

# 未来社会における環境エネルギー ～省エネルギーの重要性と大阪・関西万 博への期待～

2022.2.9

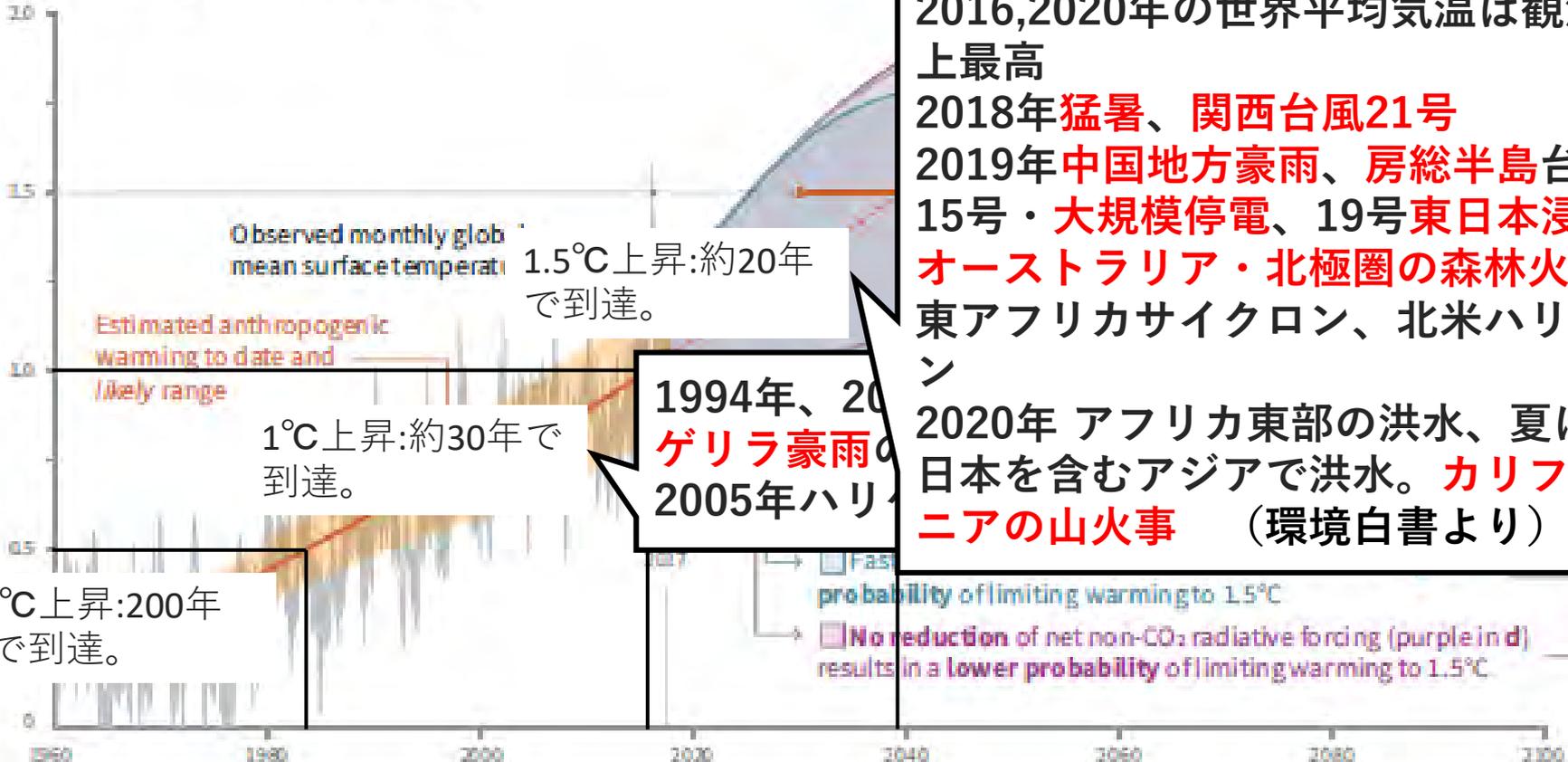
大阪大学 大学院工学研究科  
環境エネルギー工学専攻

下田 吉之

# IPCC1.5°C報告書

a) Observed global temperature change and modeled responses to stylized anthropogenic emission and forcing pathways

Global warming relative to 1850-1900 (°C)



2016, 2020年の世界平均気温は観測史上最高  
 2018年 **猛暑**、**関西台風21号**  
 2019年 **中国地方豪雨**、**房総半島台風15号**・**大規模停電**、**19号東日本浸水**、**オーストラリア**・**北極圏の森林火災**、**東アフリカサイクロン**、**北米ハリケーン**  
 2020年 **アフリカ東部の洪水**、夏には**日本を含むアジアで洪水**。**カリフォルニアの山火事** (環境白書より)

0.5°C上昇: 200年弱で到達。

1°C上昇: 約30年で到達。

1.5°C上昇: 約20年で到達。

1994年、2005年ハリケーン、**ゲリラ豪雨**

Fast probability of limiting warming to 1.5°C  
 No reduction of net non-CO<sub>2</sub> radiative forcing (purple in d) results in a lower probability of limiting warming to 1.5°C

# カーボンニュートラルを巡る動き

- 2015年 COP21 パリ協定採択「2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をする」ここから潮目が変わったと言われる
  - 2016年 (旧) 地球温暖化対策計画 2013年比2030年26%削減、「2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指す」  
(2℃目標に整合した「できる目標」)
  - 2018年 IPCC1.5℃特別報告書 (初めて1.5℃シナリオを提示)
  - 2019年 (旧) パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略「2050年までに80%の温室効果ガスの排出削減を目指すという長期的目標を掲げており・・・」
  - 2020年10月26日 菅首相の2050年カーボンニュートラル宣言
  - 2021年4月22日 菅首相が2030年目標を46%に引き上げることを宣言
- (上記2つは1.5℃目標に整合した「やらなければならない目標」)
- 2021年10月22日 「エネルギー基本計画」「地球温暖化対策計画」「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」閣議決定
  - 2021年10月31日～11月13日 COP26



# 地球温暖化対策計画のキーワード

- **環境・経済・社会の統合的向上（環境と経済の好循環）**
- **新型コロナウイルス感染症からのグリーンリカバリー**
  - 脱炭素社会、循環経済、分散型社会への3つの移行
- **全ての主体の意識の変革、行動変容、連携の強化**
  - 知見や情報の共有、それらを伝え、実践する人材の育成と活動の展開
- **研究開発の強化と優れた脱炭素技術の普及等による世界の温室効果ガス削減への貢献**
- **将来世代 の重要性**
  - 将来を担う若者の声をすくいあげていくため、行政が若者世代の意見を受け止める場を設け、脱炭素を踏まえた社会経済の在り方等をはじめ、政策への反映及び若者世代の当事者意識の向上と取り組み促進の好循環につなげていく。
  - 審議会でも将来世代からの意見聴取



# 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」のキーワード

- 利用可能な最良の科学に基づく政策運営(IPCCなど)
- 経済と環境の好循環の実現
  - 世界は脱炭素の大競争時代
- **労働力の公正な移行**
  - 産業界にはこれまでのビジネスモデルや戦略を根本的に変えていく必要がある企業が数多く存在する
- **需要サイドの変革**
  - 技術を普及させていく「**経済社会システムのイノベーション**」と、「**ライフスタイルのイノベーションが必要**」
- 各分野・主体における迅速な取り組み
- 世界への貢献
- **将来に希望の持てる明るい社会に向けて**
- 14項目の技術イノベーション
- グリーンファイナンス
- イノベーションのための人材育成



# 私たちに求められていること

## カーボンニュートラルの達成

- カーボンニュートラルへのビジネスの転換
- 我が国は何で世界に貢献するのか？グリーンリカバリー
- 技術のイノベーション
- ライフスタイルイノベーション
- 次世代のリーダーの育成

## ますます厳しくなる温暖化影響への適応

- 農業をはじめとした産業、街づくりや暮らし方の改革
- 自然災害に対する適応策。



# 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のみ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、省エネより右は不要？  
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

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



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

- 現時点で再生可能エネルギーの比率20%程度。これを4~5倍にするよりも、エネルギー需要を50%にして再生可能エネルギーを2倍程度にする方が現実的

Shimoda et al., Energy demand science for a decarbonized society in the context of the residential sector, Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2020), 132, 110051

- エネルギー需要を、充足度(QoL)、サービスに分解。

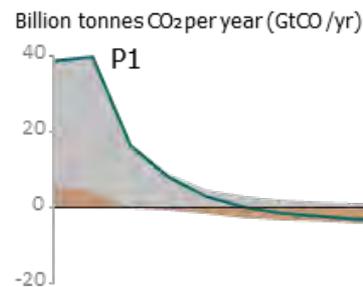


# 脱炭素社会へのシナリオ

- 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。

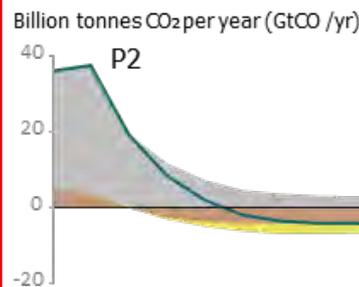
Breakdown of contributions to global net CO2 emissions in four illustrative model pathways

● Fossil fuel and industry ● AFOLU ● BECCS

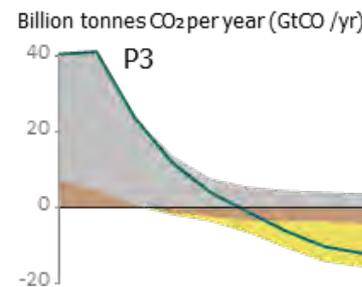


需要32%減、RE  
77%BECCS無し

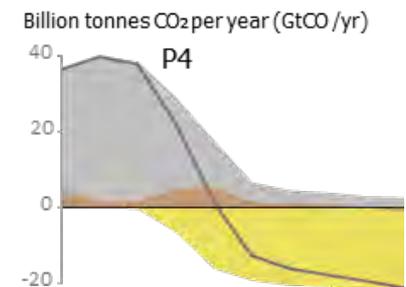
LEDシナリオ  
(Low Energy  
Demand)



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



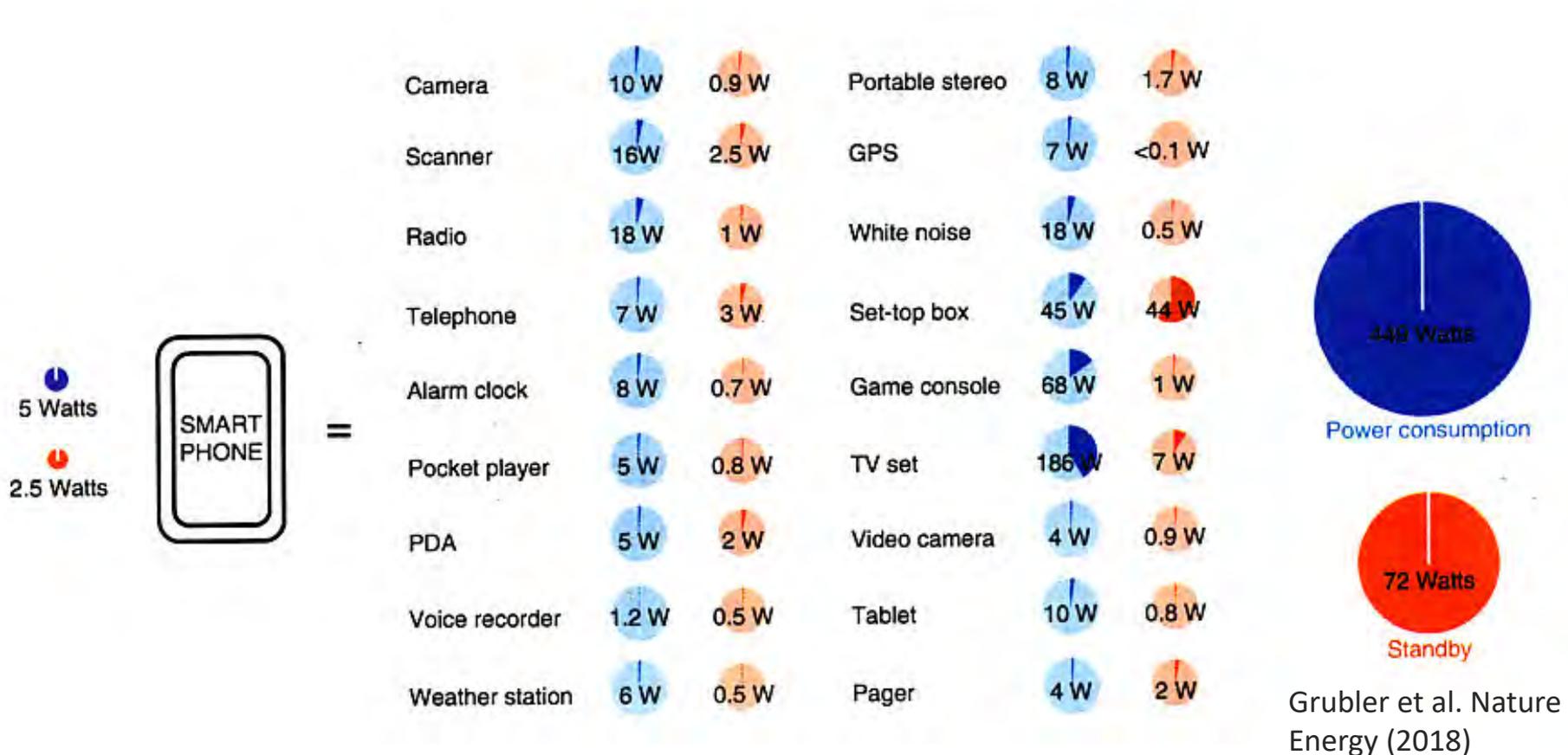
# 脱炭素社会へのシナリオ

- IIASAのLEDシナリオ (Grubler et al. Nature energy, 2018)
- Quality of Lifeの充実, 都市化, 革新的な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つのドライバーにより変化がもたらされる。
- **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。



# 脱炭素社会へのシナリオ

- 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。



# これからの省エネルギー

- **(1) 我慢の省エネ サービスの変化を伴う。(Energy Saving)**
  - 冷暖房設定温度、シャワーを短く、テレビをこまめに消す 等
  - 日本では自治体などの対策はこれが多いが、アメリカなどではあまり歓迎されない。電源不足など緊急時には必要だが通常あまり長続きしないし、国民全体に広がるものではない。
  - クールビズは我慢ではなかった。
- **(2) 効率向上の省エネ (Energy Efficiency)**
  - 基本的に産み出すサービスの質を変化させずにエネルギー消費量を削減すること
  - 機器のエネルギー消費効率の向上
  - 建物の断熱による暖房エネルギー需要削減
  - 日本では2000年代「トップランナー基準」により世界を先導する省エネ製品を生み出す。
  - 現在はエネルギー効率向上は頭打ちになっている。(建物はこれから)
- **(3) システムを変える省エネ**
  - 必要なサービスを変える、あるいは変えないままでサービスを提供する仕組みを変える。
  - テレワーク(交通エネルギー・業務施設エネルギーの削減)、テレショッピング(商業施設エネルギーの削減)



## 需要家に課せられた課題

- エネルギー消費の低減（高効率な機器・建築の選択とスマートな使い方）
- 電力需給の安定のために、能動的に需要を変化させる（エネルギーマネジメント、デマンドリスポンス）
- 脱炭素なエネルギーの選択（CO<sub>2</sub>排出の少ない電力の選択、電化やバイオマス、水素の利用など二次エネルギーの選択）



# 1. エネルギー消費の削減

## ■ 産業分野

- 特に大きな規模の工場について経団連の低炭素社会実行計画（今後カーボンニュートラル行動計画）等により一定の成果が上がっている。
- カーボンニュートラルを目指しては非連続なイノベーションが必要で時間がかかる。

## ■ 運輸部門

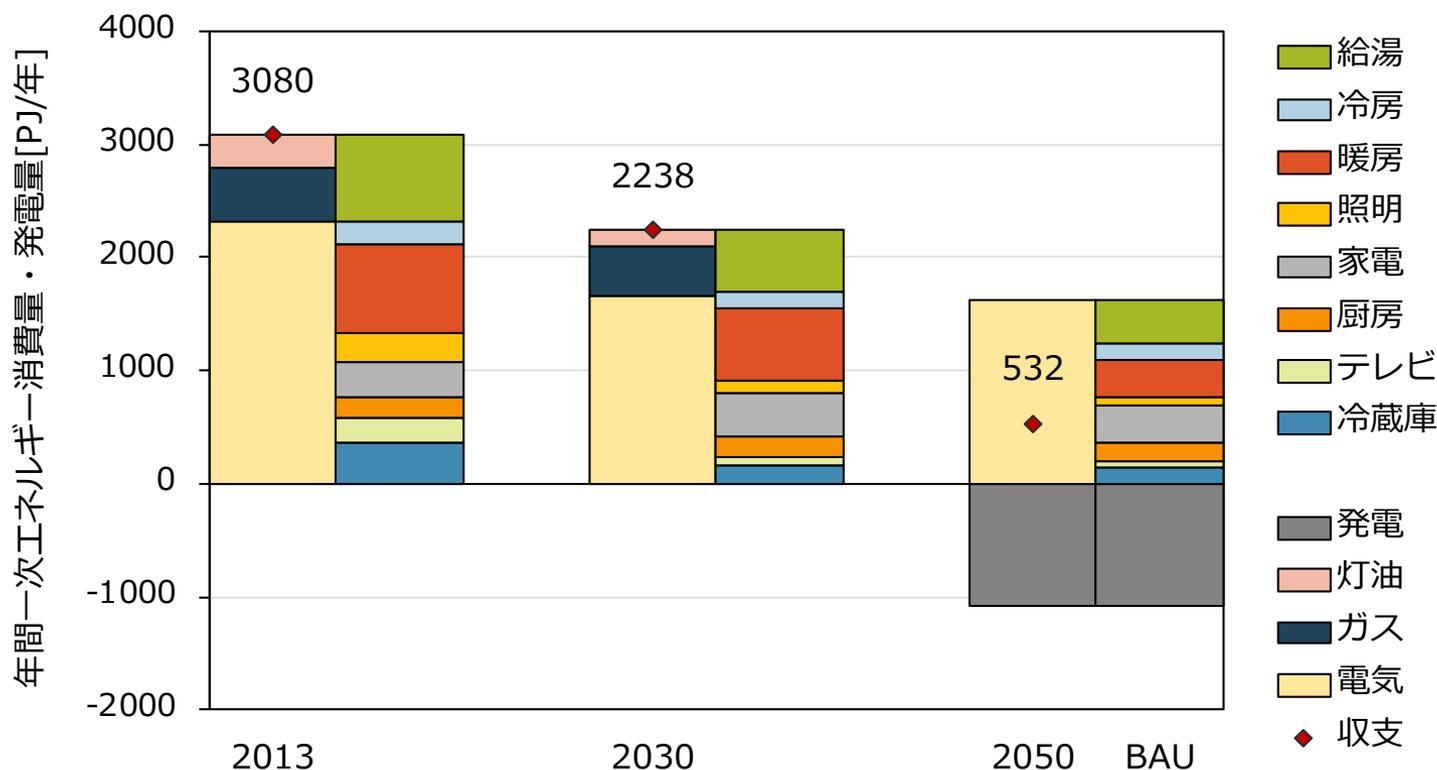
- 自動車の低燃費化で省エネが進んできた
- 今後は電動化などエネルギー転換が必要

## ■ 民生部門（業務その他・家庭部門）

- 既存の技術の着実な実行でエネルギー消費を半減可能。
- 規制が海外流出につながることは無い。従来トップランナー制度や大気汚染規制で競争力を高めてきた実績。
- 建設・住宅・家電は日本の得意な産業分野。技術の優位性を保つ。
- 対策が普及するまでの時間が長い。

# 日本の民生家庭部門はPVでCN可能

- 日本の家庭部門の年間一次エネルギー消費量とPV発電量
- エネルギー消費は既に利用可能な技術の普及で現在の半分程度にできる。



# 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

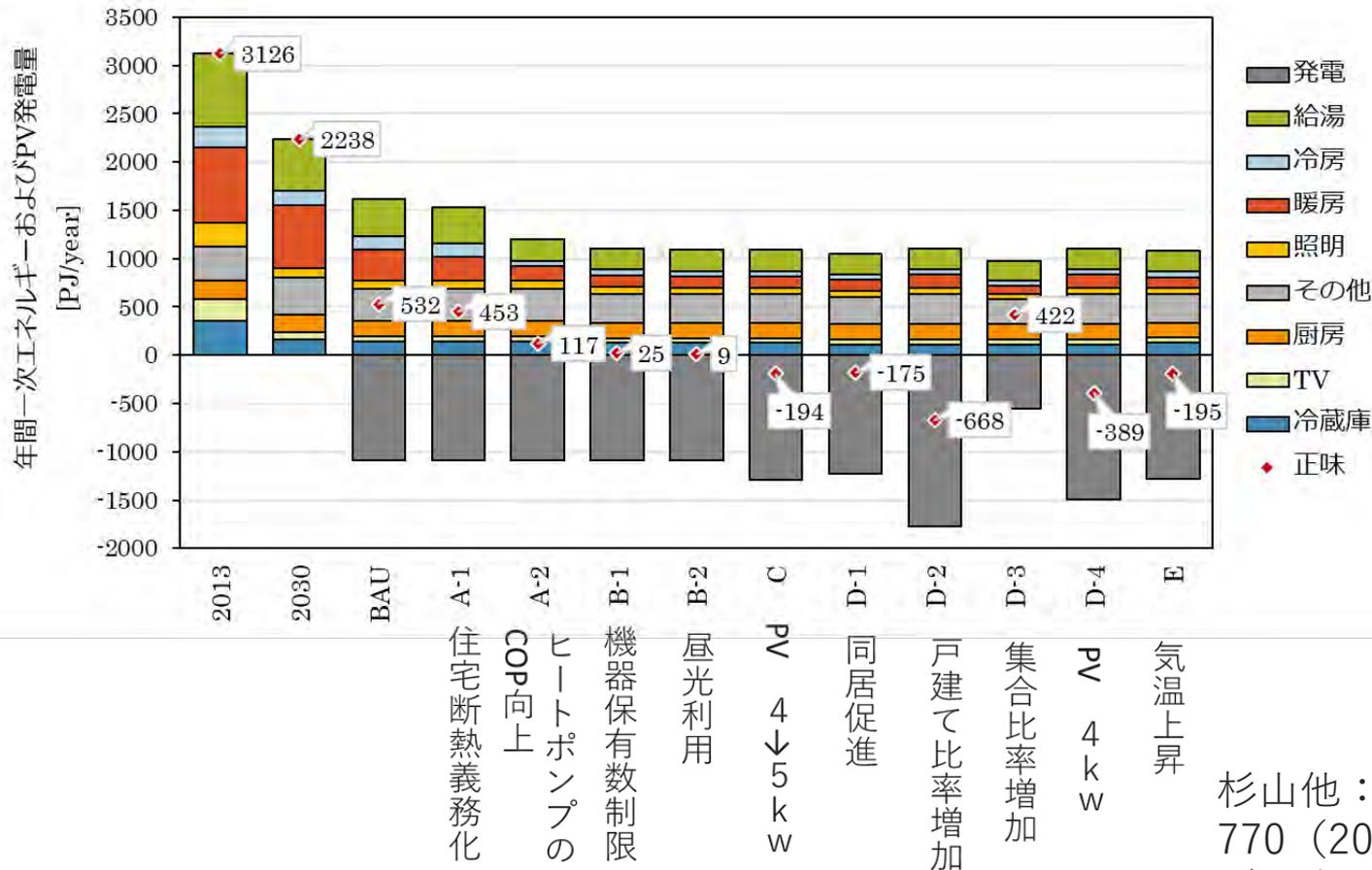
住宅・機器の効率向上だけでなくサービス量の変更も含めた。

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)



# 2050年ゼロエミッションシナリオの構築

- 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)



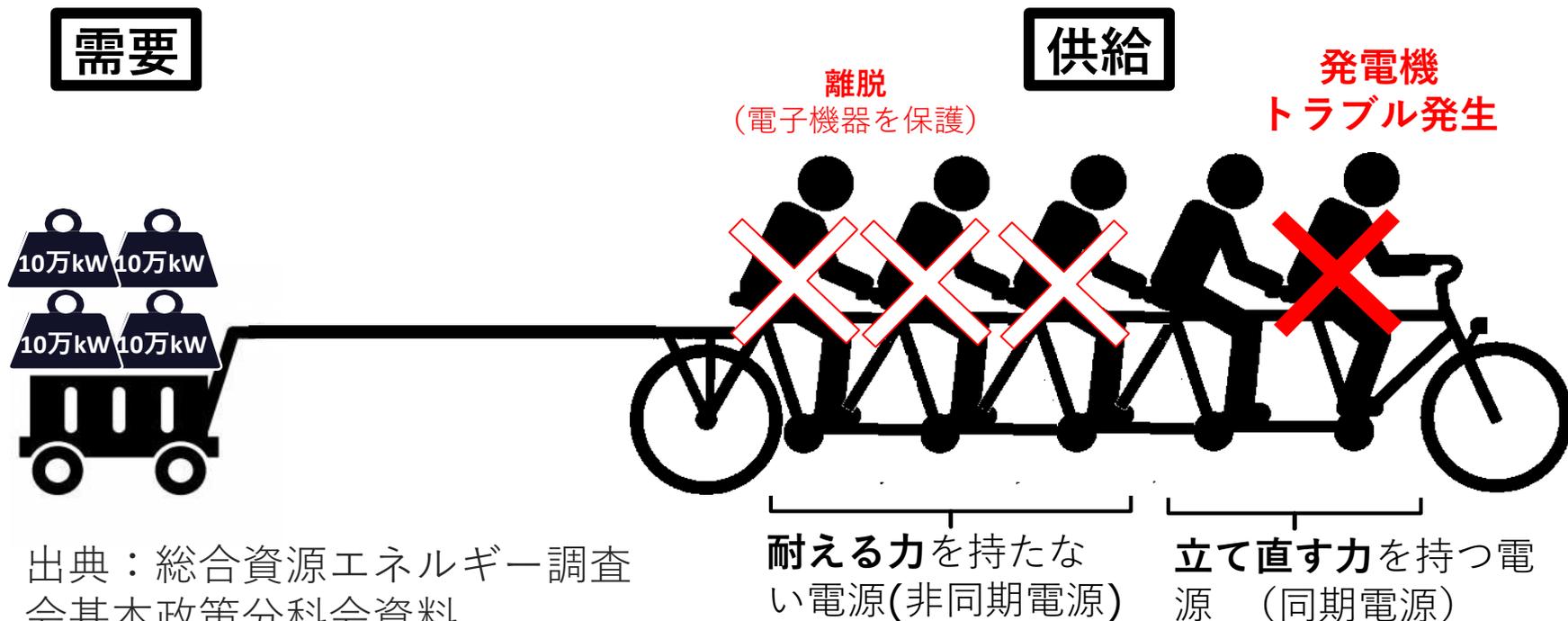
## 2. エネルギーマネジメントの重要性

- これまでは数多くの需要家をまとめた電力需要に対して、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しようとも、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)
- 需給安定のため、発電調整や電池だけでなく電力需要側の協力が必要に。



# 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。



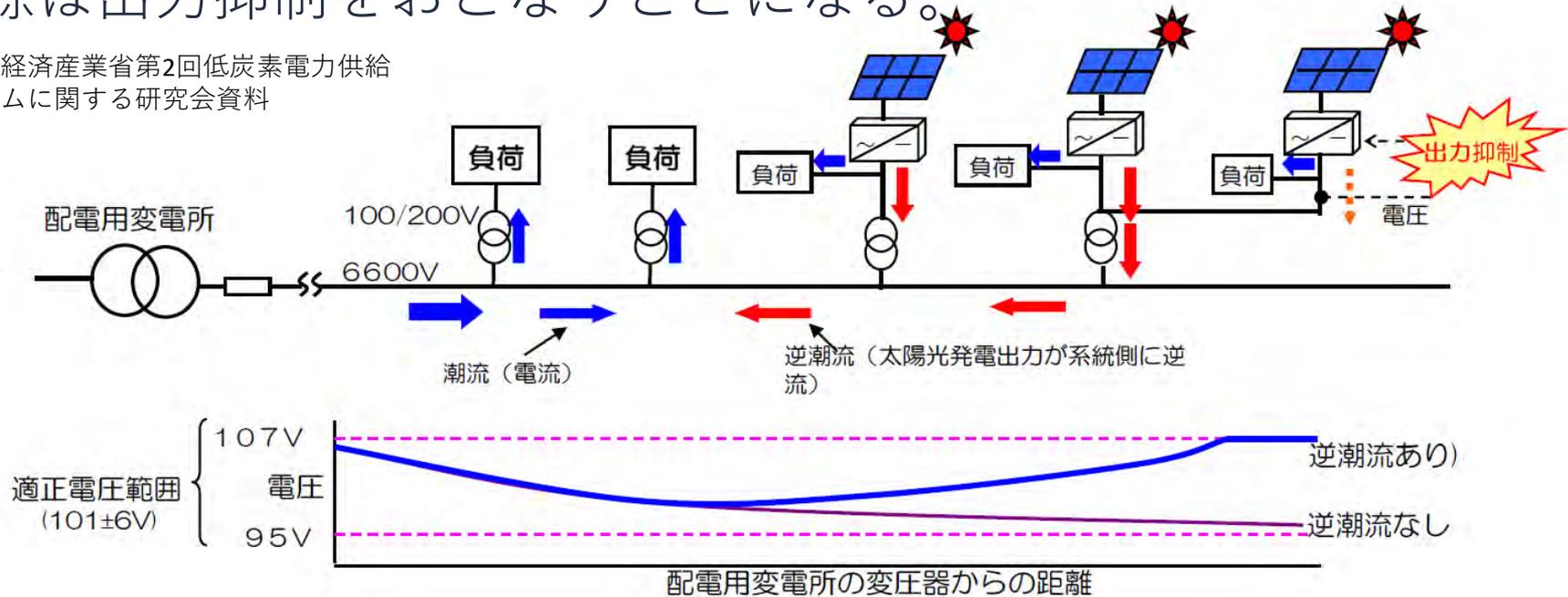
出典：総合資源エネルギー調査会基本政策分科会資料



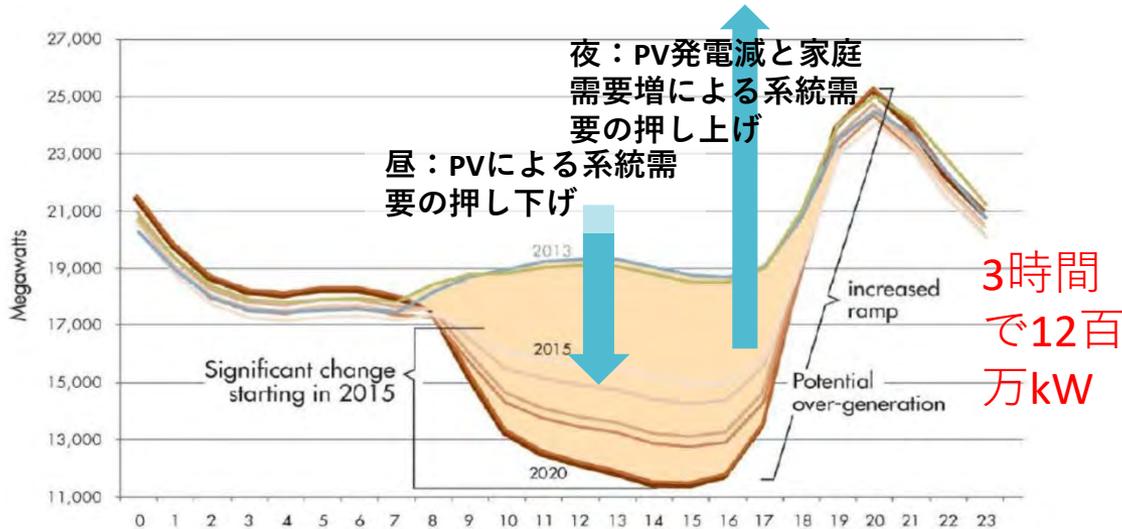
# 太陽光発電大量普及による電圧影響問題

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。

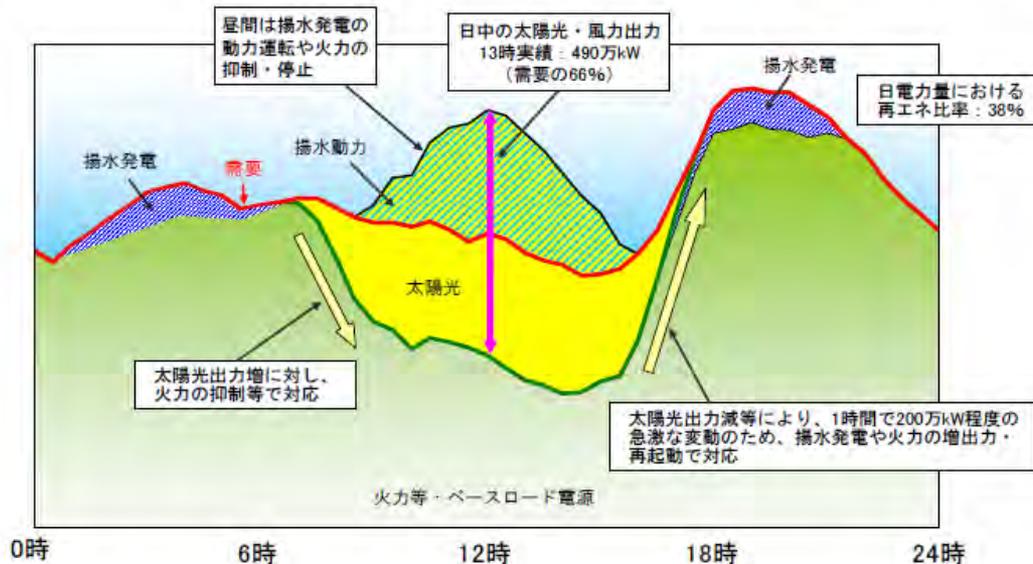
出所：経済産業省第2回低炭素電力供給システムに関する研究会資料



# 太陽光発電急拡大の影響



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。EVの普及と、夕方の充電はこの変動を加速する。



九州電力管内の電力需給 (2016年5月4日)

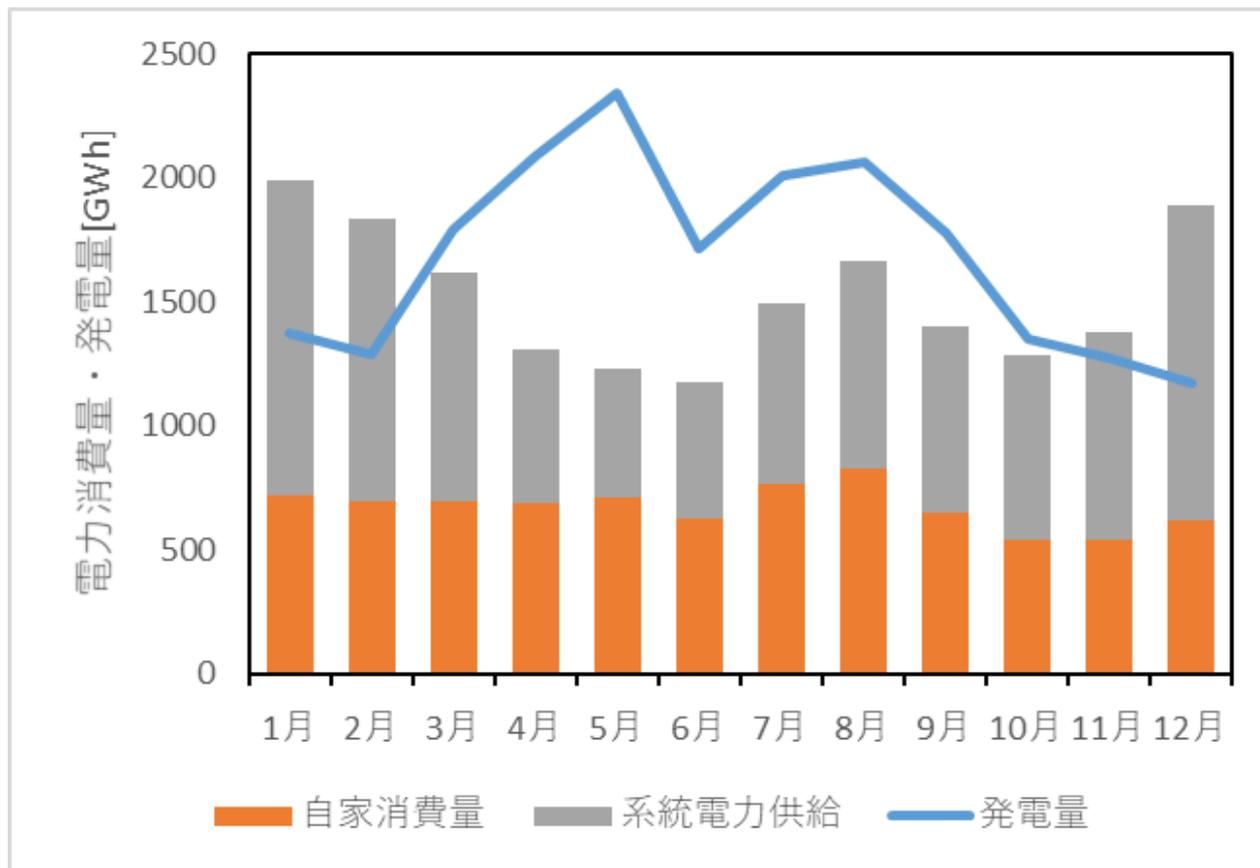
出典: 九州電力資料 (2016年7月)

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  
 EVのスマートチャージ  
 バイオマス・太陽熱の利用。



# 太陽光発電で住宅の需要をまかなう際の問題

- 極端なケースとして、年間のPV発電と家庭部門電力消費をバランスさせたとしても、冬に足りなくなる。

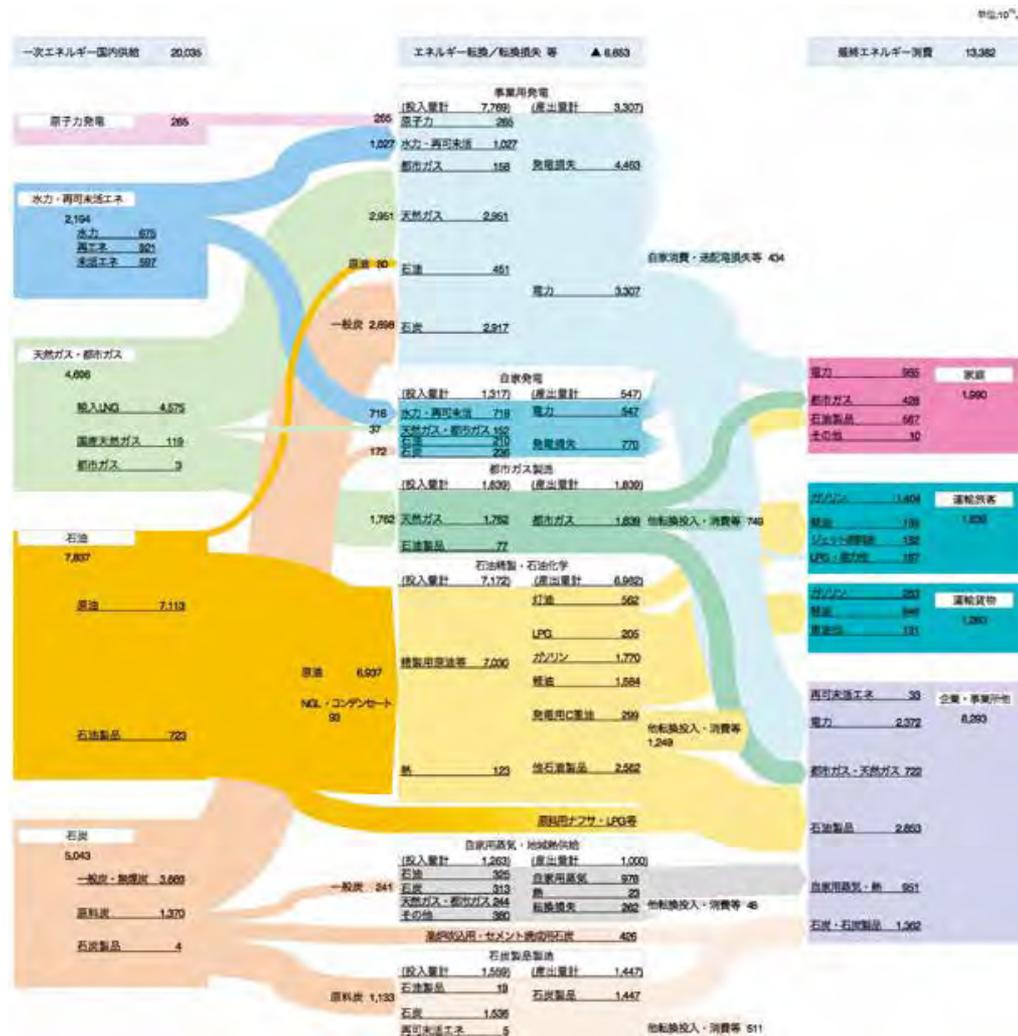


下田他：家庭部門ゼロエミッション条件達成時のエネルギー需要とエネルギーマネジメントのあり方，エネルギー・資源学会研究発表会（2020）



# 3. 脱炭素なエネルギーの選択

- 自動車：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。

出典：エネルギー白書



# 電気自動車への転換の推進

- 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。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もある。

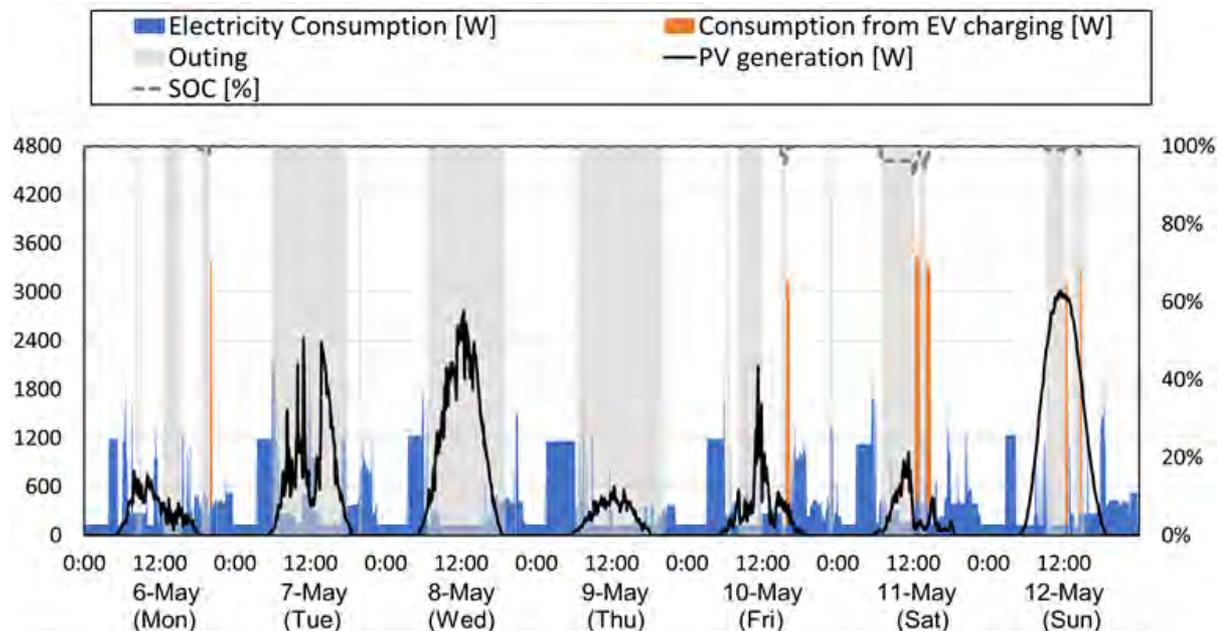


# 電気自動車への転換の課題

- **充電時間が長い。電池64kWhの場合**
  - 普通充電 200V 3kW 満充電24.5時間程度
  - 急速充電 3相200V50kW 80%充電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。**
- **集合住宅はどうするか？**
- **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出勤(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。**
- **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リング制御**
- **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。**



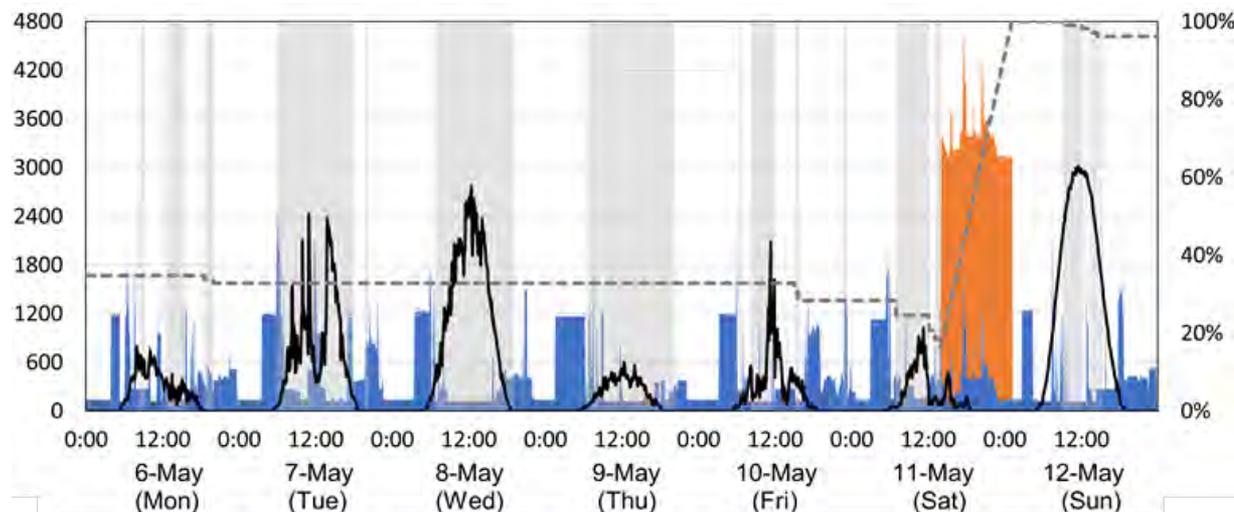
# 自家用自動車の充電パターン



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。

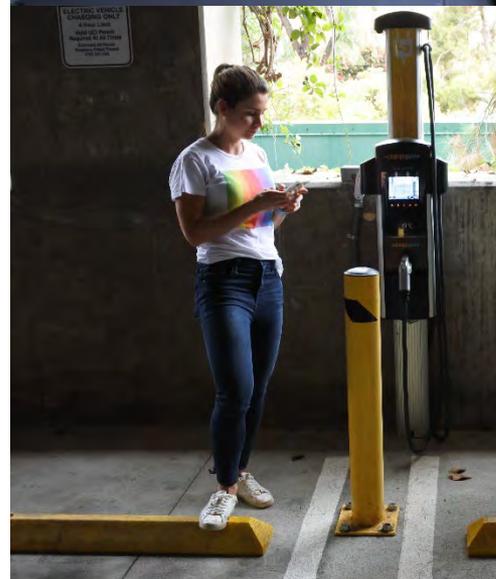
## カリフォルニアの事例

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)

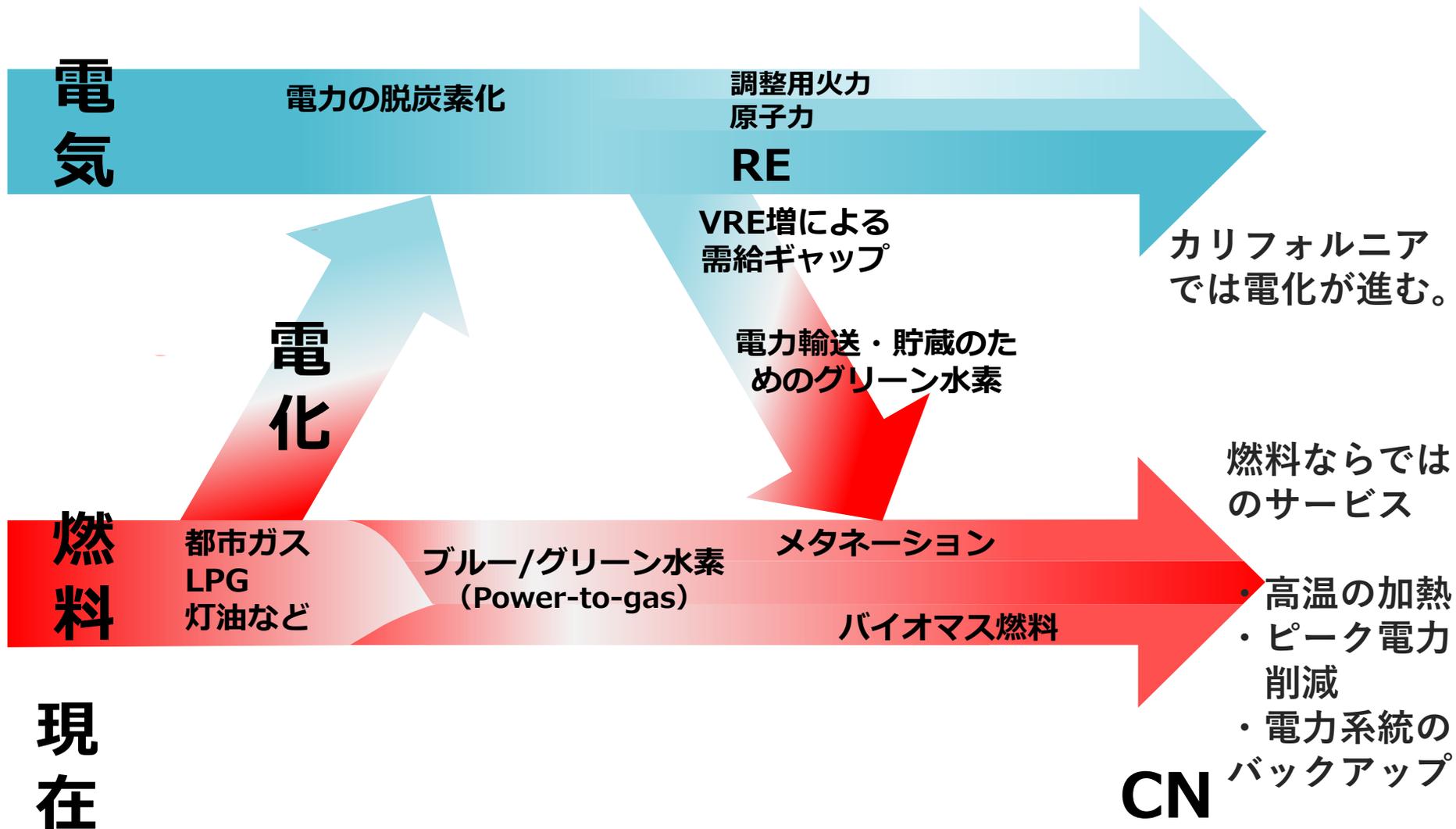


UC-Davisの駐車場(充電器付き)



UC-Irvineの職員駐車場充電ステーション

# 住宅・建築に供給されるエネルギーはようになる?





# 市民に脱炭素社会の到来を告げる博覧会

## ■ 脱炭素社会への到達の困難さ

- 以前の温暖化対策（エネルギー）計画
  - 供給側：大型発電設備の新增設
  - 大規模エネルギー消費者：経団連低炭素社会実行計画によるマネジメント
  - 家電、建築設備、自動車など：トップランナー基準による規制

→国が決めた目標値は実現しやすい
- 今回の地球温暖化対策計画・エネルギー基本計画
  - 供給側：再生可能エネルギーの普及（洋上風力と太陽光発電だが、太陽光発電は屋根置きなど小規模分散型が多い）
  - 大規模エネルギー消費者の省エネルギーは既存技術では限界に近く、イノベーションが必要
  - 機器のエネルギー効率向上は飽和。



# 脱炭素社会への到達の困難さ

- 今回の地球温暖化対策計画・エネルギー基本計画達成のためには
  - 家庭が省エネ・脱炭素に寄与する製品や電力、サービスの選択。
  - 中小事業者（工場、ビルオーナー）が省エネ・脱炭素に寄与する製品や電力、サービスを選ぶ。
  - 再生可能エネルギーの普及（特に太陽光）
  - 以上の対策は、家庭や中小事業者の購入行動に依存している。国や自治体の役割は一部規制の他は導入の促進と情報提供。温暖化を自分事として捉える。
  - コストは重要だが、特に家庭ではコストだけでは購入行動は説明できない。行動経済学的なアプローチの重要性



# 市民にとって魅力的な脱炭素社会のデザイン

- 脱炭素の製品やサービスをCO<sub>2</sub>排出量のみで語ると、多くの市民には「レストランのメニューのカロリー表」にしか見えない。
- 多様なコベネフィットを定量化する必要
  - 住宅では断熱による疾病防止の向上・医療費の削減
  - 電気自動車では静粛性、加速性能
  - 再生可能エネルギーでは地域の雇用創出 など
- 「脱炭素」のブランディングが必要。
- 私自身の経験では、エネルギー設備といえども「見た目のデザイン」はたいへん大事な要素。
- 博覧会では「脱炭素社会の到来」を見て、感じられることも重要ではないか？



## 住宅断熱性能向上の健康面のコベネフィット

- 慶應義塾大学伊香賀俊治先生のグループの研究成果  
(掲載誌はいずれも日本建築学会環境系論文集)
- 高断熱住宅に住み替えた収縮期血圧125mmHg以上の居住者は室温1℃上昇につき1.5mmHg低下している。又、中途覚醒回数も減少する。(海塩、伊香賀ら2016,海塩、伊香賀ら2017)
- 生活活動量の増加に有効なのは、住宅の脱衣所・廊下の最低室温が高い温熱環境。(断熱性能の高い住宅)  
(柳澤、伊香賀ら2015)
- 通所型介護施設利用者の調査より、自宅が寒い人は自宅が温かい人よりも要介護度が悪化する可能性が2.8倍高く、要介護認定年齢平均が2.9年速い。(中嶋、伊香賀ら2019, 小野、伊香賀ら2020)



# 太陽光発電と太陽熱温水器に関する 消費者選好アンケート結果

属性	係数	有意性	支払い意志額 (万円)
太陽光発電 (イメージ)	1.965	***	122.81
太陽熱温水器 (イメージ)	-0.408	*	-25.5
追加購入費用 (万円)	-0.016	***	1.00
購入時の補助金 (万円)	0.029	**	1.81
発電電力販売単価 (円/kWh)	0.011	**	0.69
光熱費節約額 (万円/20年)	0.00795	***	0.50

当時社会経済研究所 西條辰義教授らとの共同研究より

Yohei Yamaguchi, Kenju Akai, Junyi Shen, Naoki Fujimura, Yoshiyuki Shimoda, Tatsuyoshi Saijo : Prediction of photovoltaic and solar water heater diffusion and evaluation of promotion policies on the basis of consumers' choices, Applied Energy, 102(2013-2), pp.1148–1159



# EXPO2025 グリーンビジョン

## ■ 未来社会における環境エネルギー検討委員会

- 秋元 圭吾氏 RITE主席研究員
- 岩船 由美子氏 東京大学生産技術研究所 特任教授
- 下田 吉之氏【座長】 大阪大学教授
- 竹内 純子氏 U3イノベーションズ合同会社代表  
【オブザーバー】
- 齋藤精一氏（2025年大阪・関西万博PLLクリエイター）
- 経済産業省 商務情報政策局 博覧会推進室

## ■ 目指すべき方向性

- (1) 会場内だけでなく会場外も含めた広域エリアを対象とした  
実証・実装プロジェクトを実施
- (2) グリーン成長戦略における重点産業分野の取り組み推進
- (3) 導入する技術の成熟度（先進性／経済性）
- (4) 需要サイドの技術
- (5) スタートアップ等の参加促進
- (6) 来場者の理解促進を図るような仕組み



# EXPO2025 グリーンビジョン

## ■核となる技術

- (1) エネルギーマネジメント
- (2) 水素エネルギー等
- (3) 再生可能エネルギー
- (4) 3R(廃棄物、リサイクル)
- (5) CO<sub>2</sub>回収・利用



# エネルギー基本計画、パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略における2050年エネルギーのビジョン

- 徹底した省エネルギーによるエネルギー消費効率の改善に加え、脱炭素電源により**電力部門は脱炭素化**され、その脱炭素化された電源により、非電力部門において電化可能な分野は電化される。
- 産業部門においては、水素還元製鉄、**二酸化炭素吸収型コンクリート**、二酸化炭素回収型セメント、人工光合成などの実用化により脱炭素化が進展する。一方で、高温の熱需要など電化が困難な部門では、**水素や合成メタン**などを活用しながら、脱炭素化が進展する。
- 民生部門では、電化が進展するとともに、**水素や合成メタン**などの活用により脱炭素化が進展する。
- 運輸部門では、**電気自動車（EV）や燃料電池自動車（FCV）の導入拡大**とともに、二酸化炭素を活用した合成燃料の活用により、脱炭素化が進展する。
- 各部門においては省エネルギーや脱炭素化が進展するものの、二酸化炭素の排出が避けられない分野も存在し、それらの分野からの排出に対しては、**二酸化炭素直接回収・貯留（DACCS : Direct Air Carbon Capture and Storage）**や二酸化炭素回収・貯留付きバイオマス発電（BECCS : Bio-energy with Carbon Capture and Storage）、森林吸収源などにより二酸化炭素が除去される。



# 博覧会場において環境エネルギーの新しい取り組みを行うことの意義

- 博覧会のイベントとしての社会的責任として
- 次世代の都市インフラを決めるため
- 市民に「脱炭素社会」の到来を告げるため
- 2050年カーボンニュートラルを担う人材を育てるため。



# 次世代の都市インフラを決める博覧会

## ■ 1970年大阪万博

- 地域冷房（元々人工気候計画）
- 二元給水は提案されるも採択されず。

## ■ 2005年愛知万博

- マイクログリッド

## ■ 2025年関西万博

- 都市インフラとしてはエネルギーマネジメントと水素エネルギー関連
- エネルギーマネジメント：「いのち」（サービス需要）とSociety5.0（サイバーフィジカルシステム）を具現するシステムとして適する。
- 水素：水素を「見せる」。何から作ってどのように運んできて何のために使うのか？



**ご清聴ありがとうございました。**