



2030年に向けて
世界が合意した
「持続可能な開発目標」です



固体高分子型水電解と その地域分散型エネルギーマネジメント システムへの応用

理化学研究所 光量子工学研究センター (RIKEN RAP)

藤井 克司

村上 武晴、津野 克彦、森下 圭、奈良 美幸、和田 智之

秦 瑛、木下 渚、

松井 大知、小池 一輝、秋田 いつか、小椋 厚志 (明治大学)

1. はじめに

1. 気候変動対策と再生可能エネルギー
2. 植物と比較した再生可能エネルギー利用

2. 固体高分子型水電解セル(PEEC)の特性と応用

1. 燃料電池との違いと必要とされる特性
2. 性能向上に向けた方策
3. 水素を使いこなすには？システムの在り方

3. 分散型エネルギーの在り方と地域最適化

1. システムの基本制御だけでは...
2. 太陽電池を含めた創エネルギーの在り方(地域最適化)
3. さらに社会実装へ向けて

4. まとめ

1. はじめに

1. 気候変動対策と再生可能エネルギー
2. 植物と比較した再生可能エネルギー利用

2. 固体高分子型水電解セル(PEEC)の特性と応用

1. 燃料電池との違いと必要とされる特性
2. 性能向上に向けた方策
3. 水素を使いこなすには？システムの在り方

3. 分散型エネルギーの在り方と地域最適化

1. システムの基本制御だけでは...
2. 太陽電池を含めた創エネルギーの在り方(地域最適化)
3. さらに社会実装へ向けて

4. まとめ

気候変動対策の必要性と現状

IPCC: 2050年までに地球温暖化ガス排出NET ZERO目標

2030までに2010のGHG (Green House Gasses) の45%水準へ
かつ、2050までにnet zeroにしないと
地球の平均気温上昇を産業革命以前の1.5°C以内に抑えられない

地球の平均気温上昇を1.5°C以内に抑えれば、2.0°Cに比べ、
平均海面上昇を10 cm低く出来る
北極海の完全氷解を100年に1度にできる(10年に一度に比べ)
サンゴ礁の死滅を70 – 90%に下げることが出来る(ほぼ死滅に比べ)

よって、このGHG削減を
現在の技術水準を考えると、
あらゆる手段を導入して推進すべき

本シンポジウムの主題が「分散型」であることに着目して、
「分散型」でのGHG削減、**再生可能水素**についての議論を進める

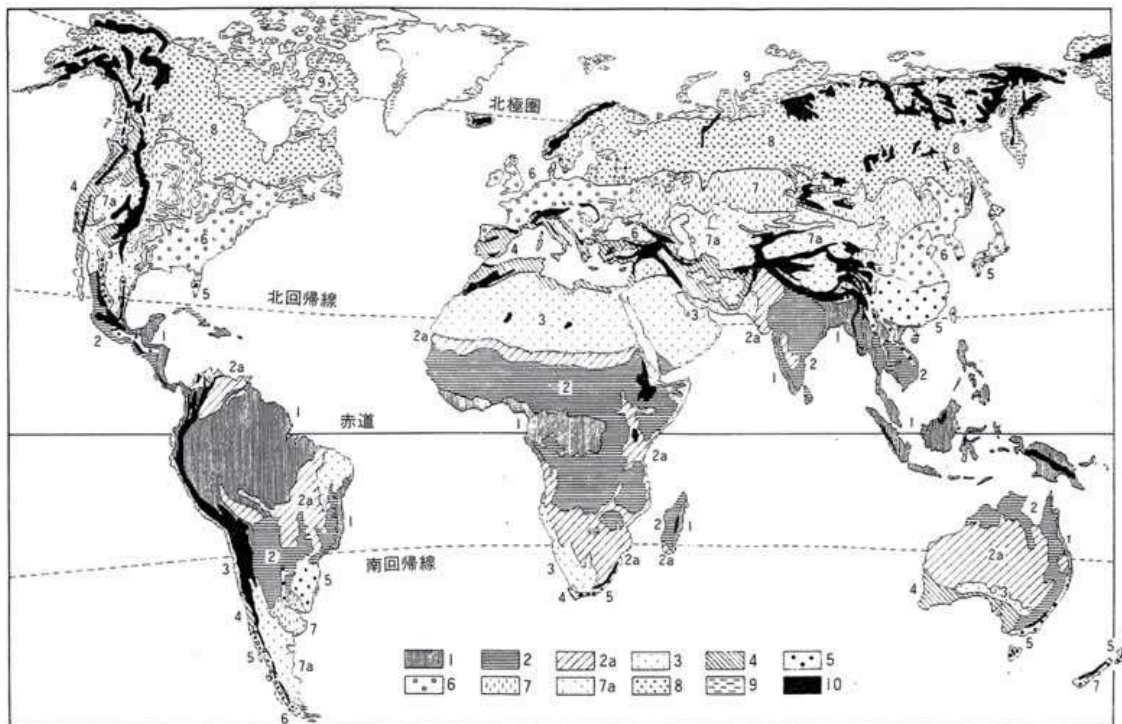
[1] IPCC Special Report (2018),
<https://www.ipcc.ch/2018/10/08/summary-for-policymakers-of-ipcc-special-report-on-global-warming-of-1-5c-approved-by-governments/>

気候変動対策を自然に学ぶとすれば？ (1)

地球上では光合成が“ほぼひとつだけの”エネルギー創生源

1. 生物界は光合成によるエネルギー生成を利用して炭素を循環
2. 植物はほぼ動かず同じ場所で一つのシステムとして生活している

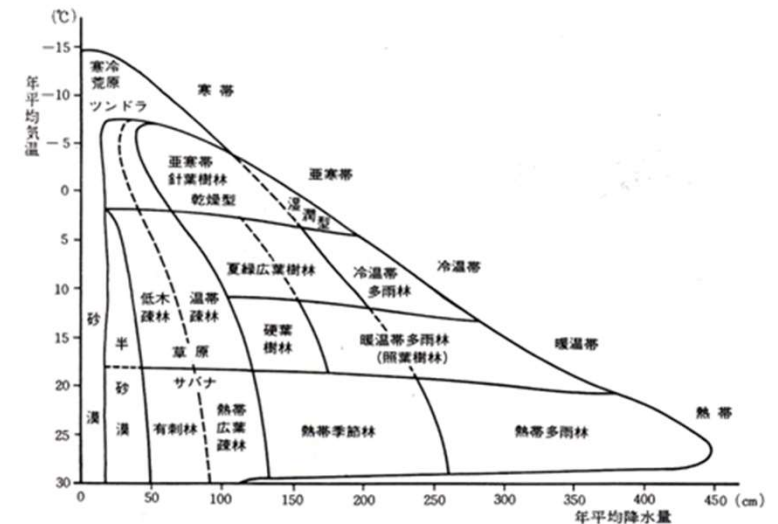
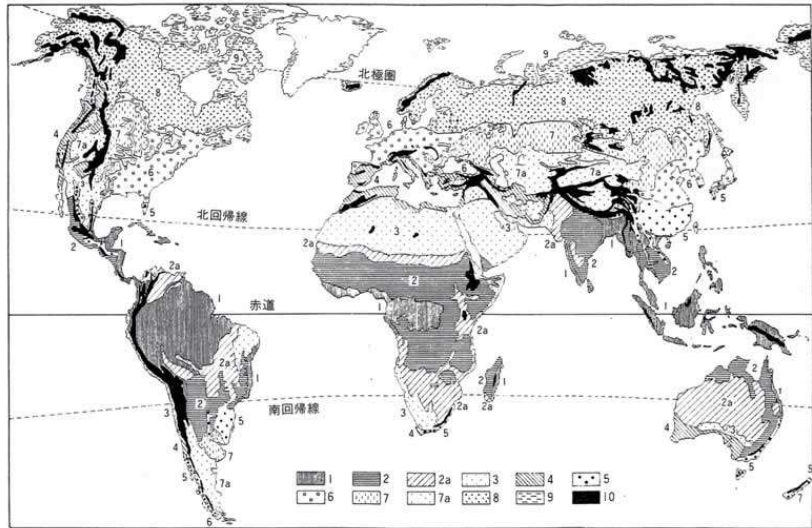
「植物」といっても多種多様、地域性が大きい:なぜ？



- 1: 熱帯多雨林
- 2: 熱帯・亜熱帯の半常緑樹林
- 2a: 熱帯・亜熱帯のサバンナ・低木林など
- 3: 熱帯・亜熱帯の砂漠・半砂漠
- 4: 冬雨地帯の半緑硬葉樹林
- 5: 暖温帯常緑広葉樹林
- 6: 冷温帯夏緑広葉樹林
- 7: 温帯草原(ステップ、プレーリー、パンパ)
- 7a: 寒冷な冬をもつ砂漠・半砂漠(チベットを含む)
- 8: 北半球の北方針葉樹林(タイガ)
- 9: ツンドラ
- 10: アルプスなどの高山植生

気候変動対策を自然に学ぶとすれば？ (2)

「植物」の地域性: 主に気温と平均降水量に関係



日本は、
常緑広葉樹林、夏緑広葉樹林
が主な群系

「植物」とは？

「植物」が持つ「光合成」の機能は？

- 1: 熱帯多雨林
- 2: 熱帯・亜熱帯の半常緑樹林
- 2a: 熱帯・亜熱帯のサバンナ・低木林など
- 3: 熱帯・亜熱帯の砂漠・半砂漠
- 4: 冬雨地帯の半緑硬葉樹林
- 5: 暖温帯常緑広葉樹林
- 6: 冷温帯夏緑広葉樹林
- 7: 温帯草原 (ステップ、プレーリー、パンパ)
- 7a: 寒冷な冬をもつ砂漠・半砂漠 (チベットを含む)
- 8: 北半球の北方針葉樹林 (タイガ)
- 9: ツンドラ
- 10: アルプスなどの高山植生

「光合成」を行う「植物」をシステムとして考えると...

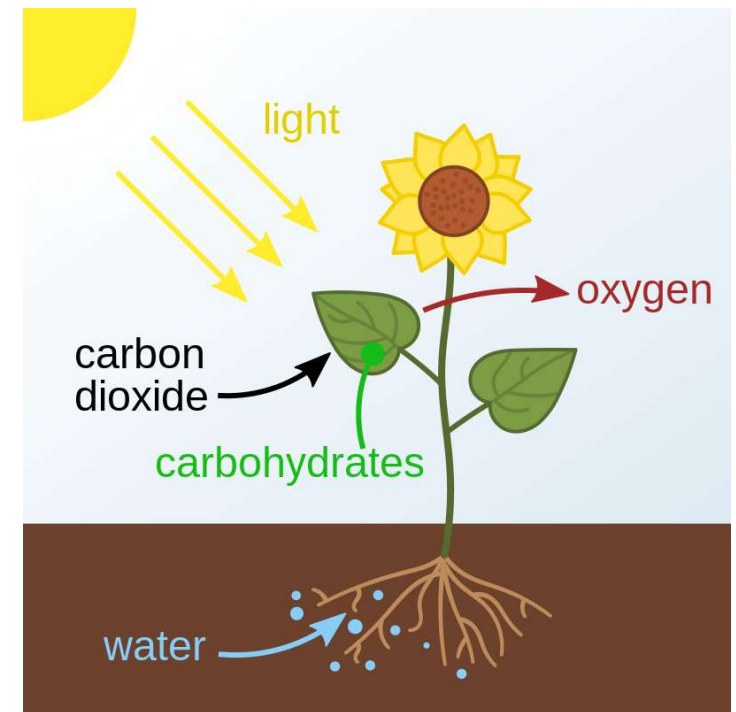
植物は、
根、葉、茎、花など各機関が独立して動いているように見える

とはいえ、「植物」はその状態を維持している

「植物」というシステム：
恒常性 = Homeostasis
を維持している

「光合成」は
維管束植物では葉で行われているに過ぎない

自然エネルギー利用を考える場合、「恒常性」は大切(？)

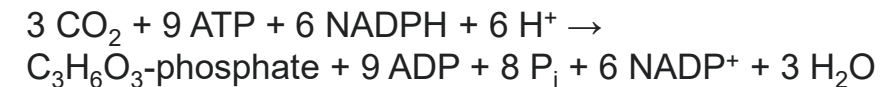
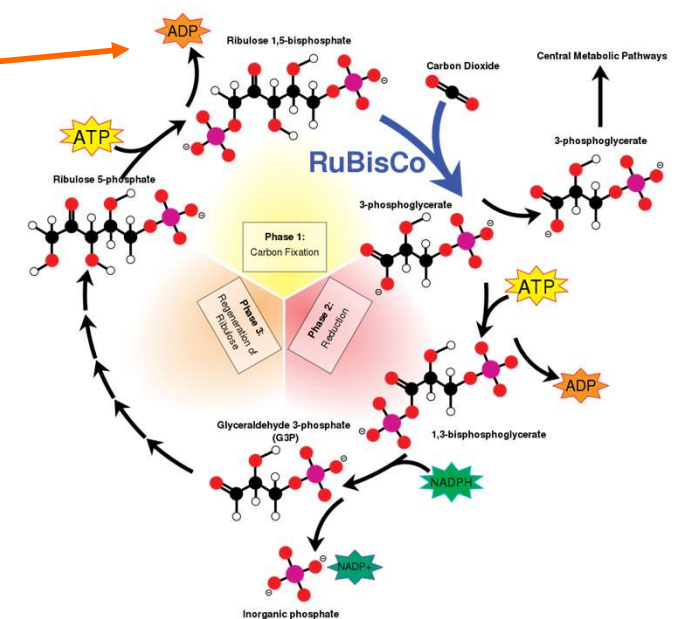
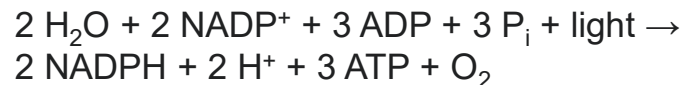
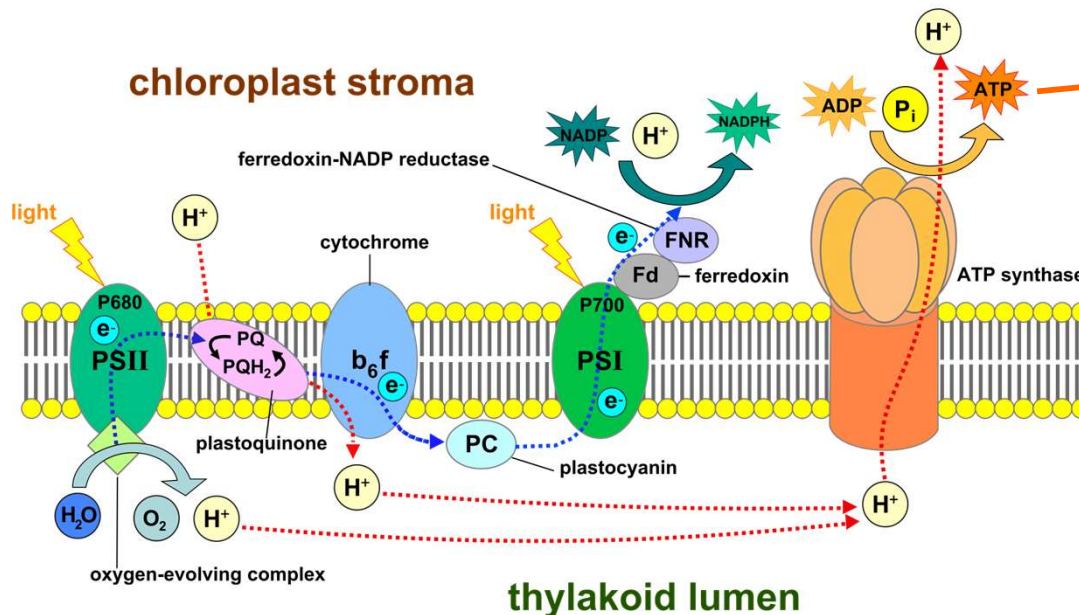


光合成: 光をエネルギーに変換するプロセス

光合成: 複雑なプロセスだが...

Photosystem I and II

Calvin Cycle (Carbon Fixation)

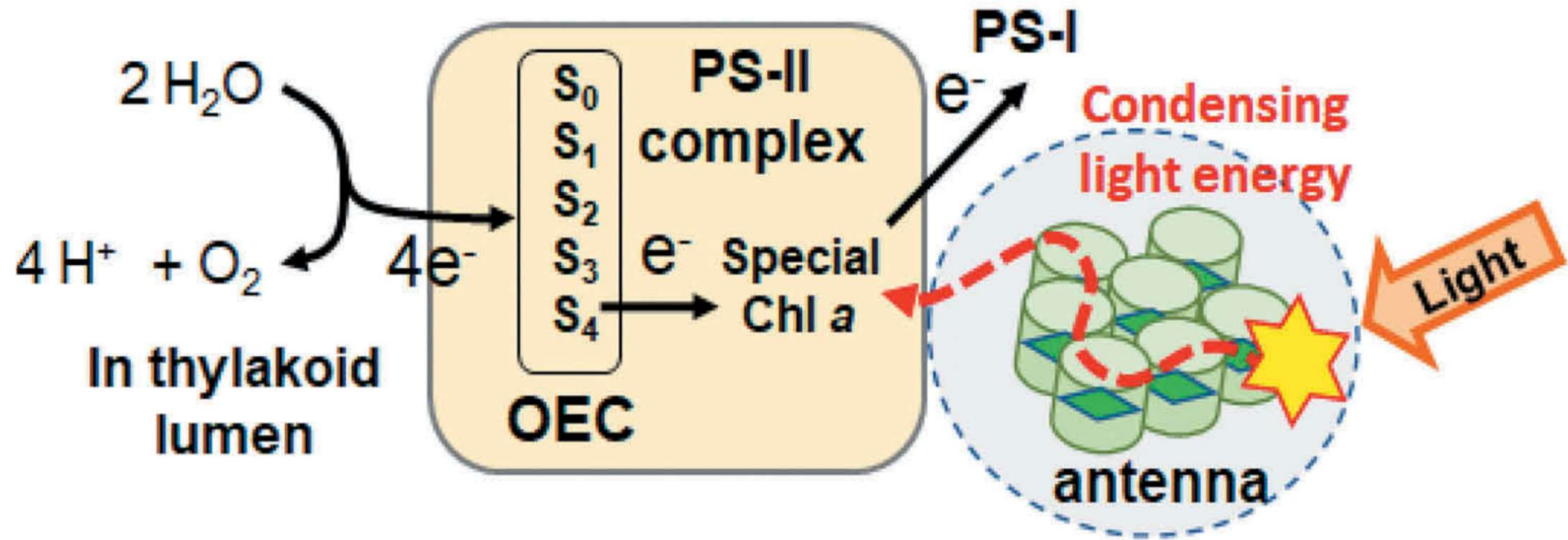


とはいえ、
植物が持つ「システム」としての機能までは模倣したい
まずは、この一部の模倣である水素(プロトンでなく)生成からはじめよう

光合成: 光化学系IIで行われるプロトン生成

プロトン生成までを詳しく見ると...

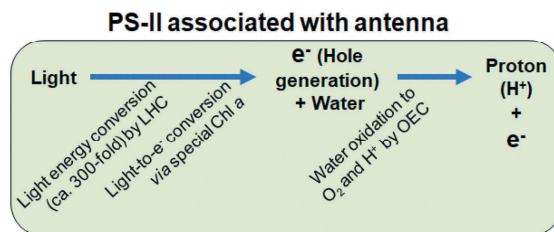
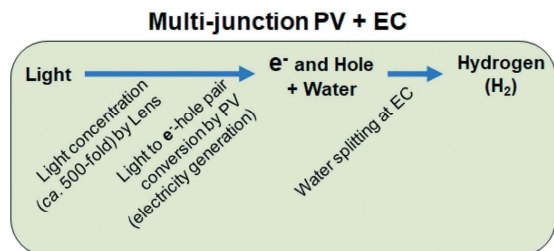
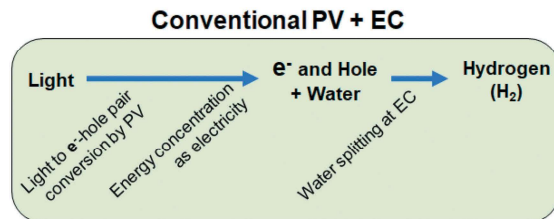
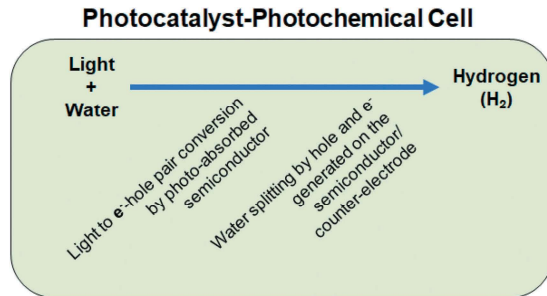
Photosystem II



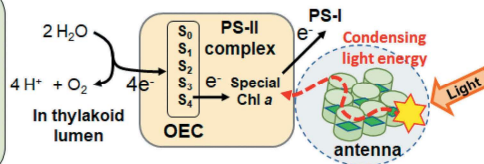
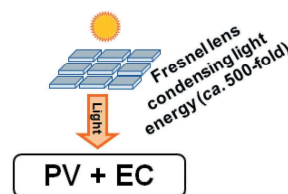
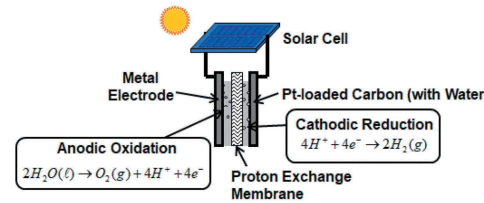
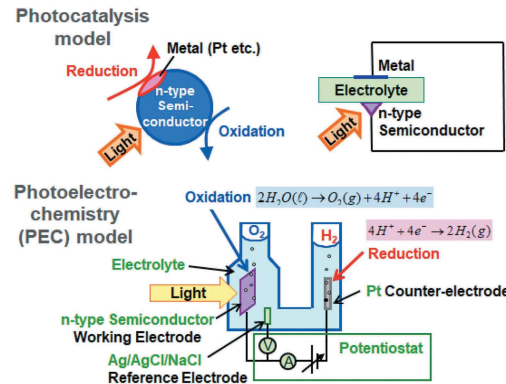
アンテナクロロフィルで光のエネルギーを集め、
スペシャルクロロフィルaにエネルギーを伝え、
ここで、水からプロトンと酸素を作る

光化学系IIと人工的な水素生成プロセス

光化学系II



人工的な水素生成



水素生成のプロセスは
光合成の「光化学系II」に近い
このプロセスと
人工的な水素生成の
比較を行ってみると...

PV+EC

(太陽電池＋水電解セル)が
最も「光化学系II」に近い

水素生成を用いた
植物に近いシステムを
考えるために、

1. 水電解セル
2. システムとその地域性を
考えてみる

1. はじめに

1. 気候変動対策と再生可能エネルギー
2. 植物と比較した再生可能エネルギー利用

2. 固体高分子型水電解セル(PEEC)の特性と応用

1. 燃料電池との違いと必要とされる特性
2. 性能向上に向けた方策
3. 水素を使いこなすには？システムの在り方

3. 分散型エネルギーの在り方と地域最適化

1. システムの基本制御だけでは...
2. 太陽電池を含めた創エネルギーの在り方(地域最適化)
3. さらに社会実装へ向けて

4. まとめ

改めて、燃料電池と何が異なるのか？

水電解セルと燃料電池

	水電解セル	燃料電池
原料	アノードに供給する水(液体)	アノード: 水素 カソード: 酸素 (気体)
生成物	アノード: 酸素 カソード: 水素 (液体)	アノードから出てくる水(液体)
電力 (/cell)	供給が必要 (不均一性: 問題) 反応励起のため高電圧 ~2.0 V	自ら発電 (不均一性: 問題少) 発電のため低電圧 ~0.8 V

水電解セルは電解を起こすために反応を行う電極面全体への電力供給が均一であり、かつ、液体の原料(水)も均一に供給される必要がある
また材料にかかる電圧も大きく、溶解等の問題が大きい
➔ 水電解のほうが均一性に厳しい可能性が高い

さらに水電解自体に着目してみる: その種類と特性

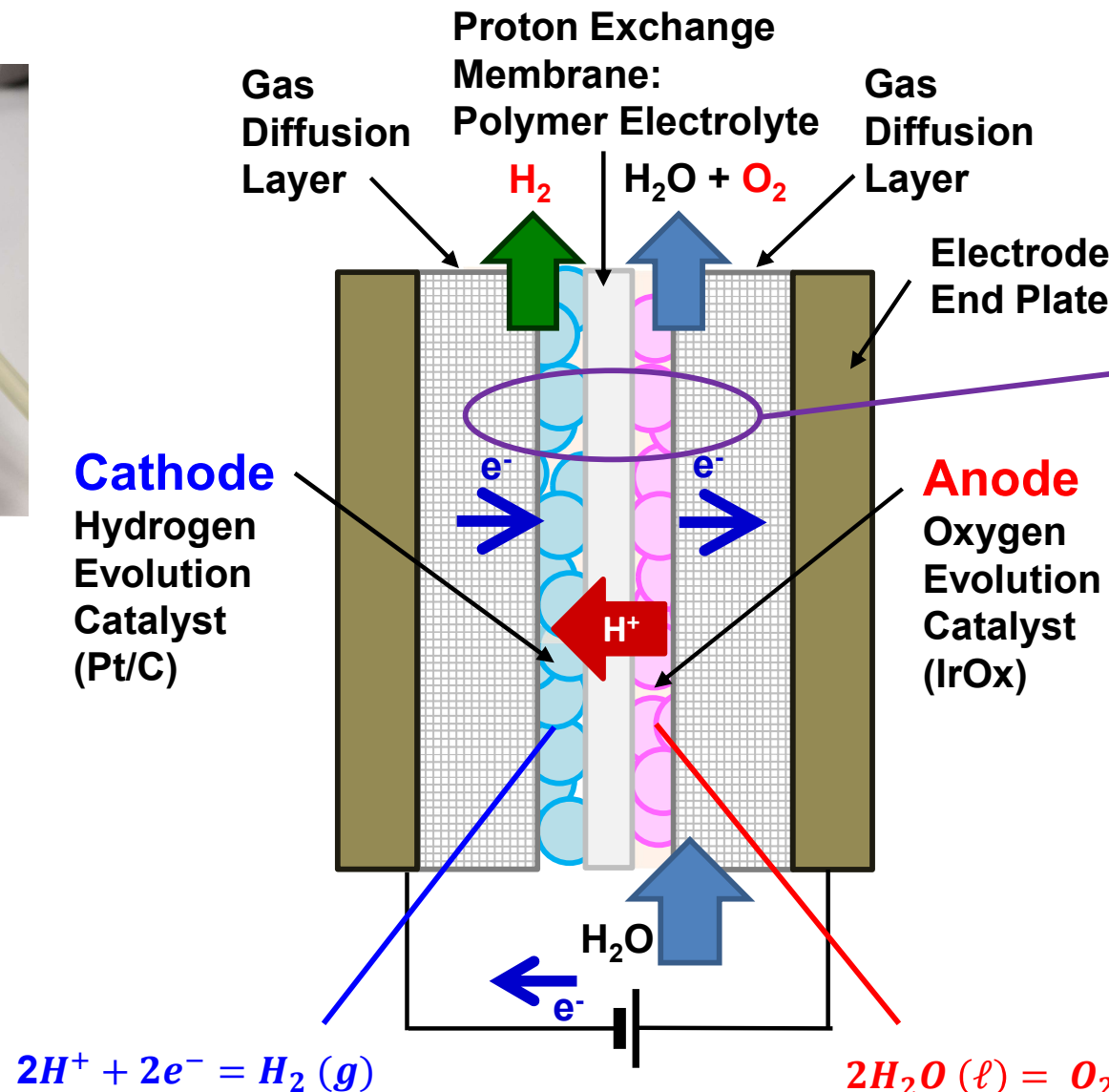
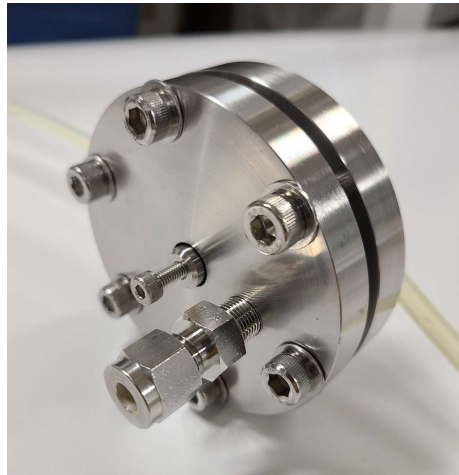
水電解方法の種類とその特性

Electrolysis	Source Materials	Cathode	Anode	Electrolyte
High Temperature	Water vapor	NiZrOx	Ni, SrTiO ₃	Solid oxide Y ₂ O ₃ , ZrO ₂
Alkaline	Alkaline solution	Fe-Ni	Ni, Fe, Ni-Co	Alkaline solution
Polymer Electrolyte	Pure liquid water	Pt (on C)	IrOx	Polymer electrolyte

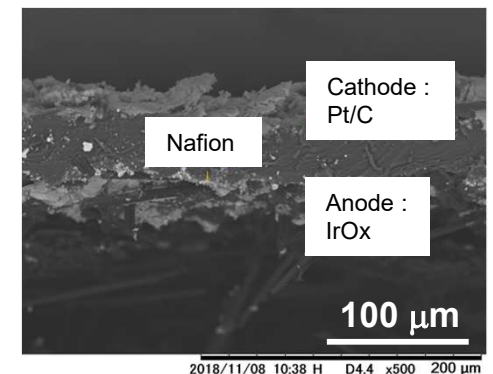
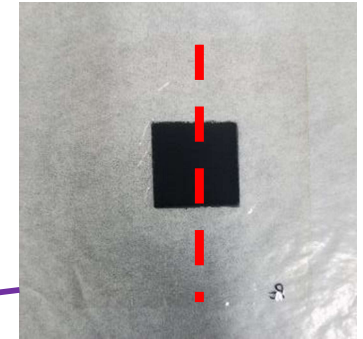
自然エネルギー源は(ある程度貯蔵が可能とはいえ)変動する
 変動に強く安全な物質で構成される
 固体高分子型水電解セル(PEEC)が再生可能エネルギー用途に適している

固体高分子型水電解セル: デバイス構成

固体高分子型水電解セル (PEEC)



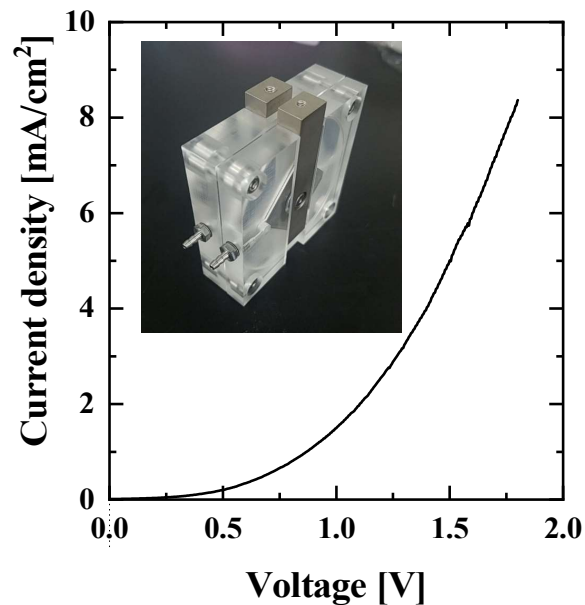
Membrane Electrode Assembly (MEA)



固体高分子型水電解セル:何も考えずに作ると...

固体高分子型水電解セル(PEEC)初期試作

燃料電池の模倣で作製した場合



~10 mA/cm²

@ 1.8 V, RT

Electrode: 22.4 x 22.4 mm (5 cm²)

Anode: SA100 Ir 1mg/cm²

Cathode: TEC10E50E 1 mg/cm²

	水電解セル	燃料電池
原料	アノードに供給する水 (液体)	アノード: 水素 カソード: 酸素 (気体)
生成物	アノード: 酸素 カソード: 水素 (液体)	アノードから出てくる水 (液体)
電力	供給が必要 (不均一性: 問題)	水から発電 (不均一性: 問題少)

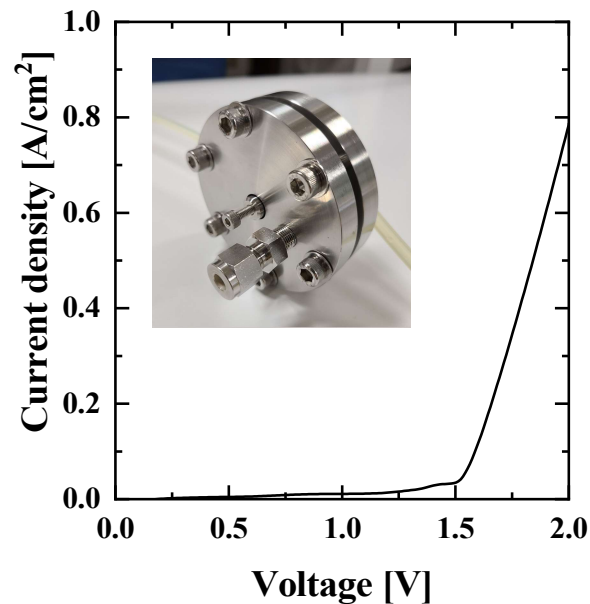
この違いがセル構造と特性に大きく影響していそう

固体高分子型水電解セル:セル構成部材の見直し

固体高分子型水電解セル(PEEC)構造最適化

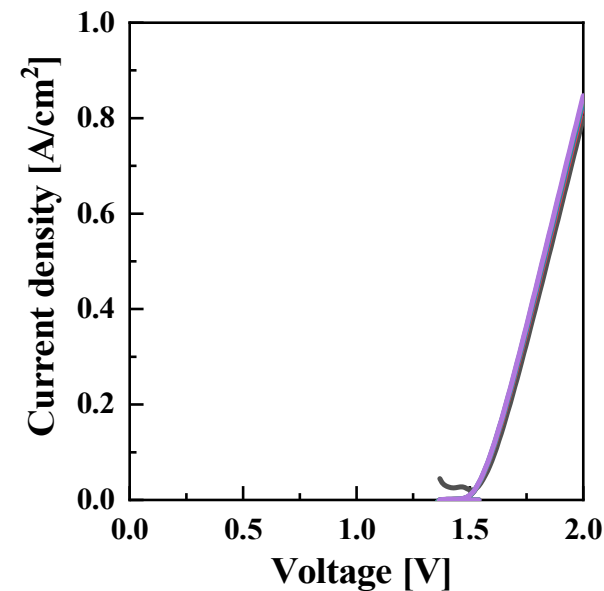
電極面積 **5 cm²**
RT

量産化検討セル



電極への均一な機械的的圧力が
印可可能な構造へ変更

量産化検討セル
内部構造変更



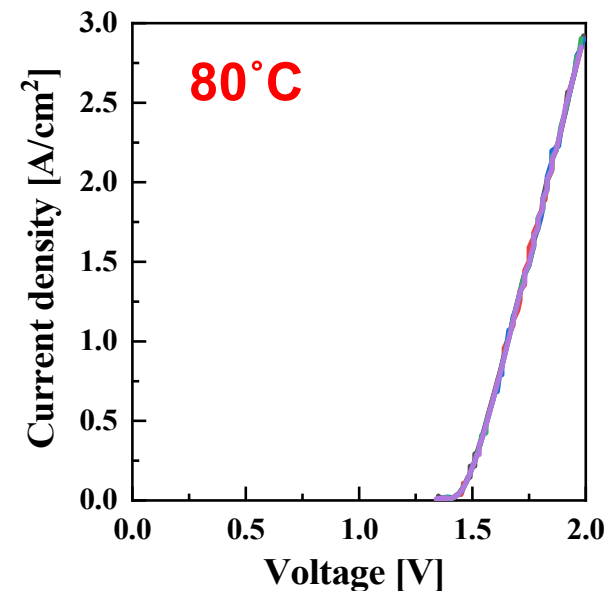
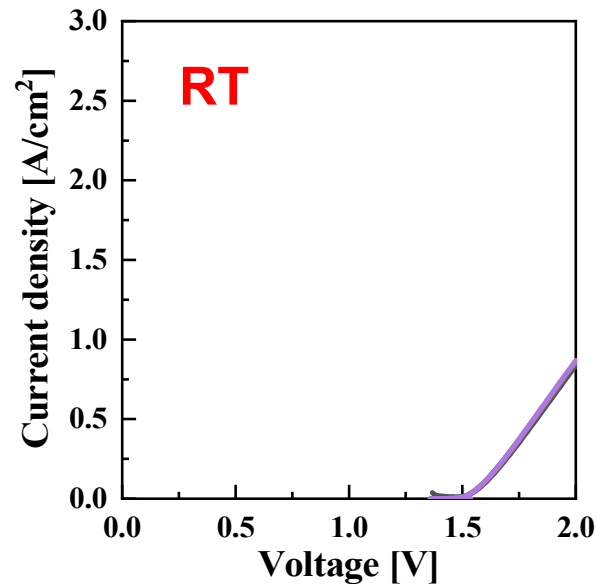
原料・生成物通過しやすい構造
自作MEA(純水1回洗浄)

固体高分子型水電解セル:温度依存性

固体高分子型水電解セル(PEEC)温度依存性

電極面積 **5 cm²**

量産化検討セル
内部構造変更



原料・生成物通過しやすい構造
自作MEA(純水2回洗浄)

動作温度を80°Cにすることで特性大きく向上
(温度依存性が大きい)
一方、システム内で80°C保持は可能か？

イオン交換当量が高いイオン交換膜を使うと性能はさらに向上する

固体高分子型水電解セルは出来た: システム？

植物のシステムの考え方

植物はシステムとして恒常性を有する

すなわち、外乱がある場合も、内的環境を一定にするため、「負のフィードバック」をかけている



人工的なシステムの考え方

エネルギーは外乱に対して強固である必要があるため、

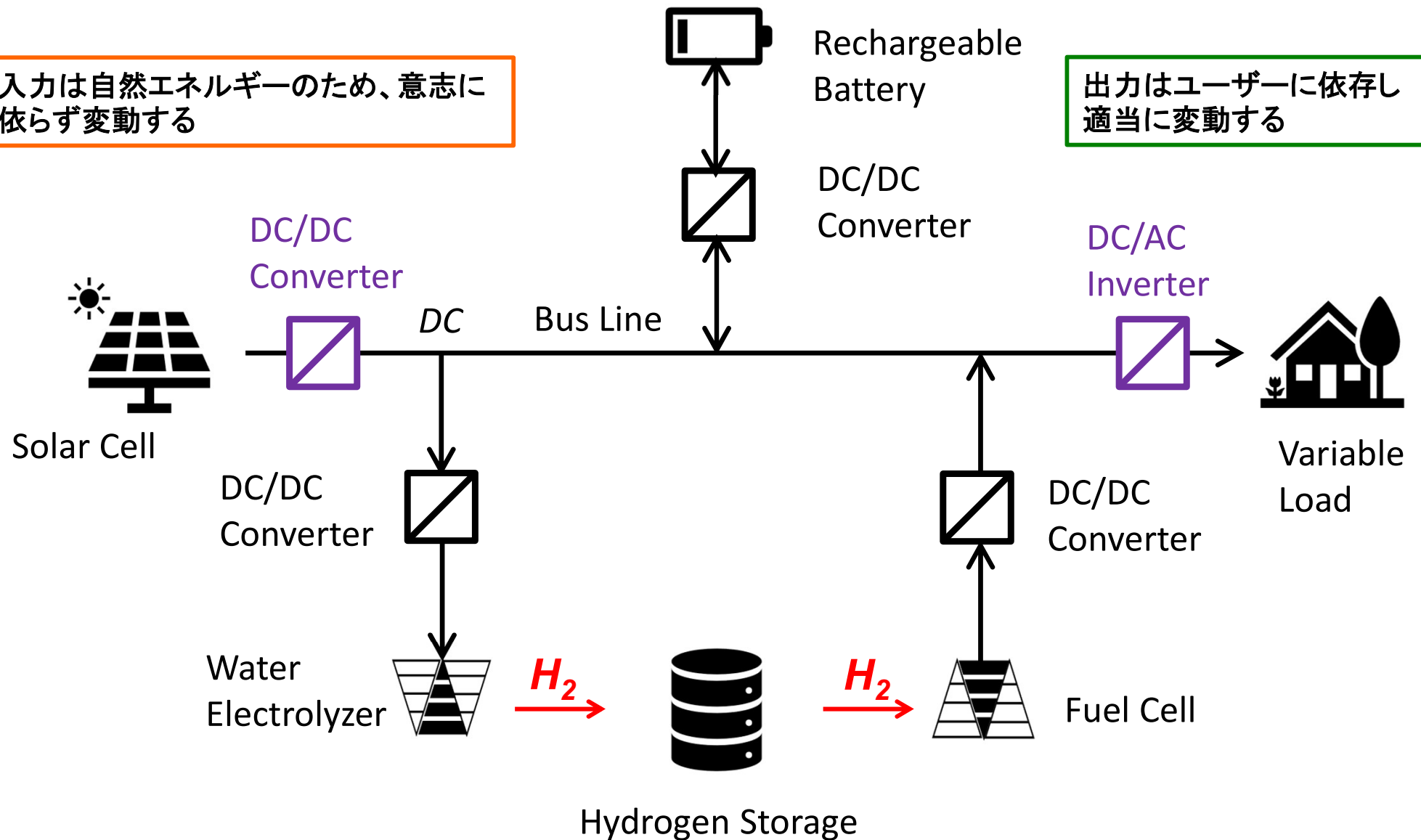
エネルギーシステムも恒常性が必要ではないか？

= 比較的単純な制御、かつ、外乱に対して定常性を有する
制御的に言うと「一次遅れ系」

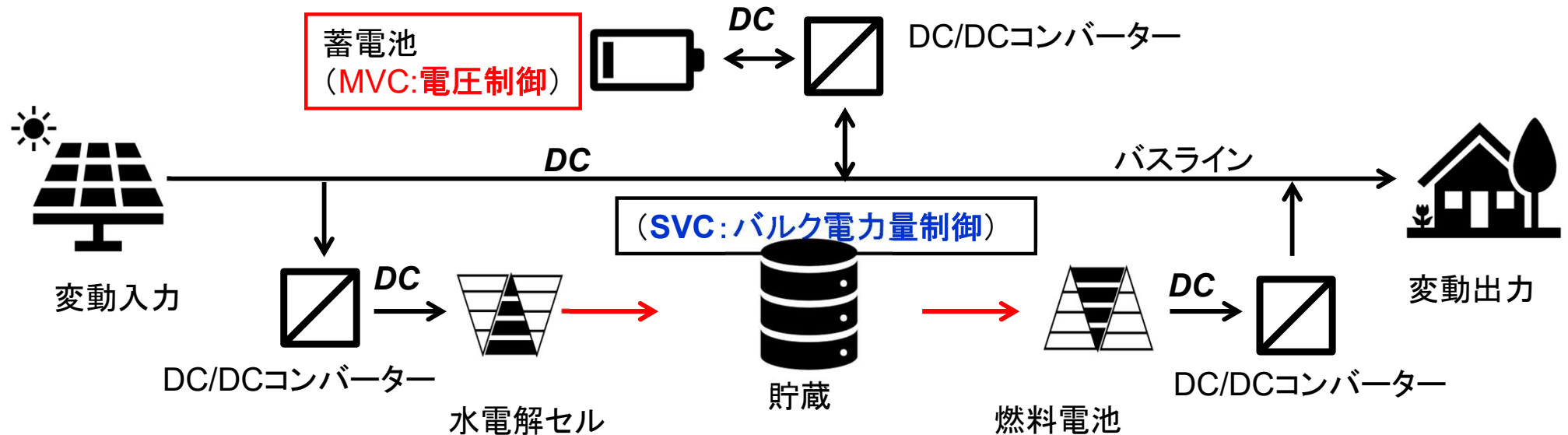
電力供給システムとしてこれを考えてみる

分散設置可能なエネルギーシステム

入力は自然エネルギーのため、意志に
依らず変動する

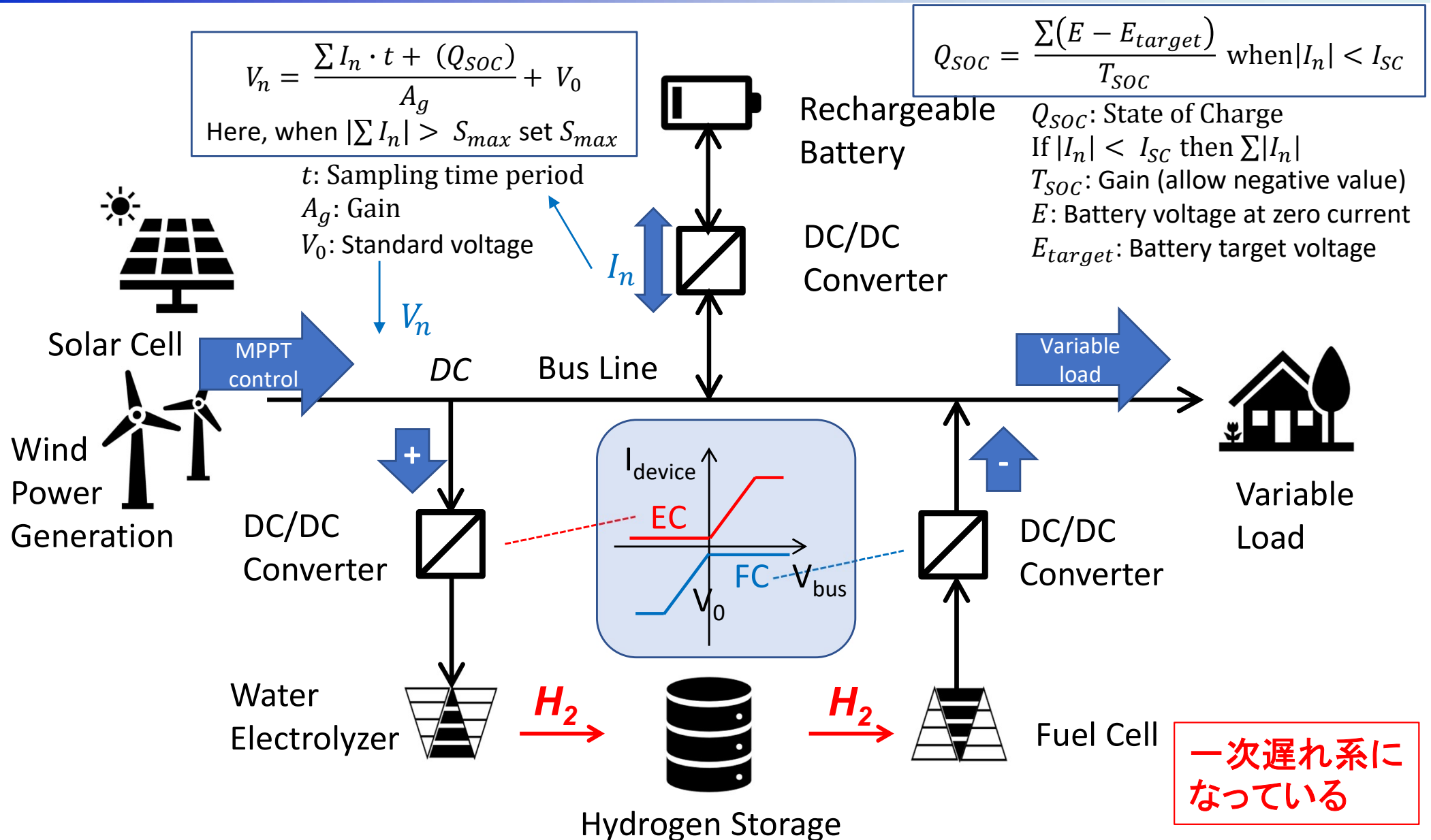


植物の恒常性を模倣したエネルギーシステム



- Main Voltage Controller (MVC) 主電力制御装置
- 入出力のバランスの変化に対して初期はバッテリーの電流入出力で対応（化学反応が関係するため応答が遅い）他の装置の応答を緩和する
- 入出力バランスと同時に電流入出力に応じてバス電圧を増減させる
- Sub Voltage Controller (SVC) 従電力制御装置
- バス電圧の変化を介して他の装置が動作（基本的に通信装置が不要）
 - 各コンバータの動作に必要な情報は、各コンバータが自力で取得できる
- バス電圧を介して充放電する機器の追加・削減を、柔軟に行う事が出来る

システム電力制御の数式表現

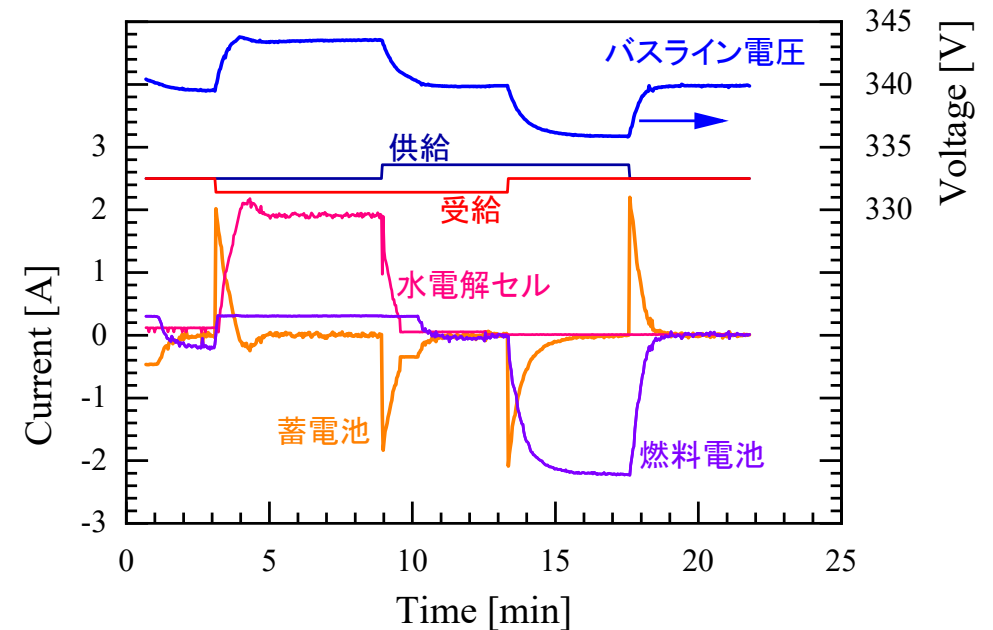


エネルギーシステムの動作

- 約2 kW出力可能なシステム動作



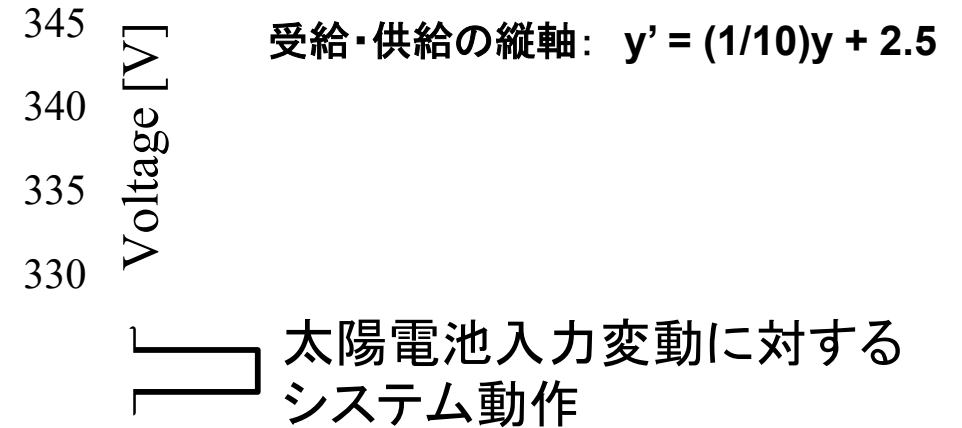
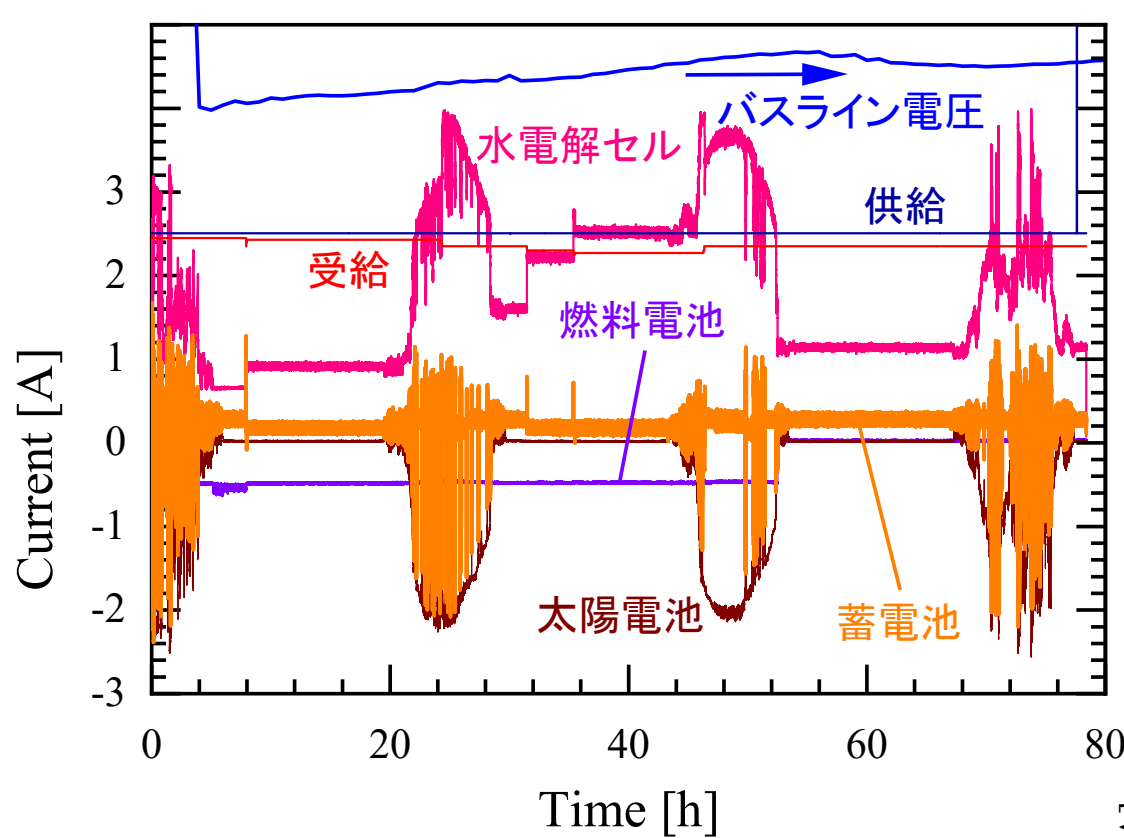
システムへの入力電流を“-”、
システムからの出力電流を“+”



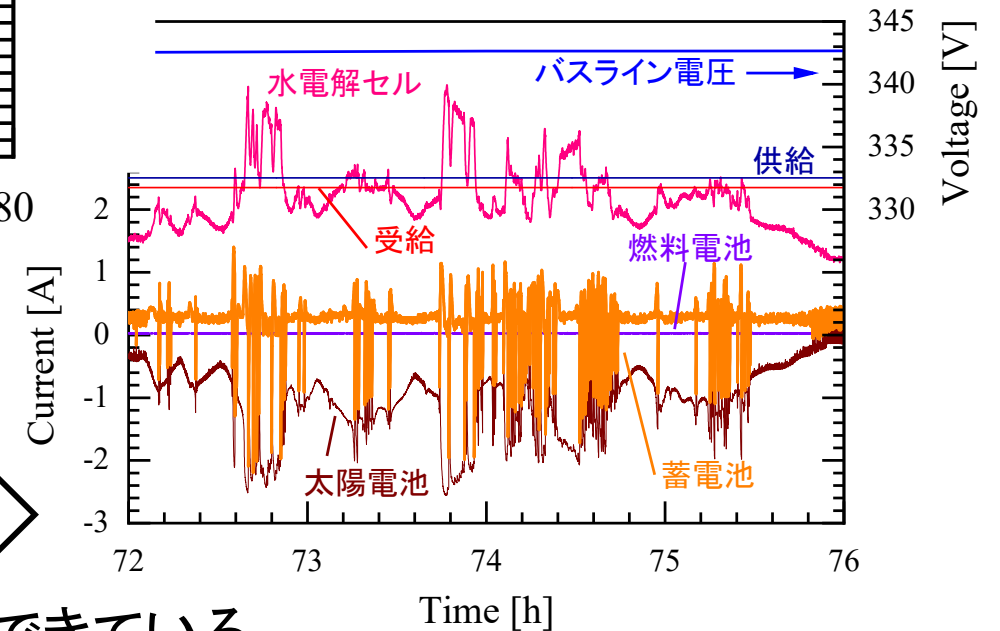
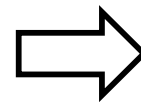
受給・供給の縦軸: $y' = (1/10)y + 2.5$

- 制御時定数を大きくしても正常に動作（水電解セルや燃料電池保護）
 - バッテリが急激な変化を吸収
 - その後に燃料電池や水電解セルが動作を開始

エネルギーシステムの太陽電池下の長時間動作



太陽電池入力が大きく変動している
時間帯の拡大



長時間安定動作が確認できている

1. はじめに

1. 気候変動対策と再生可能エネルギー
2. 植物と比較した再生可能エネルギー利用

2. 固体高分子型水電解セル(PEEC)の特性と応用

1. 燃料電池との違いと必要とされる特性
2. 性能向上に向けた方策
3. 水素を使いこなすには？システムの在り方

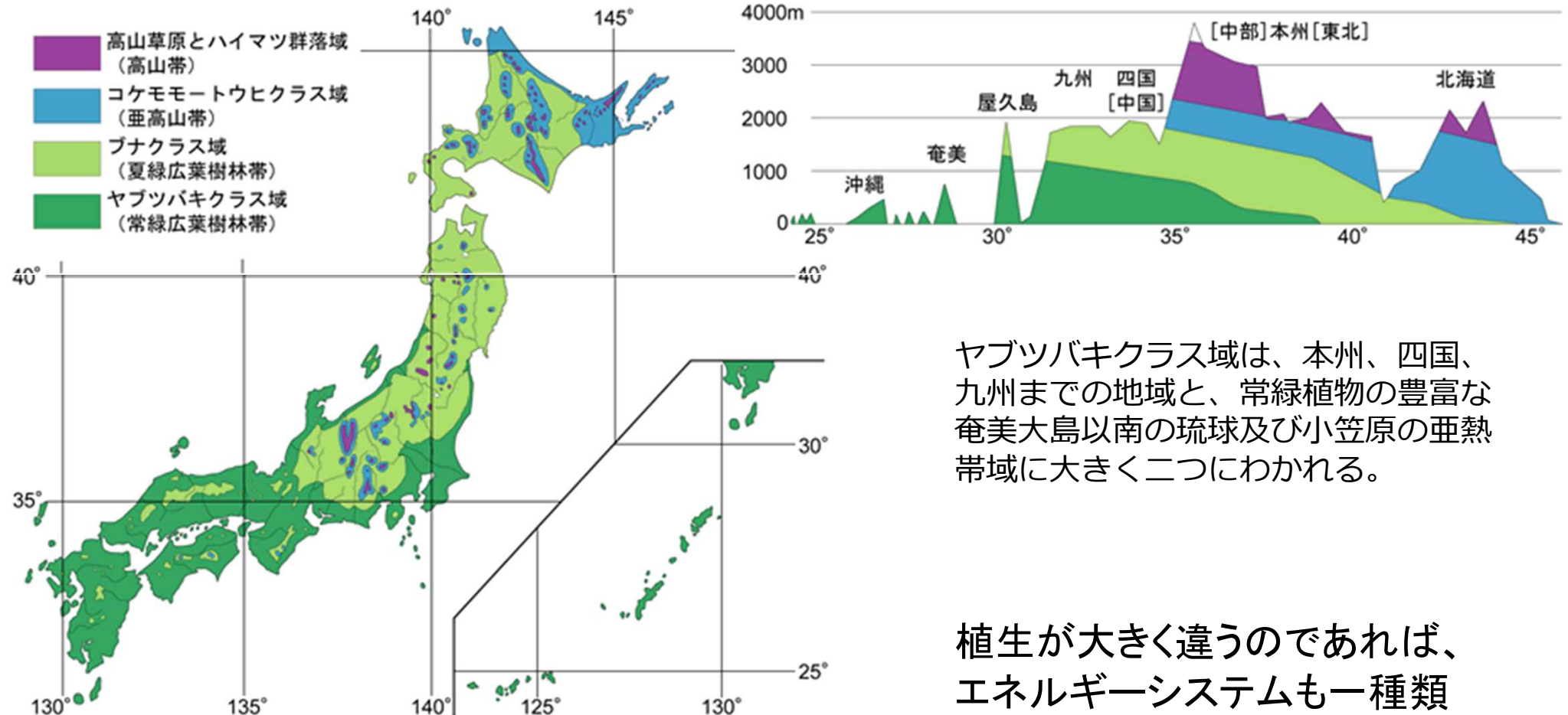
3. 分散型エネルギーの在り方と地域最適化

1. システムの基本制御だけでは...
2. 太陽電池を含めた創エネルギーの在り方(地域最適化)
3. さらに社会実装へ向けて

4. まとめ

システムは一種類でよいのか？：植物の分布と種類

日本の植生



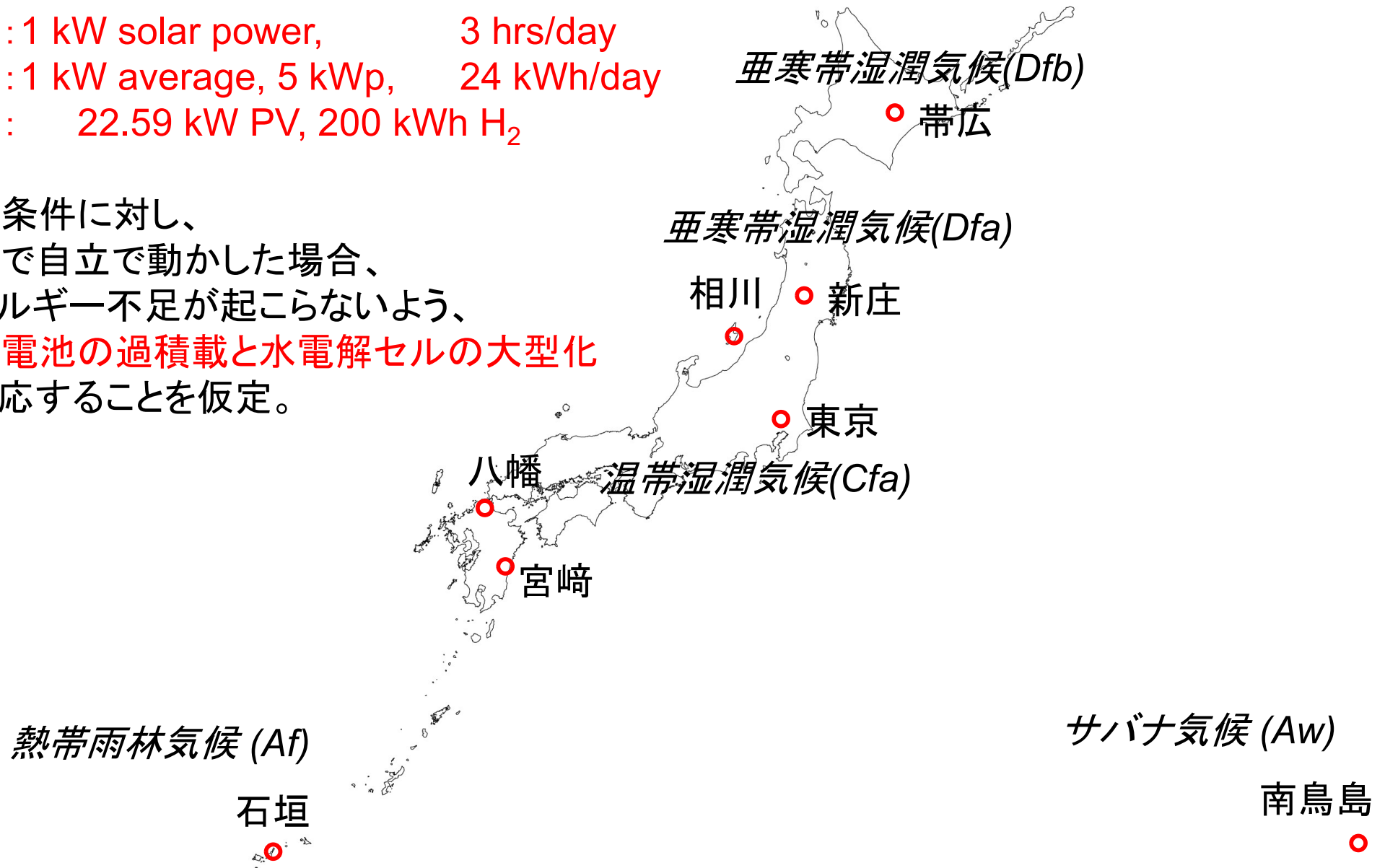
ヤブツバキクラス域は、本州、四国、九州までの地域と、常緑植物の豊富な奄美大島以南の琉球及び小笠原の亜熱帯域に大きく二つに分かれる。

植生が大きく違うのであれば、エネルギーシステムも一種類ではないはず。

日本の気候分布とシステム最適化

入力: 1 kW solar power, 3 hrs/day
 出力: 1 kW average, 5 kWp, 24 kWh/day
 標準: 22.59 kW PV, 200 kWh H₂

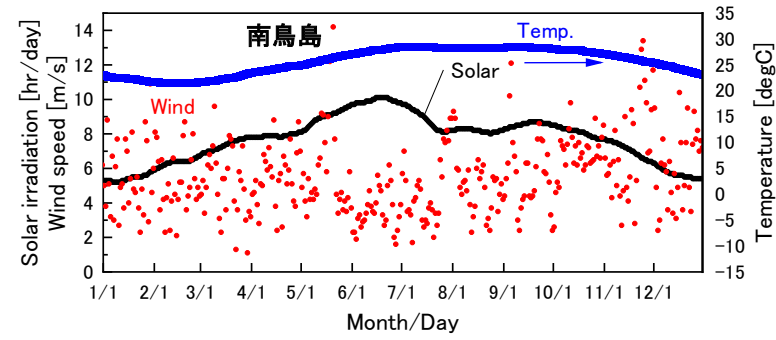
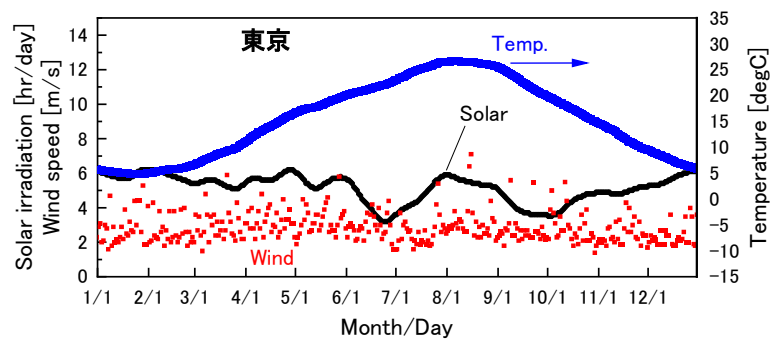
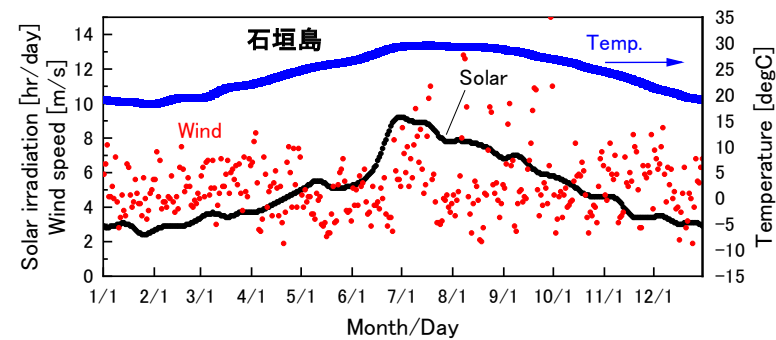
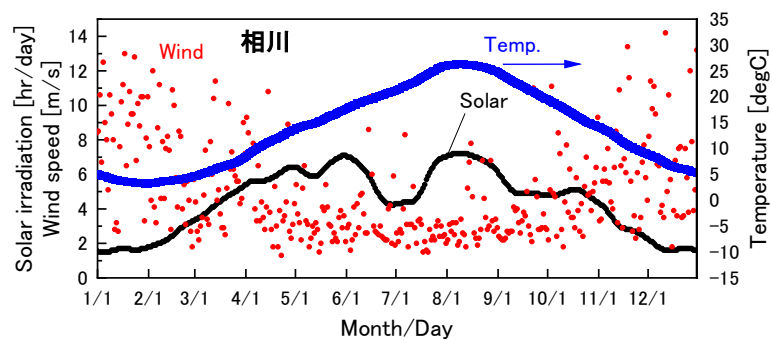
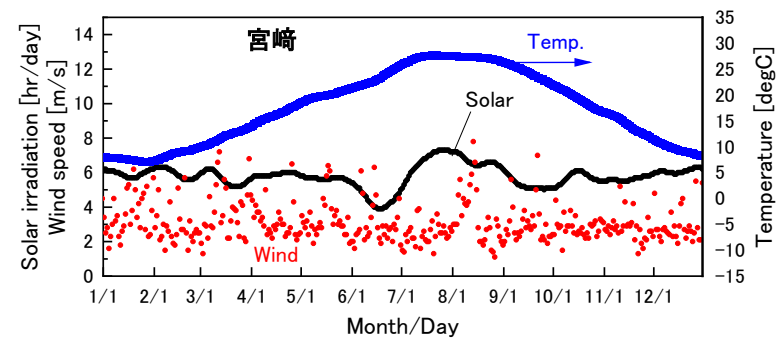
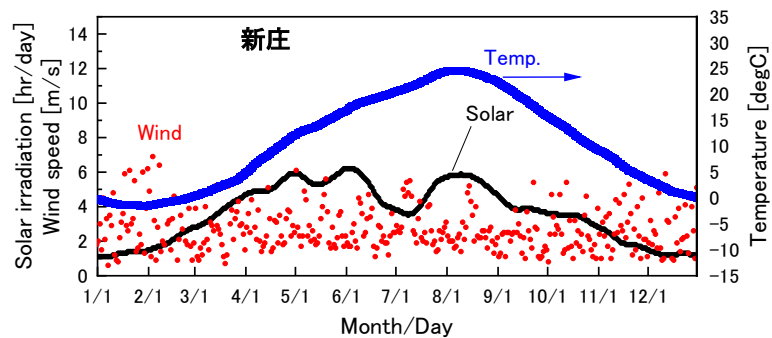
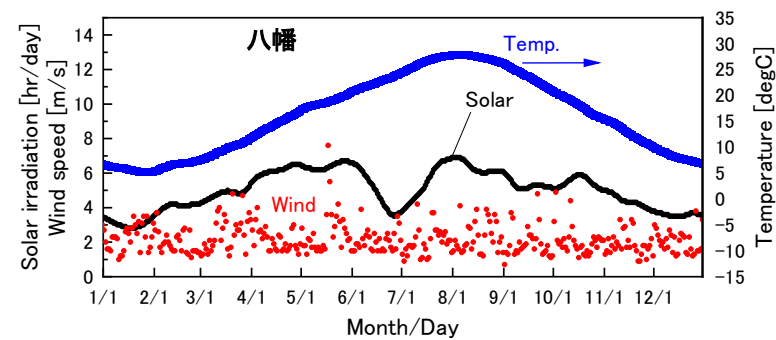
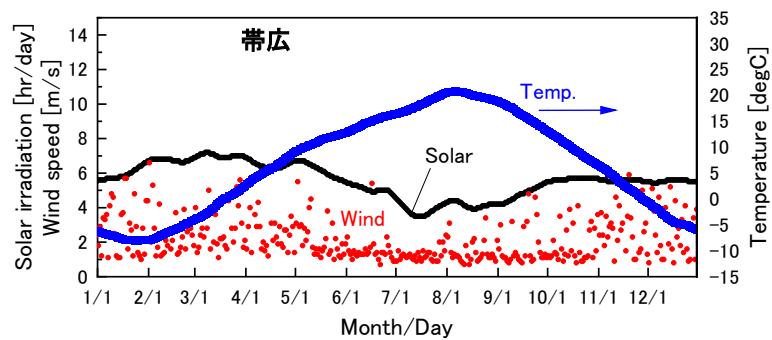
標準条件に対し、
 各地で自立で動かした場合、
 エネルギー不足が起こらないよう、
太陽電池の過積載と水電解セルの大型化
 で対応することを仮定。



気象条件

日射
温度
風力

[1] K. Fujii et al.,
J. Jpn. Inst. Energy 100 (2021) 46.



風力は2019
他は1980-2000平均

システム

毎日の発電量

風力あり

風力なし

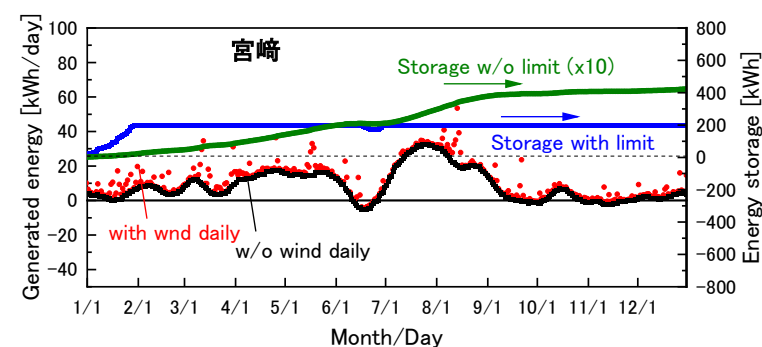
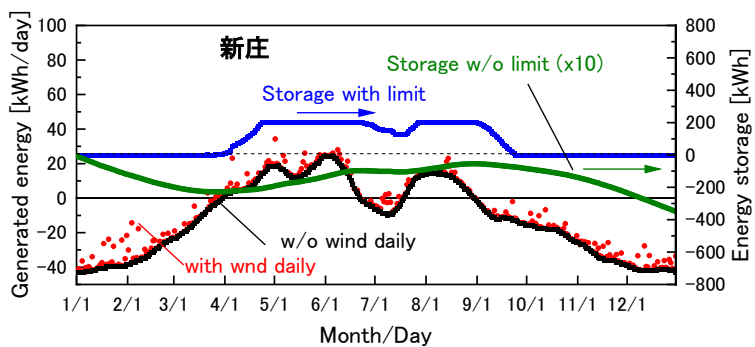
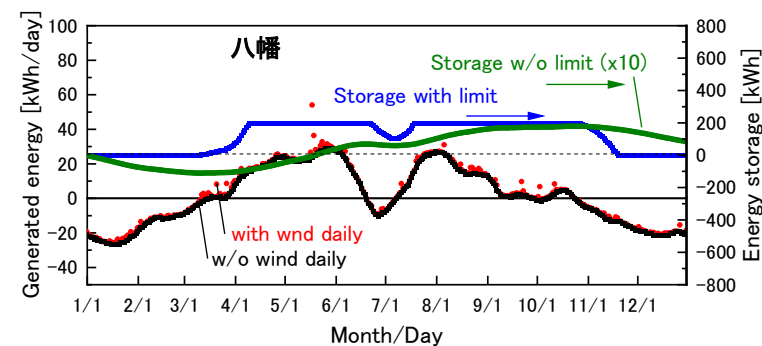
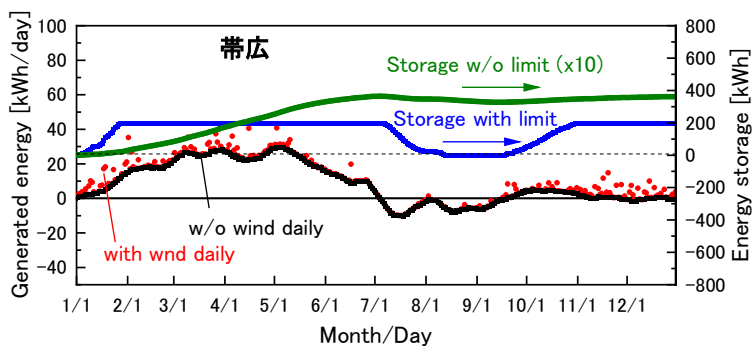
エネルギー

貯蔵量

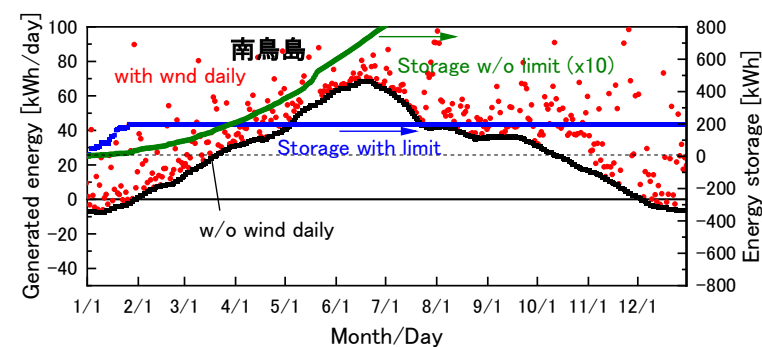
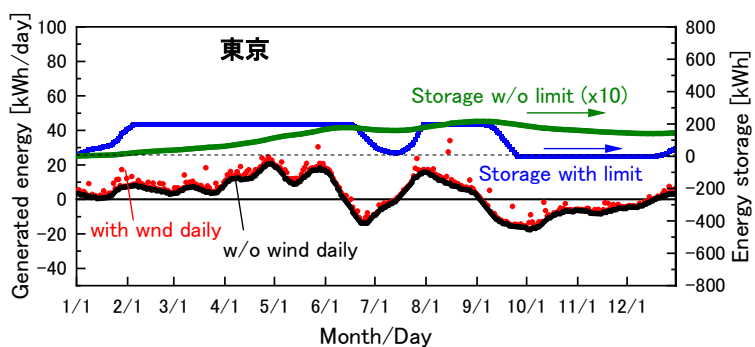
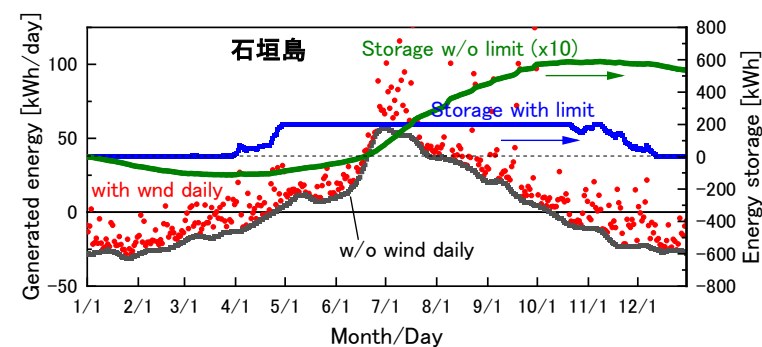
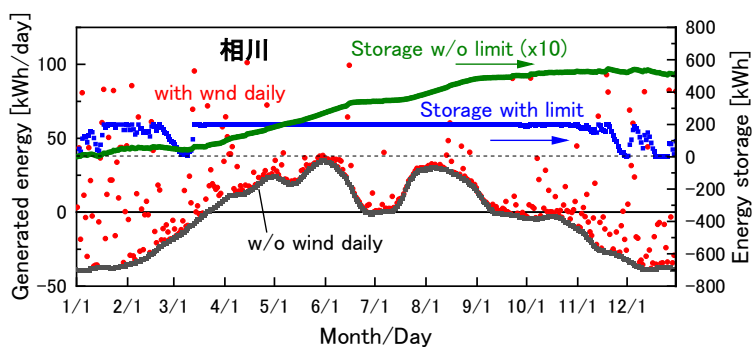
上限あり

上限なし

各地の条件に
最適化後



[1] K. Fujii et al.,
J. Jpn. Inst. Energy 100 (2021) 46.



地域最適化: エネルギー貯蔵量推定

標準条件: 入力: 1 kW solar power,

3 hrs/day

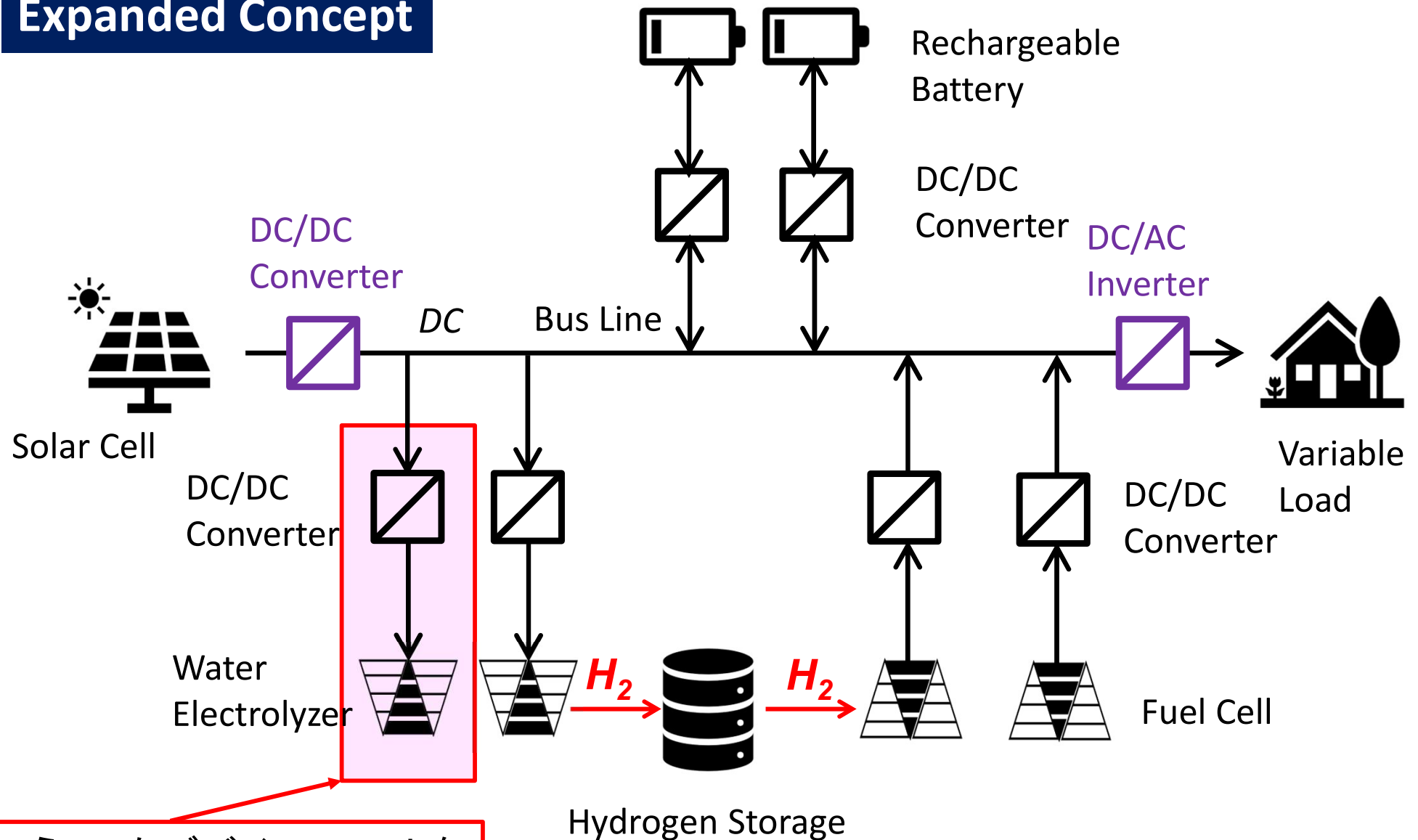
充足条件: 出力: 1 kW average, 5 kWp,

24 kWh/day

Place	Solar cell [kW]	Hydrogen [kWh]	Comment compared with standard
Standard	22.59	200	
Obihiro	24.00	200	Almost standard condition
Shinjo	60.00	1000	Hydrogen storage enlargement required
Aikawa	30.00	200	Wind power in winter being effective
Tokyo	30.00	200	Wind power being less effective
Yahata	50.00	200	Wind power being less effective
Miyazaki	22.59	200	Exact standard condition
Ishigaki is.	40.00	200	Wind power being effective, energy surplus in summer
Minamitori Is.	20.00	50	Smaller values than standard condition

地域最適化のために: システムユニット化を考えよう

Expanded Concept



こういったデバイスユニットを
単位として考えていく！



1. はじめに

1. 気候変動対策と再生可能エネルギー
2. 植物と比較した再生可能エネルギー利用

2. 固体高分子型水電解セル(PEEC)の特性と応用

1. 燃料電池との違いと必要とされる特性
2. 性能向上に向けた方策
3. 水素を使いこなすには？システムの在り方

3. 分散型エネルギーの在り方と地域最適化

1. システムの基本制御だけでは...
2. 太陽電池を含めた創エネルギーの在り方(地域最適化)
3. さらに社会実装へ向けて

4. まとめ

まとめ

1. 自然エネルギー利用を考える際に、自然を倣うことは価値がある。
2. 自然エネルギー利用にはエネルギー貯蔵技術（電気化学的水分解による水素生成や二酸化炭素還元）が必須であるが、その技術は十分に確立されるまでは至っていない。ここではこのうち固体高分子型水電解セルを用いた水素生成に関して議論した。
3. エネルギー・システムとして、太陽光を利用したユーザー・オン・デマンドのシステムとしての考え方を紹介した。比較的単純な考え方で恒常性を実現することが可能である。
4. 利用可能な自然エネルギーは地域により大きく異なり、かつ、エネルギー供給システムは利用者のエネルギー利用特性にも左右される。結果、太陽電池と比べても、エネルギーシステムの地域依存性は大きい。

さらなる将来を見据えて:二酸化炭素還元と食料製造

人類が生活していくには...
エネルギーの生成だけでは十分ではない

衣食住、すべてにおいて、
ここで議論したような循環型社会を実現する必要がある

そのためには...、
二酸化炭素還元:種々のケミカル製品を作ることが出来そう

→ 衣と住に関連

窒素固定:農業に使うことが出来そう

→ 食に関連

生物を使う? 非生物?

今後に期待!

