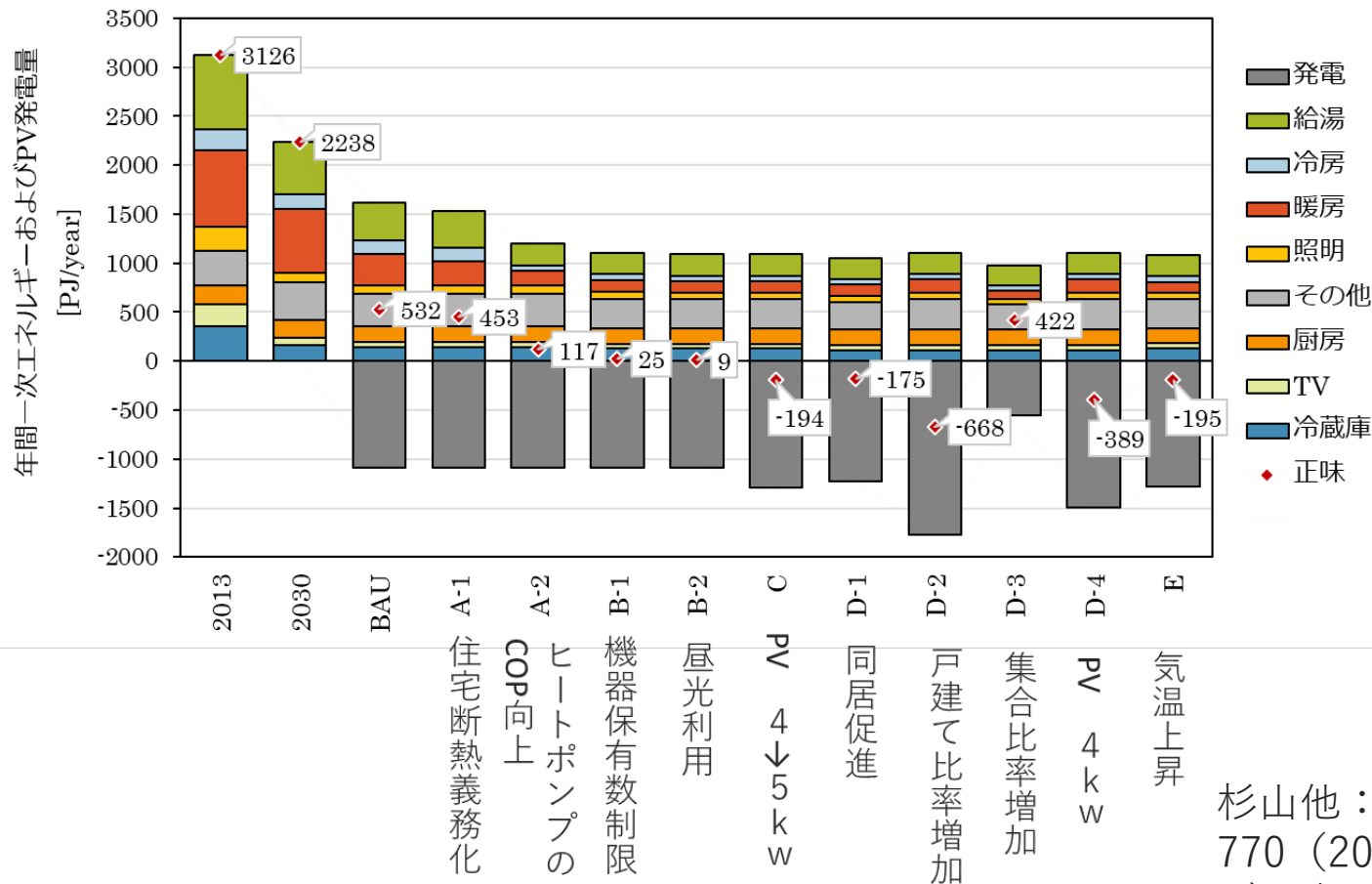
住宅・機器の効率向上だけでなくサービス量の変更も含めた。

杉山他：建築学会環境系
論文集770（2020），下
田他：エネルギー資源学
会研究発表会(2020)



EP100と建築

■ ボトムアップシミュレーションによる2050年ゼロエミッションの評価。現在利用可能な技術で**50%程度の省エネが可能**。屋根置きPVでゼロエミッションも可能



杉山他：建築学会環境系論文集 770 (2020), 下田他：エネルギー資源学会研究発表会(2020)



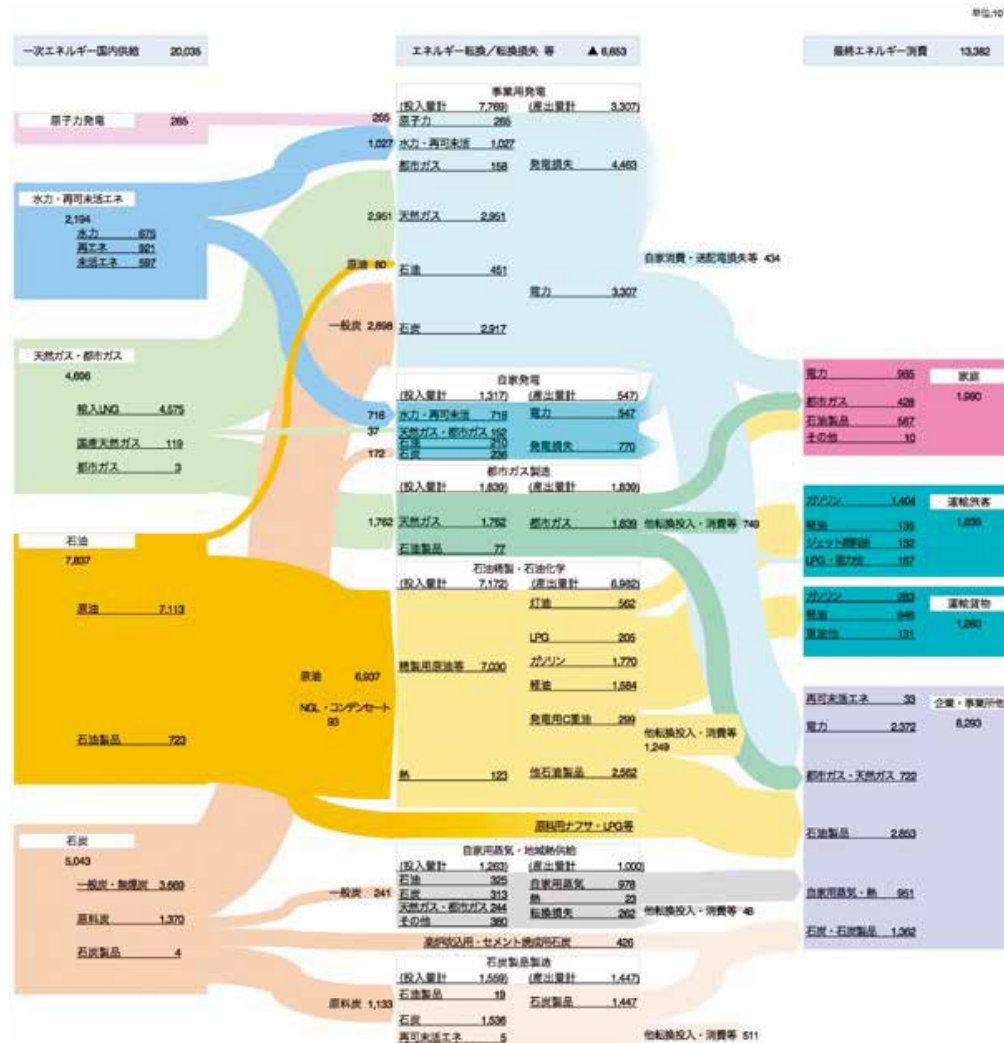
EP100と建築

- 2050年ゼロエミッションのために、鍵は暖房と給湯。暖房はこれまでの対策である程度進展するが、断熱対策の徹底は既存技術で最も高い効果がある。給湯は効率向上が大きな効果。
- **ゼロエミッションシナリオでは床面積当たり熱負荷、家電機器の電力消費量が前述のLEDシナリオの値とほぼ同じになる。1.5°C達成のためにはこの程度の省エネは必須。**
- ゼロエミッション達成後はエネルギー消費用途で支配的なものがなくなる。機能統合のようなこれまでと異なる省エネルギーが必要に。
- ここでPVは全国で94GW~115GW設置。戸建て住宅の全ての屋根は無理としても集合住宅の屋根などを使って実現可能か？
- 業務部門についても同様に**50%程度の省エネは可能。**ZEB推進と既築建築の性能検証で達成を。



EV100と建築

- EV100 日本の石油消費を減らすためにはモビリティの電動化が必要。(天然ガス・石炭は多くの部分が発電に使用)



輸入された原油の多くは運輸部門と石油製品に。



EV100と建築

- **EV導入の特徴 充電時間が長い。電池40kWhの場合**
 - 普通充電 200V 3kW 満充電16時間程度(64kWhで24.5時間)
 - 普通充電 200V 6kW 満充電8時間程度(64kWhで12.5時間)
 - 急速充電 3相200V50kW 80%充電40分程度(64kWhで60分程度)
- **家の普通充電 3kW,6kWは一般家庭のピーク電力1kW程度に比べて大きい。EV普及に伴い住宅地の配電線容量が不足しないか？あるいは集合住宅の駐車場に追加で配線することができるか？**
- **急速充電でも40分は今のガソリン自動車に比べて長い。**
- **「充電」という時間が生活の中に入ってくる。**

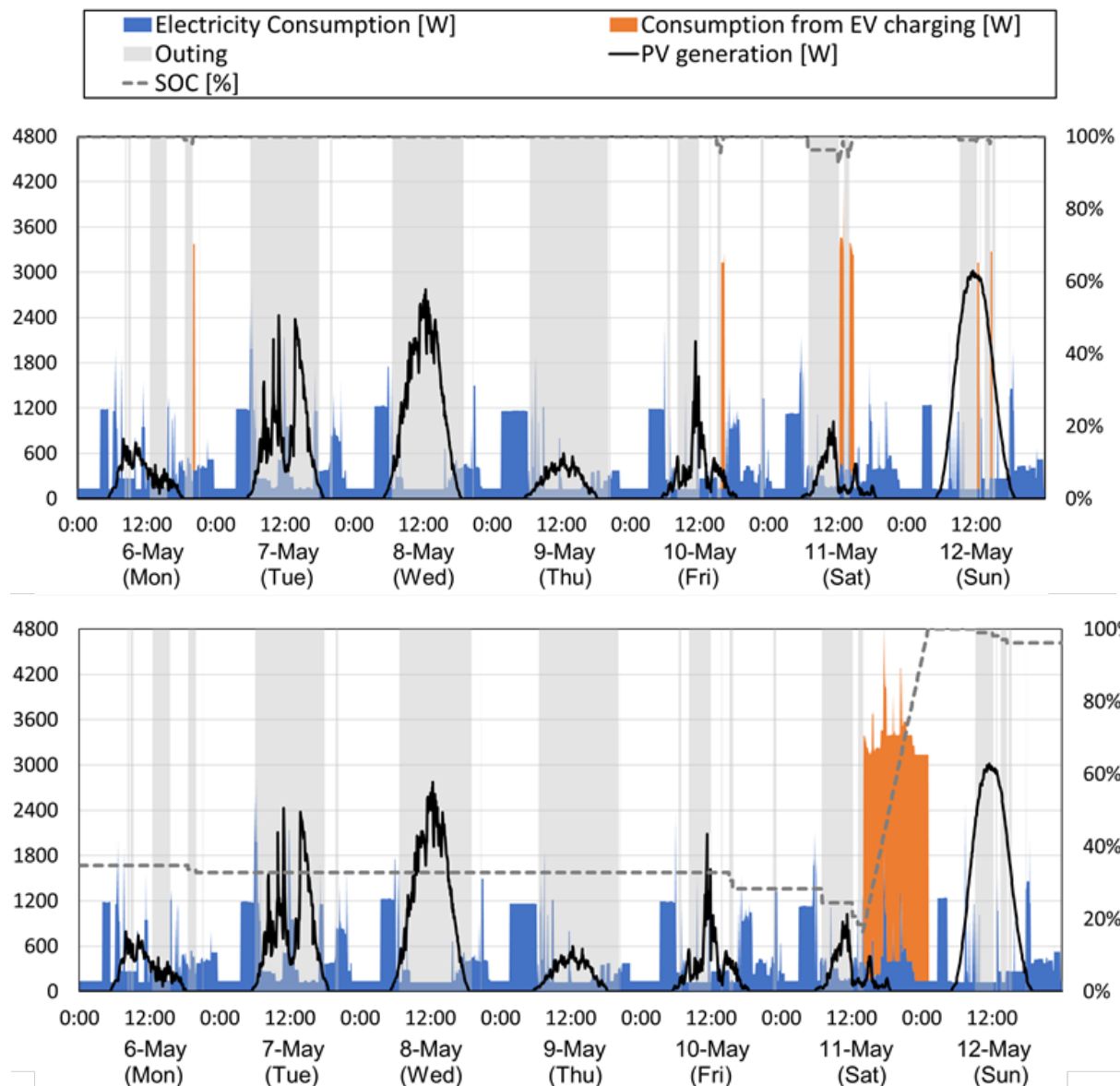


EV100と建築

- 商用車の仕事終わりの充電、帰宅後の充電が重なると、ダックカーブの電力急上昇を助長する。
- 「晴れた初夏の休日、家族で出かけて帰宅して夕方に充電」が最悪のパターン
- できるだけPV電力が余剰になる昼間に先(業務建物)で充電させる。米国では自家用車を通勤に使うことが多いので勤務地での充電が増えている。
- ショッピングセンター等か？業務建物でも急速充電50kWは相当な負荷。
- 住宅地ではEV充電が分散し、かつPV余剰電力を充電するようなスケジュール制御
- EVのメリットは、災害時・停電時の電力供給に使用可能であること。



自家用自動車の充電パターン



研究室のシミュレーション結果

出典：Gondkusuma et al., Usim2020

上：使用の都度充電
下：電池残量20%以下で充電

ほとんどの充電が夕方に集中→太陽電池の発電が利用しにくい。
ダックカーブを助長の恐れ。

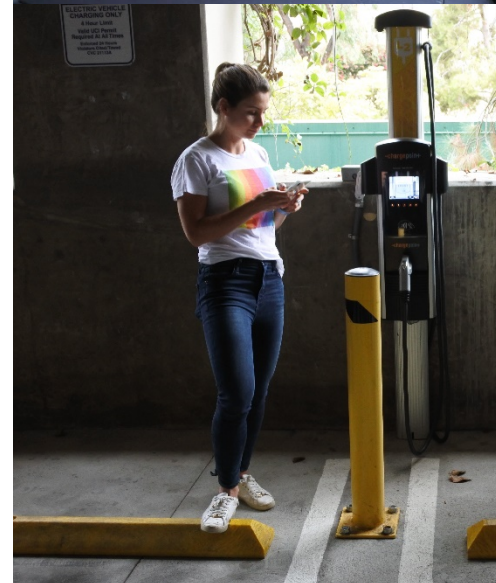
カリフォルニアの事例

家庭のピーク電力が5kWを超えると電力料金を上げる(サクラメント)

一般的に昼間・出先での充電を推奨している。(アメリカは自動車通勤が多い)



UC-Davisの駐車場(充電器付き)



UC-Irvineの職員駐車場充電ステーション

進むモビリティの電化

- 欧州委員会は7月14日、2035年にガソリン車の新車販売を、ハイブリッド車（HV）も含めて事実上禁止する案を発表。
- 水力が豊富なノルウェーでは以前より電気自動車の普及に力を入れており、2025年に新車をゼロエミッション車のみに。最近では新車販売の半分が電気自動車に。ストックでも6.4%(2017)
- イギリスでは2030年までにガソリン車とディーゼル車の販売を禁止。2035年にHVも禁止。
- 販売台数では中国、米国が1, 2位を占める。
- 日本は30年代半ばまでにHVを含んだ電動化。
- 加速性能、静粛性などコベネフィットが重要。



建築も電化？

- **電化＋電源の脱炭素化は世界の脱炭素化の主流。**
- **米国カリフォルニア州バークレー市では新築の電化を義務化。サンノゼ市では新築住宅の電化を義務化。サンフランシスコ市では自治体建物を電化。**
- **カリフォルニア州では2020年から新築低層住宅でPV設置義務化。**
(西尾・中野：電力中央研究所報告(2020) Y19005)
- **電化における課題：燃料ならではのサービス**
(下田：エネルギー・資源学会研究発表会(2018))
- **高温の加熱**
 - 調理、瞬間湯沸かし
- **ピーク電力の削減**
 - 特に冬の暖房時
- **電力システムのバックアップ**
 - BCP対策

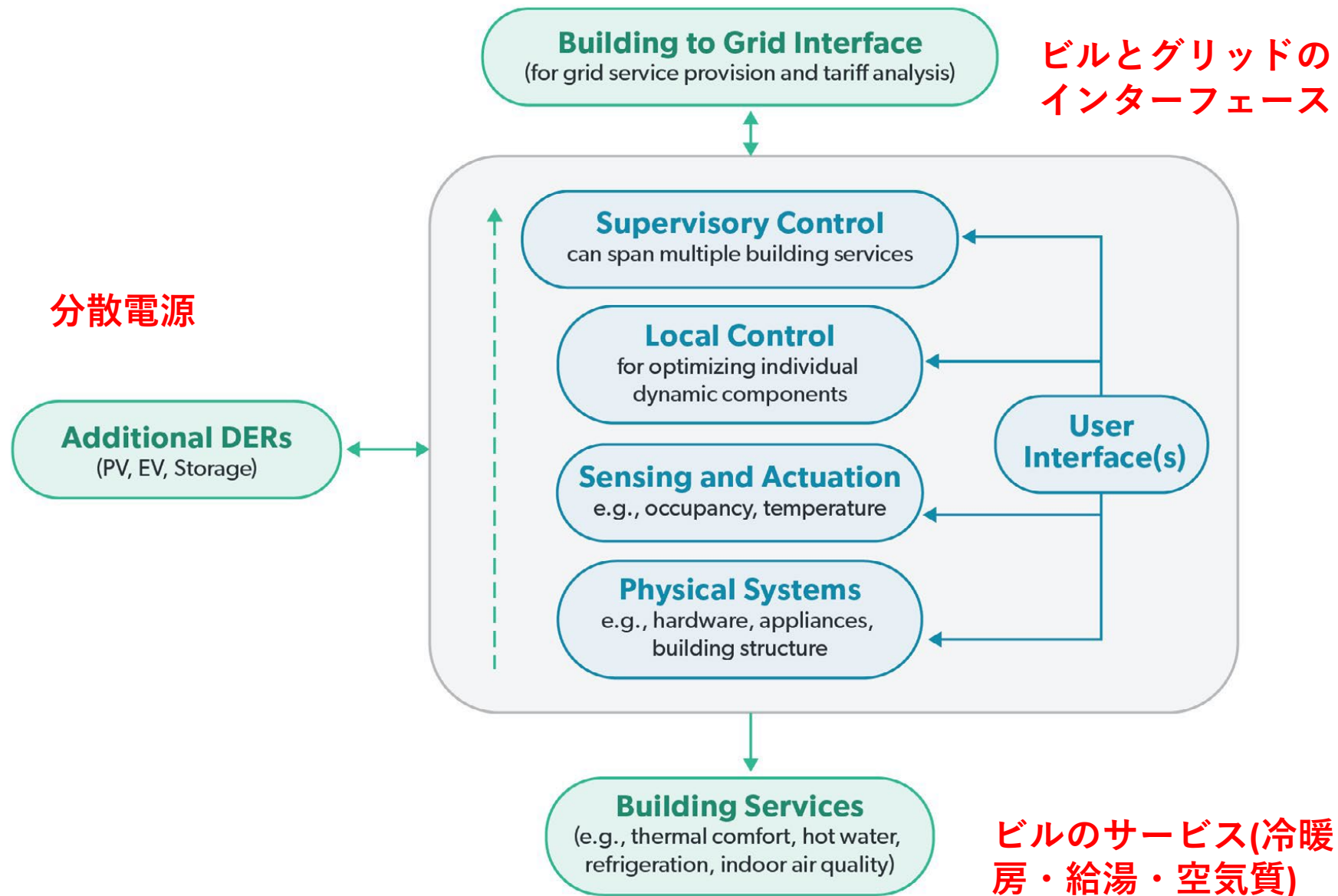
電力システムの一部としての建築

- 近年、建築と電力システムの関係が注目されている。
- **IEA-EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings**
 - 2014-2020年
- **US-DOE: A National Roadmap for Grid-Interactive Efficient Building**
 - 2021年5月刊行
 - Lawrence Berkeley National Lab.等が参加。
- 後者について以下で紹介。



US-DOE: A National Roadmap for Grid-Interactive Efficient Building

- Grid-interactive efficient buildings (GEBs)とは、分散型エネルギー資源の積極的使用に特徴付けられるスマート技術により、**電カグリッドへのサービスと居住者のニーズや好み、コスト**を最適化する、エネルギー効率の高いビル。
- 今後20年で、GEB'sは電力システムに対して1000億から2000億ドルのコスト節減をもたらす。
- 電力需要の削減と時間シフトによって、電力システムからのCO2排出を6%削減することができる。(中型石炭火力50機分)





GEBの技術

- スマートサーモスタット
- スマートコントロールのできる温水器
- 自動化された窓の日よけ
- ダイナミックグレーディング(自動白濁ガラスなど)
- 連続稼働する電子機器
- 照明のための次世代センサー・制御
- 潜顕熱分離空調
- 蒸気圧縮サイクル以外の冷媒
- HVACに統合された・アドオンされた蓄熱材
- 熱的に異方性の物質
- 熱伝導率をコントロールできる物質
- 液体デシカント蓄熱
- 次世代の蓄熱物質・複合材



これからの鍵は都市・街区？

- 建築＋住宅＋家電・設備＋自動車で作り上げる脱炭素で魅力的なまちの姿を作り上げることが、脱炭素を実現するだけでなく、これら技術で世界に貢献し、グリーンリカバリーに貢献するために重要。(下田：中環審中長期の気候変動対策検討小委員会2021/5/14)
- PVの発電の余剰を融通したり、電気自動車の充電スケジュールを調整するのは街区の単位
- VPP:数多くの建物と自動車を情報システムで結び、一つの発電所のように電力需給操作する。
- ヨーロッパではPED(Positive Energy District)やZEN(Zero Emission Neighborhoods)として検討が進む PEDはIEA-EBC Annex83 で活動
- 日本の課題はシステム化力とデザイン力、SDGsの視点



エネルギー以外の建築の温暖化対策

■ 木材の利用

- 森林の成熟により、日本は森林吸収量が2013年5166万t-CO₂から2030年2780万tと大幅に減少する見込み。
- 木材利用を促進し、吸収能力の高いエリートツリーに入れ替えていくことが効果が高い。
- 木造建築物の拡大は効果大きい。

■ エアコン使用にかかわるフロン

- HFCは近年増加傾向で温室効果の少ない冷媒の開発が求められている。
- 現行対策では使用時フロン漏洩の防止で2010万t-CO₂の削減を見込んでいるが、現状でその量すら把握できていない状態。
- エアコンをネットワークにつないだ遠隔監視サービスで漏洩診断等に利用することが考えられている。→省エネにも有効

ご静聴ありがとうございました。

shimoda@see.eng.osaka-u.ac.jp