

第1回—第6回

# クリーンエネルギー学

## 自然に求める未来のエネルギー

「クリーンエネルギー学」および「エネルギー物質理工学」  
中部大学大学院創成エネルギー理工学・客員教授 田中基彦  
2015-2023年度(前期, 後期)

# 2023年度 講義予定

## 前期(4月-7月) 「**グリーンエネルギー学**」

再生可能エネルギーである「風力, 水力, 太陽電池」  
なぜ自然エネルギーが必要なのか？

→ 化石燃料, 燃料電池車(地下の水素)は有限  
種々の太陽電池 (様々なタイプがある)

無機太陽電池: 結晶/薄膜シリコンの太陽電池

II-VI族, III-V族を組み合わせた太陽電池

有望である「有機太陽電池」: 「ペロブスカイト」を使う  
遷移金属酸化物を使い, **良い太陽電池を作れる**

---

## 後期(9月-翌1月) 「**エネルギー物質工学**」

太陽電池の基礎である「**固体物理学入門**」

“Introduction to Solid State Physics (C.Kittel)” 日本語で。

# 大学院講義春学期

第1, 2回 はじめに, 自然に求める未来のエネルギー

第3回 太陽電池の現状と未来

第4, 5回 再生可能エネルギー第1位の「風力発電」

概論, ヨーロッパ・日本の様子

第6回 「近い未来のエネルギー」

第7回－第11回 シリコン太陽電池

シリコン太陽電池, II-VI族, III-V族太陽電池

第12回 有機物質太陽電池

第13回－第15回 ペロブスカイト太陽電池 (英語で輪講)

英文読解の解説(PDF) どう読めばよいか?

## 講義の資料

- 講義で使う資料は、PDFで準備。前日までにEmailで。
- 資料はプリンターなどで出力して、講義において使う

## 固体物理学入門(後期)

第1章 結晶構造 pp.1-23

第2章 波の回折と逆格子 pp.24-36まで

第3章 結晶構造と弾性定数 pp.52-79

弾性ひずみの解析 pp.80-96はスキップ

第4, 5章 フォノンI,II:

結晶の振動, 熱的性質 pp.97-139

第6章 自由電子フェルミ気体 pp.140-168

第7章 エネルギーバンド pp.171-194

第8章 半導体 pp.196-230

## Zoom講義の始めかた

- この講義は、Zoom機能を使う遠隔授業で行います。
- 授業の5分前に、受講者はパソコンのブラウザを起動してミーティングIDと自分の名前を入力します。
- 受講者で質問があるときは、[参加者に自分のミュート解除を許可]にするので、質問ができます。

# 私の研究と大学院教育について



# 高温プラズマとイオン性ソフトマター

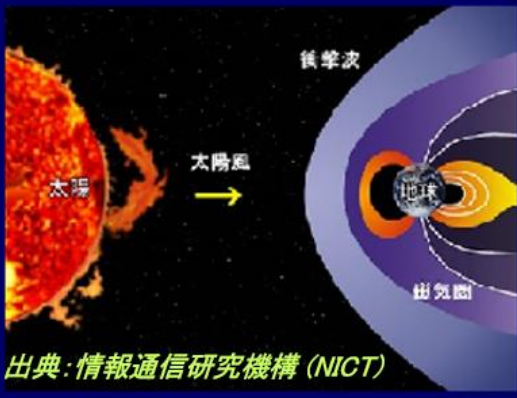
どちらも電荷をもつ多体粒子系

けけい

## (1) 高温プラズマ 古典系

クーロンエネルギー << 熱エネルギー

デバイ遮蔽が本質的



星間プラズマ (Crab nebula)  
太陽風プラズマ  
惑星磁気圏  
雷, グロー放電  
実験室・核融合プラズマ

気体

熱エネルギー >>  
静電エネルギー

静電エネルギー  
> 熱エネルギー

# 高温プラズマと凝縮系

## ○ プラズマ

密度が小さい

太陽風 1個/cm<sup>3</sup>

## ○ 凝縮系

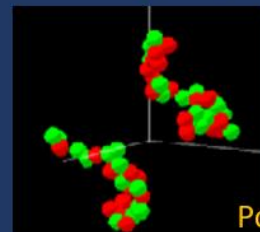
密度が大きい

固体物理 10<sup>19</sup>個/cm<sup>3</sup>

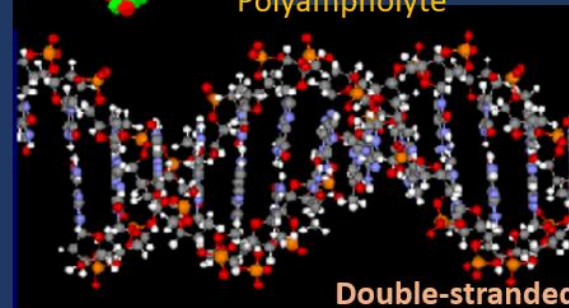
## (2) イオン性ソフトマター 古典系, 量子系

クーロンエネルギー > 熱エネルギー

近接の粒子間相互作用が大切



Polyampholyte



Double-stranded DNA

荷電高分子  
DNA, タンパク質  
生体細胞  
コロイド, イオン液体

液体, または 固体

# 研究者が40年間を振り返る

## 計算機シミュレーションで物理学を研究する — マイクロ波で氷は融解するか？

田中 基彦

Physics Research by Computer Simulations – Is the ice melted and heated  
by microwave applications ?

Motohiko TANAKA

(Received FEBRUARY 15, 2022)

This paper utilizes computer simulations to physical science and applications. High-temperature plasmas and macromolecules are reviewed first including magnetic reconnection in space and DNA translocation of the human body. The second topic is that water and salt-added saline solution are heated in elevated temperatures by microwaves, while the ice is frozen in complete ice structures and cannot be heated. The third topic is that a carbon-gold compound is driven by relativistic electromagnetic radiations and is accelerated as a nanotube accelerator.

Keywords: frozen ice structure, carbon-gold nanotube accelerator,  
high-temperature plasmas and macromolecules, computer simulations

### I 計算機実験は魅力的な玉手箱

計算機シミュレーションは理論、実験と並ぶ、物理、化学から生物学の研究手法である<sup>1)</sup>。この解説ではそこに至るまでに歩んできた研究の道筋を私自身が関わってきたテーマとともに示す。具体的には以下3つのトピックス、すなわち高温プラズマと高分子の研究、氷 (ice) がマイクロ波の印加で融けないこと、最後に小さなナノチューブ系での炭素・金イオンの電磁波加速シミュレーションについて、方法論とその結果の概要を述べる。<sup>1)</sup>

電子計算機は速く答えを出すための道具であるが、非線形過程を研究する上では新しい道を示すために非常に重要である。それを実現する運動、計算機シミュレーションは研究の手法として、運動方程式を立て、一緒に電磁場と結合させて、数10,000から10,000,000ステップの繰り返しにより系の時間発展を調べていく。このような多数の繰り返し計算のため高い精度の確保が必須である。

私が関与している物理系の計算機シミュレーションでは、2つの方法が使われる。

- 現象の成り立ち (発生機構、非線形発展) を明らかにする研究。例えば天文学や高温プラズマで扱う少数の初期値問題。
- 平衡状態のまわりで、物理量を定量的 (統計的) に調べる研究。例えば物性物理や化学で扱うパラメータ

初期条件を変えて多数行うもの。

これら空間・時間スケールに応じて、高温プラズマと液体、結晶などでは使う手法が異なる。概略の長さのスケールは次のようである。

- 天体プラズマ、高温プラズマ:
  - a) 磁気流体 (MHD) シミュレーション 10<sup>9</sup> km – m 星間プラズマ、太陽風、室内実験を流体力学で扱う。
  - b) 粒子シミュレーション 10<sup>2</sup>m, μm – nm 太陽風または実験室環境を粒子運動論で扱う。

- 液体、高分子、結晶:
  - c) 古典的分子動力学、第一原理分子動力学 μm – Å 扱っている現象の空間スケールは、太陽風プラズマと物質の結晶では10<sup>18</sup> 倍以上の隔りがある。

物質の結合強度  $\Gamma = e^2/ek_B T$  を使うと、物性の振る舞いの違いがよくわかる。ここで、 $e$  は粒子がもつ電荷、 $\epsilon$  (無次元) は誘電定数であり、真空では1、人体環境のときは約78である。また  $a$  は平均の粒子間距離、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度である。高温プラズマでは隣接する粒子どうしが速く離れているので、デバイ半径  $\lambda_D$  (次のページに説明) は十分に長い。このとき、クーロンエネルギーより熱エネルギーははるかに大きく、デバイ遮蔽が効くことが本質的である。すなわち、 $\Gamma \ll 1$  の弱結合系である。

その逆に、お互いに粒子どうしが接近しているのが強結合系  $\Gamma > 1$  である。このときはクーロンエネルギーが熱エネルギーよりも大きく、粒子間距離は約1 Å である (超強結合系は別のテーマ)。強結合定数

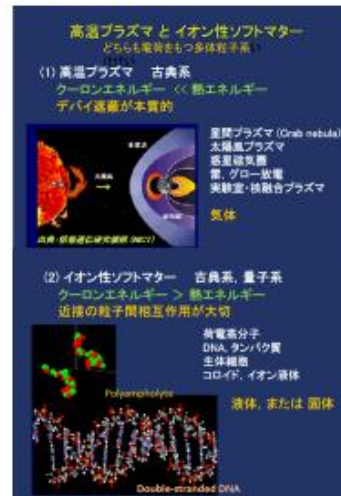


Figure 1: 高温プラズマとイオン性ソフトマター。高温プラズマは星間プラズマや太陽風、実験室・核融合プラズマに見られ、粒子間距離が離れた弱結合系であり、電離した気体である。イオン性ソフトマターは荷電高分子、生体 DNA やタンパク質、コロイドなどで、粒子どうしは近い距離にある強結合系で、液体・固体である。

似た定数であるが、クーロンエネルギーと熱エネルギーがちょうど等しくなる空間距離はピエラム長  $B = e^2/ek_B T$  と呼ばれている。

これらの代表は、高温プラズマとイオン性ソフトマターであり、その違いを Figure 1 に示す<sup>2)</sup>。高温プラズマは星間プラズマ、太陽風や実験室・核融合プラズマがあり、弱結合系である。これは第4の物質状態とわかれながら、電離しているため日常生活では触れることはないが、地球磁気圏は我々を取り巻く地球物理学の分野の魅力的な研究対象である。一方、イオン性ソフトマターは荷電高分子、DNA とタンパク質、コロイドなどの強結合系であり、毎日の身近な分野である。DNA において、ピエラム長は約7 Å である。この結晶をテーマとする固体物理学は、物理学の大切な分野である<sup>2)</sup>。以下では、計算機シミュレーションが、粒子シミュレーション法から分子動力学法へと展開してきたことを述べよう。

<sup>2)</sup>図の番号は、もとの論文の FIG. 名を尊重して、ここではキャプション、本文は Figure 1, 2, 3... で統一表記する。なお、この記号は CGS 単位系によるが、MKSA 単位系については最後にある appendix で解説する

## II 高温プラズマと高分子

### II.1 プラズマの線形理論

高温プラズマは一般的に結合定数が非常に小さく、粒子が自由に運動していると見なせるが、磁場や電場がある場合は高温プラズマにはある規則性が生じる。その第一の特徴は、一定の電場と磁場のもとで、荷電粒子はドリフト運動する。粒子中心の運動が不動のときでも、電流が生じることがあり、反磁性電流と呼ばれる。荷電どうしは互いに重なり合っており、2体衝突が稀で、多くの荷電粒子が「集团的」に現象に関わっている。衝突間波数  $\nu_c$  は、電子密度  $n_e$ 、デバイ半径内の密度  $\Lambda_c = n_e \lambda_D^3$  より、

$$\nu_c/\omega_{pe} \approx \Lambda_c^{-1} = (4\pi e^2/k_B T)^{3/2} n_e^{1/2} \ll 1 \quad (1)$$

である。ここでデバイ半径と電子プラズマ振動数は、 $\lambda_D = (k_B T/4\pi n_e e^2)^{1/2}$  および  $\omega_{pe} = (4\pi n_e e^2/m_e)^{1/2}$  である。平均自由行程は熱速度と衝突間波数で表わされ、

$$\lambda_{mfp} \approx v_e/\nu_c \approx \Lambda_c \lambda_D \quad (2)$$

である。太陽風の場合を考えると、密度、温度より

$$n_e \approx 1 \text{ cm}^{-3}, T = 100 \text{ eV} \rightarrow \lambda_D \approx 7 \times 10^5 \text{ cm.} \quad (3)$$

従って、 $\Lambda_c \approx 1 \times 10^{10}$  となり、自由行程長は  $\lambda_{mfp} \approx 10^{10} \text{ km} > 1 \text{ AU} = 2 \times 10^8 \text{ km}$  となる。これは太陽-地球間距離で定義される1天文単位よりも長い。

高温プラズマの第2の特徴は、運動論的效果であり、粒子が集団で軌道運動しているため生じる効果である。固有モードは熱雑音による励起が原因であり、プラズマ中で常に存在している。そしてプラズマの基礎過程であるランダウ共振、サイクロトロン共振により、波動を介して粒子が加速または減速運動する。ランダウ共振は直線運動の軌道と同期して起きており、2次元空間以上のサイクロトロン共振はラーマー運動と同期して起きる。

波動の成長・減衰の分岐は、分布関数により、波からエネルギーをもらう粒子が多いか、少ないかで決まる。不安定波動は、電子またはイオンとの共振により成長、または減衰する。波動としては、プラズマ振動-電子の粗密により伝搬する波、イオン音波-イオンと電子が関わる静電波、アルヴェン波-磁場の曲げ変形が伝搬する波、磁気音波-磁場の圧力が伝搬する波などがある。電場のみが関係する静電波の分散関係式は、 $\omega$  は振動数、 $k$  は波の波数として、

$$\epsilon_L(k, \omega) = 1 + \sum_s \frac{4\pi q_s^2}{m_s k^2} \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k \partial f_{s0} / \partial v_x}{\omega - kv_x} dv_x = 0, \quad (4)$$

<sup>1)</sup>著者所属: 工学部、大学院工学研究科創造エネルギー理工学専攻 (College of Engineering; Innovative Energy Science and Engineering, Graduate School of Engineering)



## 教育の目的

研究者として、必要な知識を身につける。  
英語は質疑応答のため、必要である。

## この講義の内容として…

主に、つぎのことを勉強する。

風力発電

太陽電池, シリコン, II-VI族, III-IV族

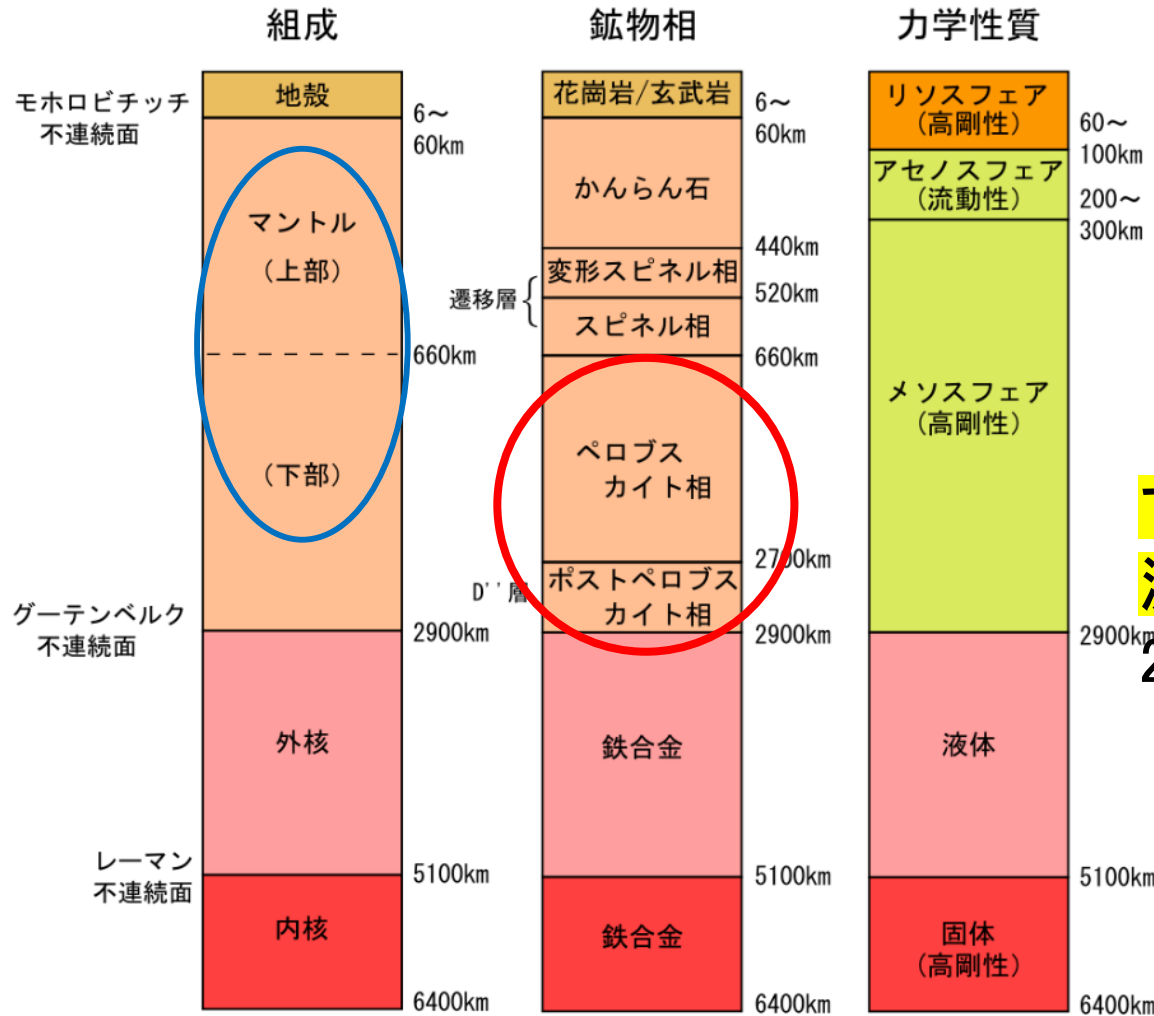
ペロブスカイト太陽電池

英語で論文を読む（英語は必須）

# 「ペロブスカイトとは何か？地球に存在する？」

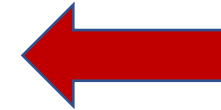
MgSiO<sub>3</sub> (ケイ酸マグネシウム) :

地下約660kmから2,700kmのマンテル下部に存在する



地球表面

ここに存在する



マンテル(地殻の下で流体), 深さ 660 km - 2900 km

地球中心

ペロブスカイト(perovskite, 灰チタン石)

<https://ja.wikipedia.org/wiki/ペロブスカイト構造>

## マンテル内部のペロブスカイト [編集]

「[マンテル#地球](#)」および「[ポストペロブスカイト](#)」も参照

数十GPaを超える超高压の環境では、ペロブスカイト構造は非常に一般的な構造である。  
この構造には、原子を稠密に詰め込むことができるためである。地球内部における主要な化学組成である  $\text{MgSiO}_3$  は、地下約660kmから約2,700kmのマンテル下部において、ペロブスカイト構造をとっていると考えられる。

この  $\text{MgSiO}_3$  を、125GPa、2,500Kという超高压高温環境下におくと、[ポストペロブスカイト構造](#)と呼ばれる、より原子が稠密に詰め込まれた相に転移することが明らかにされた。地下約2,700kmより深いマンテル最下層では、 $\text{MgSiO}_3$  はポストペロブスカイト構造をとっていると考えられる。

1気圧  $\doteq$  100 kPa  
 $= 0.1 \text{ MPa}$   
数 $10^5$  気圧

## 利用例 [編集]

### 太陽電池

ペロブスカイト太陽電池の発達により、光エネルギーの電気への変換効率が、2009年当時の $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  を用いた3.9%から2016年には最大21.0%になり、従来のシリコン太陽電池に近づいてきており、新たな利用スタイルと共に注目されている<sup>[4]</sup>。

# ペロブスカイト

<https://ja.wikipedia.org/wiki/ケイ酸マグネシウム>

## ケイ酸マグネシウム

常温におけるとき

出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia) 』

ケイ酸マグネシウム(Magnesium silicate)は、ケイ酸陰イオンとマグネシウム陽イオンとのケイ酸塩である。組成はさまざまであり、分野などにより具体的にどのような組成を指しているかは異なることがある。水(H<sub>2</sub>O)を含んでいる場合は水和物となる。一般には



と書ける。

天然鉱物  
制酸剤, 医薬品  
食品添加物



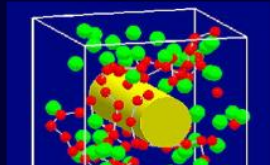
私の研究分野を、詳しく見ると…

# 「高温プラズマと凝縮系(高分子, マイクロ波)」

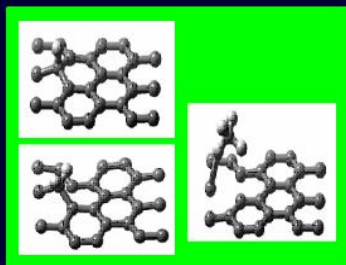


高分子(人体への応用)

加熱される鉄鉱石



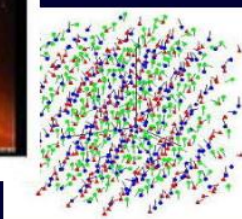
電荷逆転現象



Methan production on graphite



Magnetite/hematite composite irradiated by microwave magnetic field (after M.Sato), and 3d electron spins vs microwave magnetic field.



▶ マイクロ波による物質加熱の機構

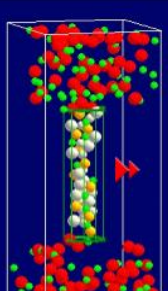
- 水(誘電液体)
- 磁性体(磁場による選択的加熱)

\* Heating of Water at Far-Infrared Electromagnetic Waves (FPMD)

\* Selective Heating of Magnetite by Magnetic Field (Phys.Rev.B)

量子力学シミュレーション(グラファイト)

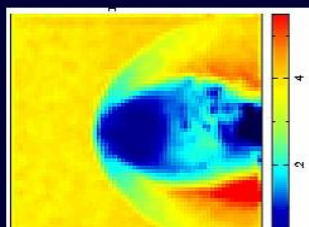
Dynamics



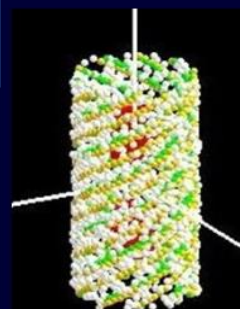
Nanopore  
with DNA

人体の膜表面を通り抜けるDNA

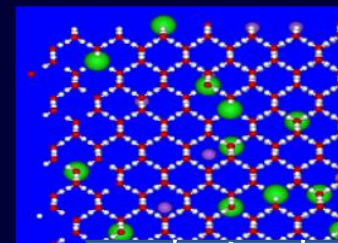
Matters



太陽風と地球の磁気圏



ナノチューブ  
陽子加速器



水と氷の加熱

高温プラズマ

<http://photon.isc.chubu.ac.jp/>

マイクロ波

**田中基彦**（大学院担当，客員教授，東京大学 理学博士）  
物理研究では「なぜか？」を知りたい。広く応用するために。  
**プラズマ物理，高分子（物理，化学，生物応用），**  
**（実験と理論のあいだの） 計算機シミュレーション**

◆ **プラズマの加速・加熱** **固体**，液体，気体，**プラズマ**  
太陽・惑星系空間は，「プラズマ」現象の宝庫，  
宇宙99%は「プラズマ」 太陽風，オーロラ，超高層プラズマ

◆ **自然の高分子**

高分子はプラズマの固体・液体版，電離か中性状態は異なるが。人間自体が「高分子」 例：DNA 自然の一部

# 理論とシミュレーションを使い、未知の物理問題を解き明かす。

## Materials Science of Plasma and Condensed Matters - Molecular Dynamics Simulations

JAPANESE  
/ ENGLISH

分子動力学法による物質の理工学



Photo by M.Tanaka

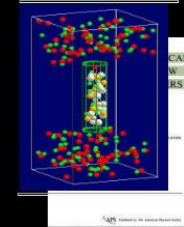
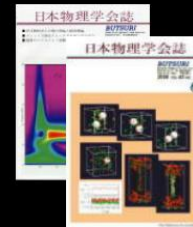
Carbon NanoTube Accelerator  
>> ANIMATION Movies

Selective Heating of Magnetic Metal Oxides by a Microwave Magnetic Field  
Microwave Heating of Water, Ice and Salt Solutions

DNA in Nanopores

Charge Inversion Phenomena of Macroions

Relativistic and Electromagnetic: Molecular Dynamics Simulation (2019)



### Recent Pages

分子動力学の物質研究  
Heating by Far-Infrared Waves  
プラズマと物質研究の17年間

近い未来のエネルギー源

### 研究/Research

▶ 日本語ページ  
▶ English Pages  
▶ 情報スキル 応用編

Video Movies of Molecular Dynamics Simulations

物理学会誌から

自然世界の高分子(翻訳)  
出版物の紹介

▶ GentOS7 Fortran(PGI)の運用法  
SuSE Linuxクラスター計算機の利用・運用  
PC cluster with high-speed communication

特定領域研究(2006-2011)

マイクロ波による物質の加熱機構

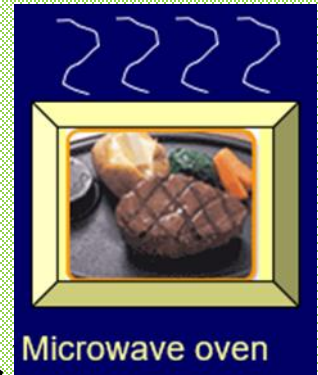
Relativistic molecular dynamics simulation in nanotube (Elsevier, 2019)

- ◆ マイクロ波印可で氷は融けるか？ (2007) → 結晶は溶けない
- ◆ 相対論ナノチューブ粒子加速器 (2013, 2019) → 粒子加速を医療へ
- ◆ 宇宙, 太陽系での 爆発過程と磁気リコネクション (1990年代)

ホームページ <http://photon.isc.chubu.ac.jp/> 日本語 / 英語ページ



# ◆マイクロ波オーブンで、「氷」は融けるか？



マイクロ波オーブンで、**氷は融けない!**

世界で初めて、分子動力学シミュレーションを行い  
実証した (2007年)

**ではなぜか?**

(理由) 水は、分子が乱雑運動して、加熱される。

(零下で) 氷は、結晶どうしが隣の分子と、

固く結びつき、完全結晶の状態!

**その結合の強さは?**  $\rightarrow 10^6 \text{ V/cm}$  ( $10^{-2} \text{ V/\AA}$ )

電子レンジの電場は小さい

 *Kittel's book*

# 第2回講義

この講義の成り立ち

1. イントロダクション

まず、初めに考えよう

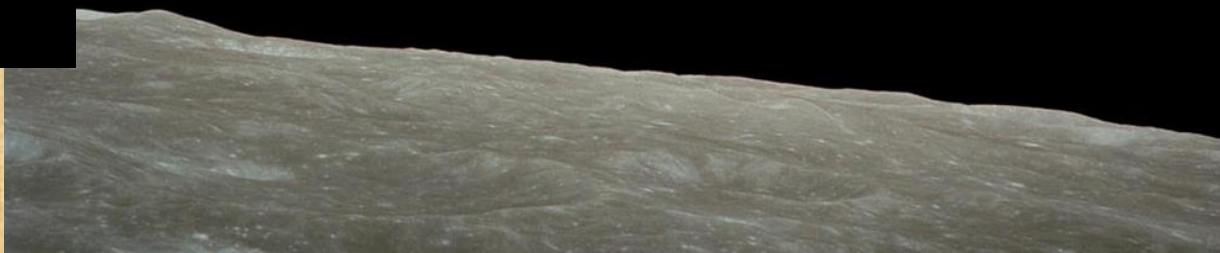
「水素で走る自動車」 = 「太陽光で走る  
自動車」 なのか？

宇宙から眺めた地球

環境のエコロジーになるか？



月を回るアポロ8号  
からの地球



# 水素はどこから来たものか？

「宇宙に最も多く存在する元素」, である



M42 オリオン大星雲  
1300光年 若い星雲

hydrogène イドロジェーヌ (仏)  
もっとも軽い元素, 原子番号1,  
陽子(+), (常温では)水素分子になる  
多量に存在し, 宇宙の質量の大半

H: 92% He: 8% Si: 0.1%

*cf. 負の質量をもつ暗黒物質。*

*つねに膨張する宇宙(止まらず)か？*

→ では、**現在の地球に、どれくらい水素があるのか？**



地球では…

軽い元素の水素, 単体H では存在しない。

地球は冷えて, 水素は宇宙へと蒸発(原始地球)



◆ 複合体としては, 地球に存在する

海水  $H_2O$  → きわめて安定, 不活性!

資源として海底に存在する「水素化合物」

水素化合物は, 石油と同様に「有限資源」



◆ 太陽発電による自動車

集光の面積が要るが, 実際はOK!

昼間で, 晴天にかぎる >> 蓄電して



## 2. 人類のエネルギー消費量

# 人類のエネルギー消費量

その消費は続くのか？

残存量(政府の資料, 2008年)



「化石燃料」よく燃える, しかし量は有限である。

石油 40年?, 天然ガス 60年, 石炭 150年

原子力エネルギー 70年? ← しかも限られる

メタンハイドレート ← CO<sub>2</sub>の20倍の温暖化を起こす  
さらに, 地球温暖化の原因となる。

一方,

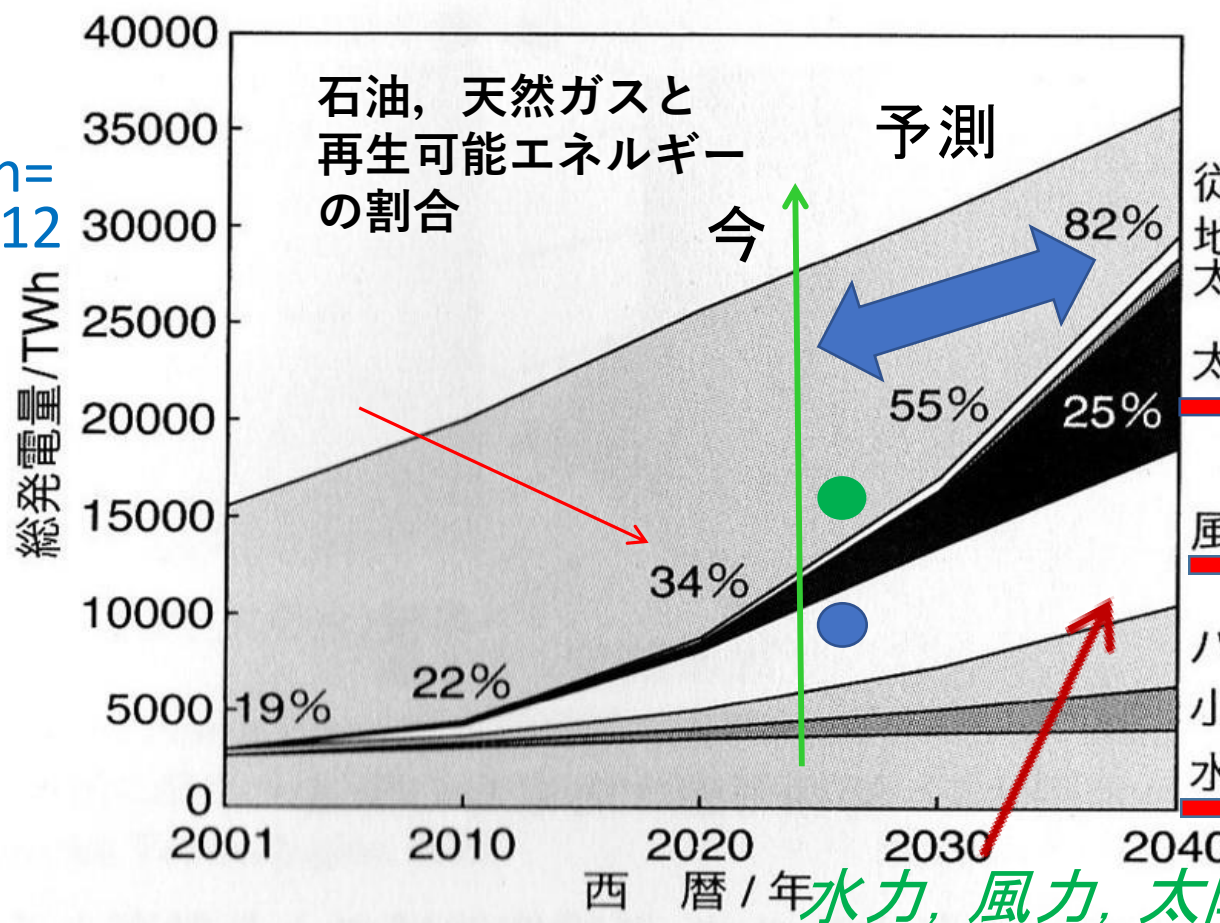
風力, 水力, 地熱(温泉), ... ← 地球から湧いてくる

太陽電池(発電) ← 天(太陽)から降ってくる!

# ◆ 近未来のエネルギーを予想する

緑の縦線が2021年

TWh =  $10^{12}$  Wh  
全世界



従来エネルギー  
地熱  
太陽熱  
太陽光 **現在は第3位**  
風力 **現在は第2位**  
バイオマス  
小水力  
水力 **現在は第1位**

水力, 風力, 太陽光

図 1.3 欧州再生可能エネルギー評議会によるシナリオ

出典：Renewable energy scenario to 2040, European Renewable Energy Council, <http://www.erec.org/> (有機薄膜太陽電池の科学, 図1.3, 松尾豊より転載)



# 再生可能エネルギーは、今後は主流になる資源

3割

1. 風力発電 約5割を予測
2. 太陽光発電 約2割→3割？

日本 1979年～ 石油危機に始まる

3. 水力発電 19世紀～ 約1割(同じ)
4. バイオ燃料、バイオマス(生物燃料)

△ 燃料電池, FCV(石油を起源)

◎ 太陽光で水素を得る, ドイツ



70,000 solar panels, generates 14 MW of solar power, Nevada, United States

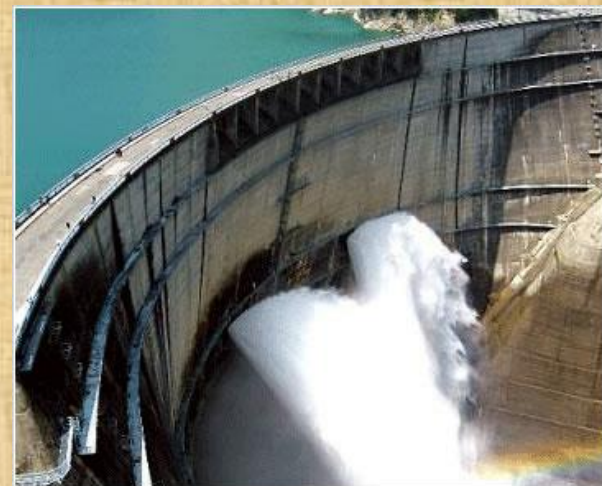


5割

1割

12 MW (2,000kW \* 6)

風力発電機、せたな町、北海道



黒部川第4ダム、富山





## 太陽電池

出力 7,500kW (7.5 MW)  
想定年間発電量 約  
730万kWh  
(一般家庭約2,000世帯分の  
年間使用電力量に相当)

開発規模 8,000kW (8.0 MW)  
想定年間発電量 約840万kWh  
(一般家庭約2,300世帯分)

愛知県

日本は 2 ~ 30 MW (2018)  
ヨーロッパでは, 100MWが  
普通の規模

-> 土地がある  
未来への投資

静岡県



# 長崎空港 メガソーラー発電 約30MW (2016)

FIT買取価格36円/kWh,年間発電量 37M kWh  
送電: 海底ケーブル, 九州電力





# 長崎のメガソーラー 京セラなど500億円出資

<https://www.nikkei.com/article/DGXMZO58584220Y0A420C2000000/> 2020年4月28日

京セラや九電工など6社は28日、長崎県五島列島で計画する大規模太陽光発電所（メガソーラー）の事業会社に総額約500億円を出資すると発表した。2020年度内に建設に着手し、23年度中の完成を見込む。年間発電量は一般家庭約17万3000世帯分に相当する51万5000メガワット時を予定し、全量を九州電力に売電する。国内最大級のメガソーラーとなる見通しだ。



京セラ製パネルが使われている滋賀県のメガソーラー

**発電 51 MWh程度，海底ケーブルで**

事業会社には東京センチュリーや古河電気工業なども出資する。メガソーラーは五島列島の宇久島に設置し、約2000億円を投じて建設する。京セラ製の太陽光パネル165万枚（約480メガワット分）を設置する予定だ。固定価格買い取り制度（FIT）を使って九州電力に1キロワット時あたり40円で20年間にわたって販売する。

京セラなどはメガソーラーの建設計画は14年に打ち出し、18年1月に具体的な計画を改めて公表していた。

# 電力：九州電力での「火力, 風力, 太陽光発電所」

<http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/energy/electrical-japan/area/42.html>

国立情報学研究所(NII) 東京都千代田区 お濠ぞい

発電方式 (種類)	火力	火力 (バイオマス)	原子力	水力	揚水	地熱	風力	太陽光	複合型			
出力(MW)	-1	1-10	10-40	40-100	100-200	200-400	400-1000	1000-2000	2000-4000	4000-		
電力会社	北海道電力	東北電力	東京電力	中部電力	北陸電力	関西電力	中国電力	四国電力	九州電力	沖縄電力	電源開発	日本原電

発電方式	発電所名	事業者名	出力(MW)	ランキング
火力 (バイオマス)	松浦火力発電所<1,2>	電源開発株式会社	2000	1
火力	松浦発電所<1,2>	九州電力株式会社	1700	2
火力	松島火力発電所<1,2>	電源開発株式会社	1000	3
火力	新有川発電所<1,2,3,4,5,6>	九州電力株式会社	60	4
火力	豊玉発電所<1,2,3,4,5>	九州電力株式会社	42	5
風力	的山大島風力発電所<16>	株式会社の山大島風力発電所	32	6
太陽光	SOL de 大村 箕島	長崎ソーラーエナジー合同会社	29.6841	7
火力	新吉岐発電所<1,2,3,4>	九州電力株式会社	24	8
火力	福江第二発電所<1,2,3,4>	九州電力株式会社	21	9
太陽光	大村メガソーラー発電所<1,2,3,4>	九電みらいエナジー株式会社	20.3504	10
風力	新上五島ホエールズwindシステム<8>	シグマパワージャネックス株式会社	16	11
太陽光	長崎・琴海メガソーラー発電所	京セラTCLソーラー合同会社	15.1782	12
太陽光	DREAM Solar ひぐち長崎	大和リース株式会社	15.022	13
火力	芦辺発電所<7,8,9,10>	九州電力株式会社	15	14
風力	長崎鹿町windファーム<15>	長崎鹿町風力発電株式会社	15	15
太陽光	滑石ソーラーファーム<1,2,3,4,5,6>	馬場興産株式会社	14.7312	16
風力	五島玉之浦風力発電所<7>	株式会社九電工	14	17



## <コメント>

●の大きさを規模を表す

●●● 火力, 水力, 風力発電など

火力発電所    バイオマス火力2000 MW

風力発電所    30 MW

太陽光発電所



## 中部地方（続き）

● 揚水	馬瀬川第一発電所<1,2>	中部電力株式会社	288	15
● 水力	徳山発電所<1,2>	中部電力株式会社	161.9	16
● 水力	平岡発電所	中部電力株式会社	101	17
● 水力	奥泉発電所	中部電力株式会社	92	18
● 水力	畑薙第二発電所	中部電力株式会社	86.6	19
● 揚水	畑薙第一発電所<2,3>	中部電力株式会社	86	20
● 水力	横山発電所	中部電力株式会社	70	21
● 水力	大井川発電所	中部電力株式会社	68.2	22
● 水力	馬瀬川第二発電所	中部電力株式会社	66.4	23
● 水力	井川発電所	中部電力株式会社	62	24
● 水力	新上麻生発電所	中部電力株式会社	61.4	25
● 水力	矢作第一発電所	中部電力株式会社	61.2	26
● 水力	川口発電所	中部電力株式会社	58	27
● 水力	泰阜発電所	中部電力株式会社	54.5	28
● 水力	小坂発電所<1,2,3>	中部電力株式会社	50.1	29
● 水力	瀬戸発電所<1,2>	中部電力株式会社	49.2	30
● 水力	赤石発電所	中部電力株式会社	40.5	31
● 水力	久々野発電所	中部電力株式会社	38.9	32

中部地方では

1500-4800 MWにおいて火力，原子力発電所，  
300-1500 MWに揚水発電所（水をくみ上げて再利用）  
それ以下(1-150 MW)で水力発電所がある

# (その日の) 電力使用状況：使用/供給の比 2021年3月

## リアルタイム電力使用状況

日本全国各エリアの電力会社（一般送配電事業者）がでんき予報で提供する最新の電力使用状況（電力需要）を基に、「電力使用量 / ピーク時供給力（電力利用率）」と最大電力時の「時刻 = 使用量（利用率）」を示します。なお、分母となるピーク時供給力は日中にも変更される場合があるため、「電力利用率の最大値」ではなく「最大電力時の利用率」を表示します。電力の単位はMW（メガワット）、利用率の単位はパーセント（小数点以下切捨て）です。時間的な変化は**現在および過去の電力使用状況グラフ**、**現在および過去の太陽光発電実績**、**現在および過去の風力発電実績**、**電力需給実績グラフ（原子力・火力・水力・地熱・バイオマス・太陽光・風力・揚水・連系線）**、**再生可能エネルギー（自然エネルギー・低炭素エネルギー）供給状況**などをご覧ください。また過去の最大電力については**季節ごとの最大電力一覧**をご覧ください。

北海道電力	2021-03-22 17:05	3760 / 4870 (77%)	10:40 = 4000 (82%)
東北電力	2021-03-22 17:10	10160 / 12280 (82%)	08:55 = 10750 (87%)
東京電力	2021-03-22 17:05	35510 / 42950 (82%)	11:45 = 35710 (83%)
中部電力	2021-03-22 17:05	16450 / 19890 (82%)	09:35 = 17820 (89%)
北陸電力	2021-03-22 17:10	3560 / 4400 (80%)	12:00 = 3930 (89%)
関西電力	2021-03-22 16:45	18050 / 21790 (82%)	10:00 = 18400 (84%)
中国電力	2021-03-22 17:05	7100 / 8280 (85%)	09:25 = 7360 (88%)
四国電力	2021-03-22 17:05	3250 / 4130 (78%)	13:45 = 3530 (85%)
九州電力	2021-03-22 17:10	9810 / 12120 (80%)	11:00 = 10720 (88%)
沖縄電力	2021-03-22 17:10	820 / 1270 (64%)	16:45 = 840 (66%)

電力利用率が95%を越えた時には【電力需給情報】を@electricalJapanからツイートし、電力需給の逼迫状況をお知らせします（Twitterによるアカウント凍結のためサービス停止中）。

# 太陽光発電実績

## 3/23/2021 12時 中部, 中国, 四国, 九州電力は晴天!

電力会社（一般送配電事業者）がでんき予報で提供する最新の太陽光発電実績について、「太陽光発電実績 / エリア需要（供給率）」、および太陽光発電の最大出力時での「時刻 = 発電量（供給率）」を示します。なお供給率では分母と分子の両方が変動するため、「太陽光発電供給率の最大値」ではなく「太陽光発電最大出力時の供給率」を表示します。電力の単位はMW（メガワット）、供給率の単位はパーセント（小数点以下切捨て）です。時間的な変化は現在および過去の太陽光発電実績、現在および過去の電力使用状況グラフ、現在および過去の風力発電実績、電力需給実績グラフ（原子力・火力・水力・地熱・バイオマス・太陽光・風力・揚水・連系線）、再生可能エネルギー（自然エネルギー・低炭素エネルギー）供給状況などをご覧ください。また過去の最大電力については季節ごとの最大電力一覧をご覧ください。

北海道電力	2021-03-23 11:45	1510 / 3840 (39%)	10:35 = 1650 (41%)
東北電力	2021-03-23 11:50	3550 / 10510 (33%)	09:30 = 4060 (36%)
東京電力	2021-03-23 11:45	14010 / 36790 (38%)	11:30 = 14080 (38%)
中部電力	2021-03-23 11:40	8090 / 17990 (44%)	11:40 = 8090 (44%)
北陸電力	2021-03-23 11:45	930 / 3760 (24%)	11:45 = 930 (24%)
関西電力	2021-03-23 11:25	4870 / 18560 (26%)	11:25 = 4870 (26%)
中国電力	2021-03-23 11:40	4270 / 7160 (59%)	11:40 = 4270 (59%)
四国電力	2021-03-23 11:45	2250 / 3340 (67%)	11:45 = 2250 (67%)
九州電力	2021-03-23 11:45	7200 / 10040 (71%)	11:45 = 7200 (71%)
沖縄電力	2021-03-23 11:40	160 / 760 (21%)	11:10 = 240 (28%)

太陽光発電所の地理的な分布については日本全国の太陽光発電所（メガソーラー）一覧地図・ランキング、現在の各地の天気についてはデジタル台風：気象衛星「ひまわり」ビューア - リアルタイムと過去の画像データベースが便利です。

季節(夏, 冬), 時間帯(昼, 朝・夕方), 気候(晴れ, 雨),  
また地域性(九州, 中部,..., 北海道)により変動が見られる



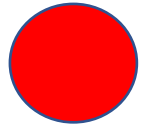
# アメリカ合衆国



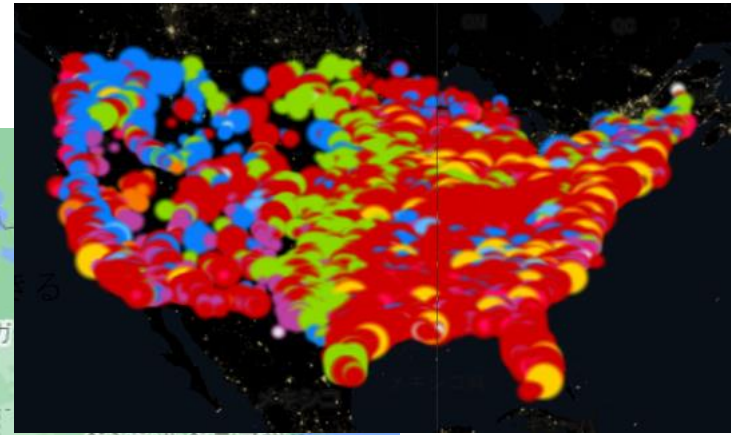
水力 カリフォルニア～ワシントン州, 中西部, 北部



風力 中西部, テキサス, コロラド, ミネソタ,  
ウィスコンシン州を中心に。中部の北と南



火力,  原子力



この画面で表示するには

まずPC画面に移る

- <http://agora.ex.nii.ac.jp/earthquake/201103-eastjapan/energy/electrical-japan/area/42.html.ja>  
のページを表示する

トップで画像を選ぶ

Electrical Planet

- Electrical USA, then Click  
ただし時間がかかる

# アメリカの発電所

火力発電

原子力発電

水力発電

風力発電

太陽光, 太陽熱発電



クリックすると表示できる  
アメリカ本土  
アラスカ  
ハワイ  
太平洋, 大西洋の島表示できる

北太平洋

南太平洋

# 第3回講義

## 太陽電池の現在と未来

### 講義資料(PDF)

資料1 太陽電池の現状と未来(第1章)

資料2 有機薄膜太陽電池の特性と  
評価方法(第4章)

# 「太陽電池」の現状と未来

有機薄膜太陽電池の科学 (松尾, 化学同人)  
第1章, および第4章 pp.113-120 << コピー

## すべての太陽電池についての紹介

○シリコンによる太陽電池

○有機物を使った太陽電池

図1.3 再生可能エネルギーの増加

表1.1 発電方式別の試算の結果

各種の比較



本では「有機薄膜」と書いているが、実際には一般の「太陽電池」について述べてある。

## 第1章（有機薄膜）太陽電池の現状と未来

1.1 太陽エネルギーの利用と太陽電池の現状

1.2 各種の太陽電池の比較

1.3 有機太陽電池の期待される未来

コラム 低コスト太陽電池と高性能太陽電池

## 第4章

4.5（有機薄膜）太陽電池の特性と評価方法

5.2.7	ドナーアクセプターダイアド利用の試み	149
5.2.8	PCBM 誘導体における電子親和力の制御	150
5.2.9	PCBM 誘導体におけるモルフォロジーの制御	151
5.2.10	フラレンビス(インデン)付加体	153
5.2.11	添加剤(ジヨードオクタン)の効果	154
5.2.12	金属ナノ粒子添加の効果	155
5.2.13	光学スペーサーの利用	157
5.2.14	タンデム型有機薄膜太陽電池	158
5.2.15	低分子塗布型有機薄膜太陽電池	160
5.2.16	逆型有機薄膜太陽電池	163
5.3	エネルギー変換効率向上のための戦略	166
用語解説		173
資料		184
索引		187



## Coffee break

1.	低コスト太陽電池と高効率太陽電池	11
2.	日本発の有機半導体素子	12
3.	有機薄膜太陽電池の逆? 有機 EL 素子	51
4.	単結晶作製のすすめ	95
5.	X 線結晶構造解析のすすめ	97
6.	電極の呼称あれこれ	130
7.	有機薄膜太陽電池のベンチャー企業	170

## 第3回 資料1

## 第1章

## 有機薄膜太陽電池の現状と未来

今世紀に入って、太陽電池の生産量、市場規模は顕著に増大している。しかしながら、現在おもに使われているシリコンを用いた太陽電池は製造コストが高いため、政府の補助金がなくては普及が成り立たず、本質的な問題解決には至っていない。そのため、世界中で新型太陽電池の研究開発が活発に行われている。

新型太陽電池の一つである有機薄膜太陽電池(図 1.1, 1.2)は、シリコン半導体ではなく、より安価な有機半導体を用いる太陽電池である。軽量で、かつ曲げられるという特徴があるため、実用化されれば、「いつでも、どこでも、だれでも」使えるユニークなパワーサプライヤー(電源装置)として、人びとの暮らしを豊かにするさまざまな用途が新たに生まれることが見込まれている。また、長寿命で高効率な有機薄膜太陽電池が実現すれば、太陽光発電に利用できるようになる。そうなれば、全エネルギー生産量における自然エネルギーの割合が増えることとなり、地球環境への負荷や二酸化炭素の排出量を減らすことができる。

しかしながら現状では、有機薄膜太陽電池の光電エネルギー変換効率(以下、エネルギー変換効率)は最高でも8%であり、アモルファスシリコン太陽電池(変換効率10%)や、多結晶・単結晶シリコン太陽電池(変換効率15~20%)にはまだ追いついていない。また、用いる有機材料の安定性や有機薄膜太陽電池の寿命については、現在、議論と改良が重ねられているところである。

# 表1.1(A) 発電原価 (円/1 kWh)

経済産業省 2014年

2014年 稼働率,年数 2030年(推定)

	2014年	稼働率,年数	2030年(推定)	
<b>水力</b>	<b>11</b>	45%, 40年	11	
小水力	23-27		23-27	
石油	30-43	30%, 40年	29-46	化石燃料
LNG(ガス)	14	70%, 40年	14	化石燃料
石炭	12	70 %, 40年	13	化石燃料
原子力	10	70%, 40年	10	<b>廃炉費は膨大</b>
<b>太陽光</b>	<b>25-29</b>	14 %, 20年	13-16	<b>政治で決まる</b>
<b>風力</b>	<b>22</b>	20%, 20年	14-33	<b>政治で決まる</b>
ガス cogene	14	70 %, 30年	14	化石燃料

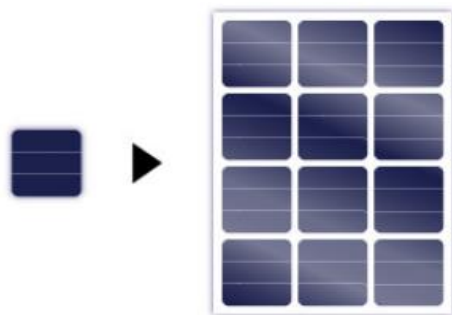
# 太陽電池生産量 セル, モジュール

2020年 198GW

表1 世界の太陽電池生産量・生産能力および太陽光発電システム導入量のまとめ (2018年)

生産量 (2018年)	セル	115 GW	(対前年比8.5%増)
	モジュール	116 GW	(同10.3%増)
生産能力 (2018年末)	セル	172 GW/年	(同38.4%増)
	モジュール	184 GW/年	(同33.3%増)
2018年の太陽光発電システム年間導入量 (DCベース)		101 GW	(同4.5%増)

出典：(株)資源総合システム調べ (一部推定)



**solar cell**

最小単位

**solar module**

パナソニック HIT solar cell 最小単位  
1580(幅) × 812(奥行) × 35(高さ)mm  
1枚が約13 cm<sup>2</sup>



# 各種の太陽電池の比較

## ◆無機系の材料

結晶シリコン, アモルファスシリコン a-Si:H

SiとHが混合している

化合物半導体 CIGS, GaAs 灯台, 宇宙船で

>> Cu+In+Ga+S

## ◆有機系の材料

有機薄膜 — 固体 C60+, ペリレンの誘導体

高い純度が必要 > 99.9999%

色素増感 — 溶液セル(簡単, すぐ劣化—10年前)

その後, 固体化され, Siと並ぶほど改善!

# 太陽電池の基本構造

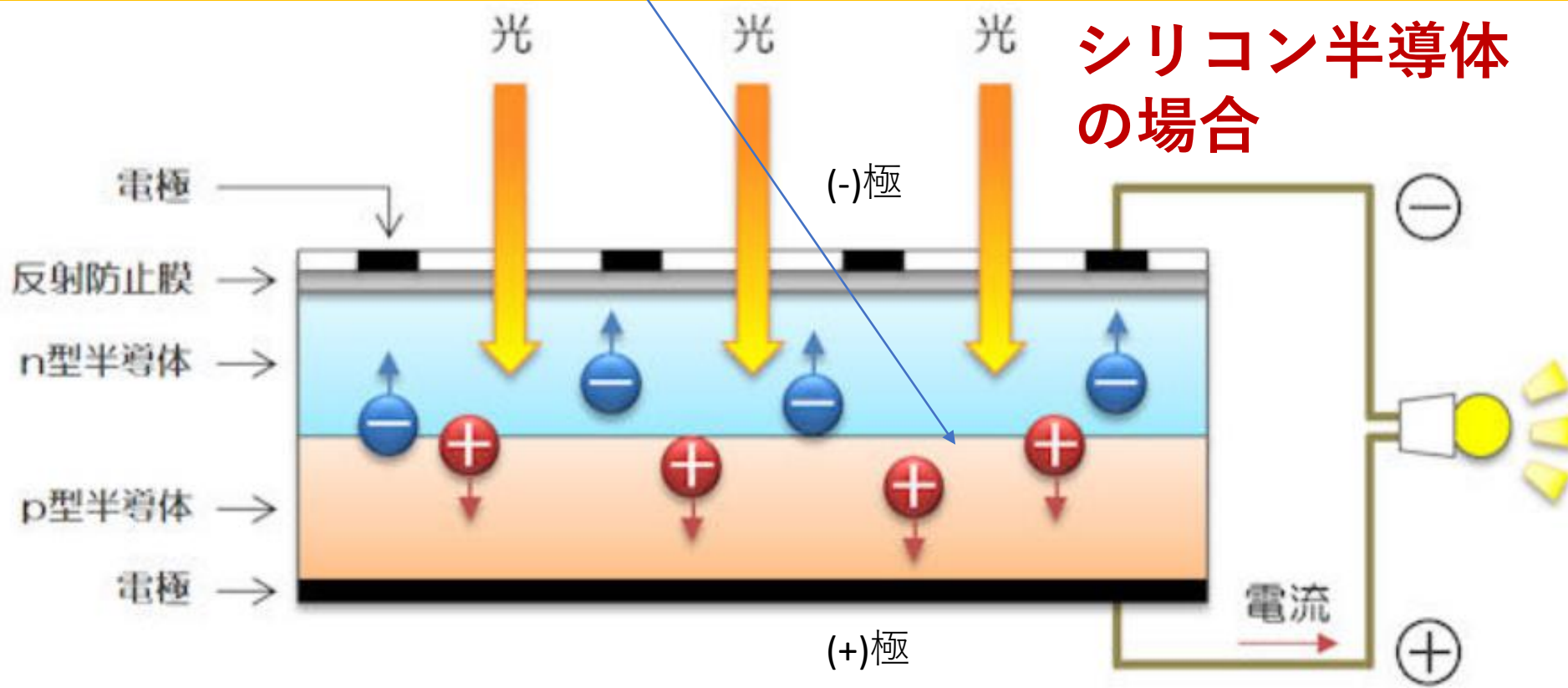
光を p-n接合面に照射すると、電子eと正孔pが発生

《 n型半導体(電子), p型半導体(正孔) の組み合わせ》

十分な光起電力を与える  $h\nu > \varepsilon_F$ , (+) (-) 極へ移動して  
電流が回路を流れる(\*)

$h$ \*振動数 > フェルミエネルギー

プランク定数  $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$  Js



# さまざまな太陽電池の特徴 表1.2

物質	効率	出来の良さ
単結晶シリコン	20-24%	◎
多結晶シリコン	15-18%	○ 表面テクスチャー(薄膜)
アモルファス・シリコン	10%	a-Si:H △
CIS, CIGS	11-20%	Cu, In, Ga, Se: 特殊素材, 有害
InGaAs	40%	特殊な素材と優れた物性, 希少, 有害

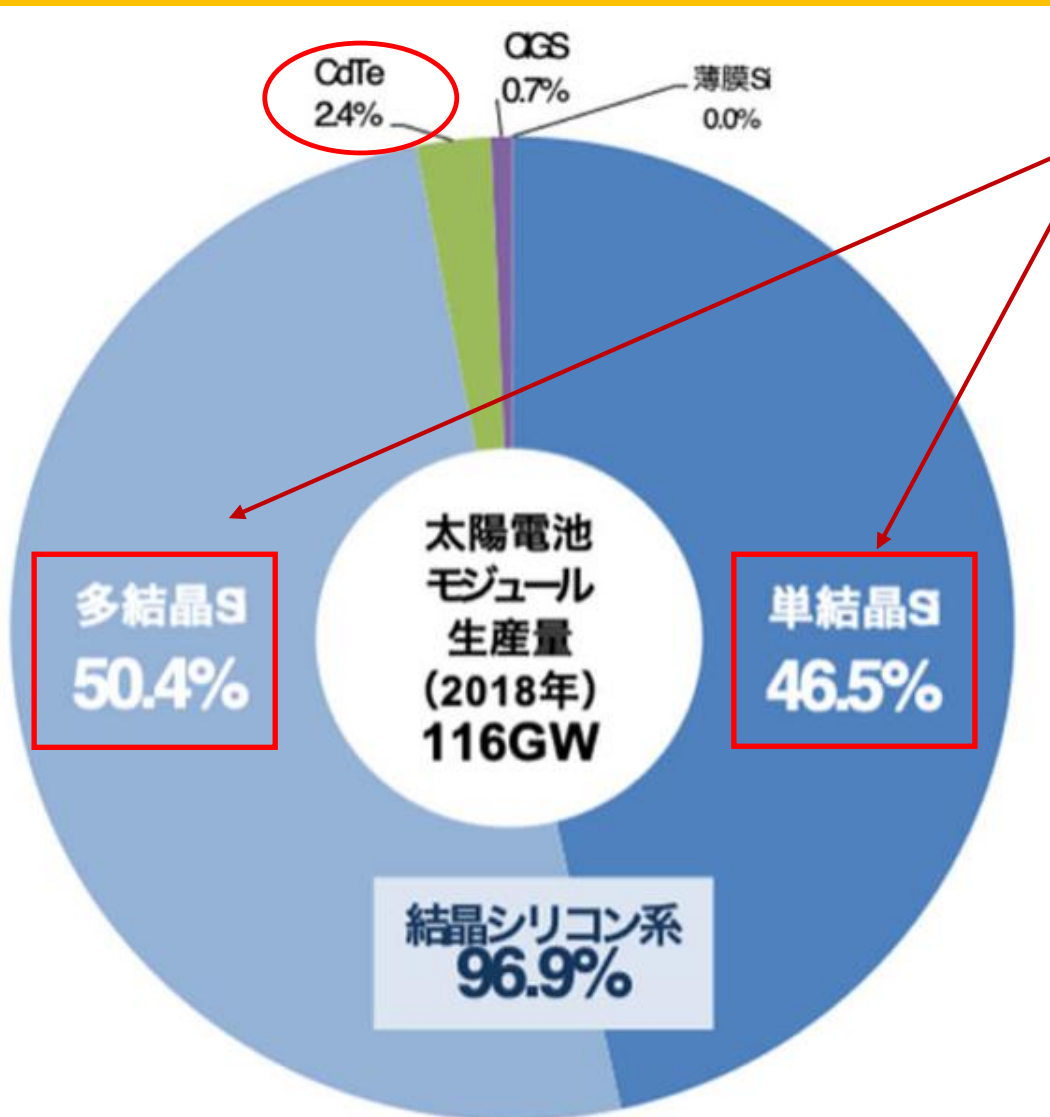
## シリコンを使わないもの

色素増感 11% 電解質で実験, すぐに劣化、しかし  
固体: ペロブスカイト  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$   $\text{BaTiO}_3$

→ セル効率 15%以上, 2ヶ月持つものを製作 ○

有機薄膜 7% 開発中, 限界が見える?

# 太陽電池モジュール生産量 (2018年)



結晶シリコン系  
がほとんどを  
占めている！

CdTeなどはII-VI属  
これは講義で触れる

III-V族半導体は  
特殊用途  
(わずかな量で、  
非常に高い)

## 第4.5章 太陽電池の基礎

### 4.5 太陽電池の特性と評価方法



## 4.5 太陽電池の特性と評価方法

### 第3回資料2

一般的な特性は pp.113-115, および図4.10

光照射時に電圧をかけて、素子の電流を測定して

J-Vカーブ 図4.10

開放電圧  $V_{oc}(V)$

短絡電流密度  $J_{sc} (mA/cm^2)$

曲線因子  $FF$ (無次元)

エネルギー変換効率(PCE) %

実施している。

## 第3回資料2

### (3) アルミニウム電極蒸着

大気雰囲気下で事前に蒸着源のアルミニウムを蒸着ポート(モリブデン)に載せ、グローブボックスと連結した真空蒸着機にセットする。真空蒸着機を真空状態にしてから窒素雰囲気下にし、グローブボックスから基板を搬送してくる。蒸着室と窒素雰囲気下のグローブボックスが連結されていると、まったく大気に触れずに基板を蒸着室に導入できる。真空下 ( $\sim 10^{-4}$  Pa) で蒸着源に電流を印加して加熱し、tooling 済みの水晶振動子式膜厚モニターで蒸着レートを  $1 \sim 10 \text{ \AA/s}$  程度に制御しながら、80 nm の膜厚となるようにアルミニウム電極を蒸着する。蒸着室に窒素をもどし、基板をグローブボックスにもどして、グローブボックス内のホットプレートで基板を  $150^\circ\text{C}$ 、20 分間加熱することによりアニールする。

### (4) 封止

以上のように作製した素子が大気暴露されないよう、グローブボックス内に設置した小型ディスペンサーロボットを用いて素子を封止する。UV 光硬化樹脂を封止ガラスに塗布して基板と付け合わせ、UV 光を照射することで封止ガラスを基板に接着し、素子を封止する。このようにして、大気中で素子特性の評価を行うことのできる封止素子を作製する。

## 4.5 有機薄膜太陽電池の特性と評価方法

光照射時に電圧を印加しながら、素子から得られる電流を測定することで、開放電圧 (開放端電圧ともいう)  $V_{OC}$  (V)、短絡電流密度  $J_{SC}$  ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )、曲線因子 FF (無次元数)、エネルギー変換効率 (PCE; power conversion efficiency, %) の値が得られる。短絡電流密度は、光が入射して光電変換される面積で換算する必要がある。測定により得られる  $J$ - $V$  カープと開放電圧、短絡電流密度、曲線因子の関係を図 4.10 に示す。バイアス電圧をかけない

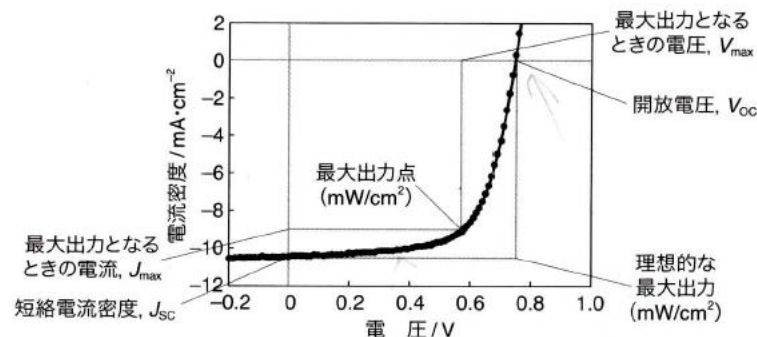


図 4.10  $J$ - $V$  カープと PCE,  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ , FF の関係

電流 × 電圧の積は電力 (エネルギー) であり、図では長方形の面積で表される。二つの長方形の面積が同じに近くなるほど ( $J$ - $V$  カープが四角くカーブするほど)、FF が高くなる。

ときに得られる電流密度が短絡電流密度であり、そこから電流が流れにくくなる向きに電圧を印加していき、最終的に電流がゼロになる点の電圧が開放電圧である。ここに至るまでの  $J$ - $V$  カープにおいて、電流 × 電圧の積、すなわち出力電力が最大になる点がある。

その点を最大出力点として、そのときの電流密度と電圧をそれぞれ  $J_{max}$ ,  $V_{max}$  で表す。曲線因子 FF には次式 (4.1) の関係がある。

$$FF = (J_{max} \times V_{max}) / (J_{SC} \times V_{OC}) \quad (4.1)$$

すなわち、現実の最大出力を理想的な最大出力 ( $J_{SC} \times V_{OC}$ ) で割ったものであり、1 に近いほうがよい特性となる。エネルギー変換効率 PCE は、得られる電気エネルギー (電力) を入射した光のエネルギーで割ったものであり、照射光のエネルギーを  $P_{inc}$  として次の式 (4.2) が成り立つ。

$$PCE(\%) = \{(J_{max} \times V_{max}) / P_{inc}\} \times 100 \quad (4.2)$$

測定においては、 $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$  の光源を用いて評価することが多い。その場合、 $P_{inc}$  は 100 であるので、次のような単純な式 (4.3) が成り立つ。

# J-V curve (電流-電圧の曲線)

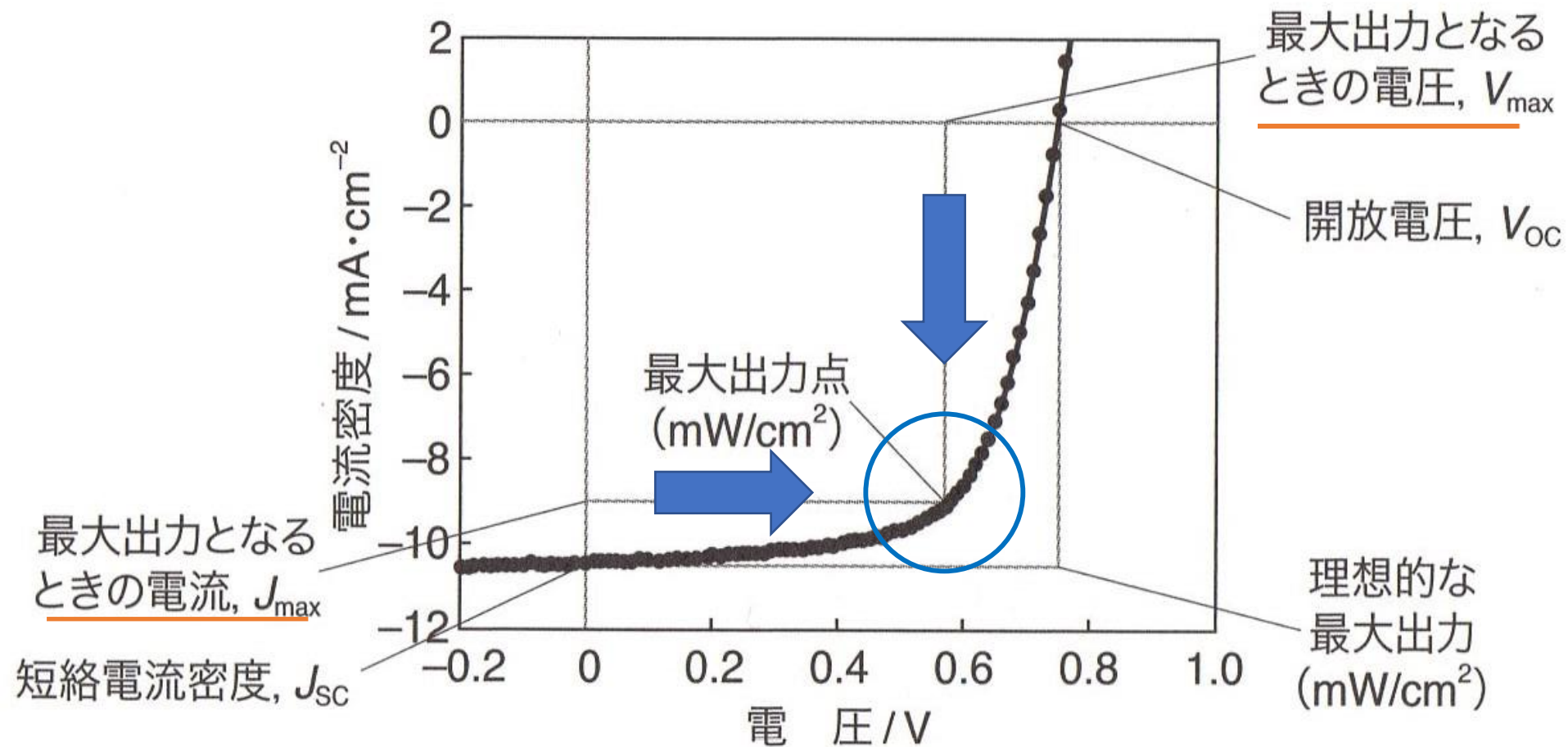


図 4.10 J-Vカーブと PCE,  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF の関係

**最大出力の**電流密度 $J_{max}$ , 電圧 $V_{max}$

$$FF = J_{max} \times V_{max} / (J_{sc} \times V_{oc})$$

短絡電流密度      開放電圧

**照射光の電気エネルギーと**

入射した光のエネルギーの比

$$PCE(\%) = 100 \left| J_{max} \times V_{max} \right| / P_{inc}$$

照射光のエネルギー

## 4.5 太陽電池の特性と評価方法

光照射時に、電圧を印加しながら、電流を測定。

開放電圧 ( $V_{oc}$  V)      <- 図をみる

短絡電流密度 ( $J_{sc}$  mA/cm<sup>2</sup>)      <- 図をみる

曲線因子 (FF)

エネルギー変換効率 (PCE, %)

光電流の式

$$I = I_{sc} - I_0 [\exp \{q(V + R_s I) / kT\} - 1]$$

$$- (V + R_s I) / R_{sh} \quad \leftarrow \text{固体物理学入門}$$



電流I - 電圧V 曲線：

内部抵抗

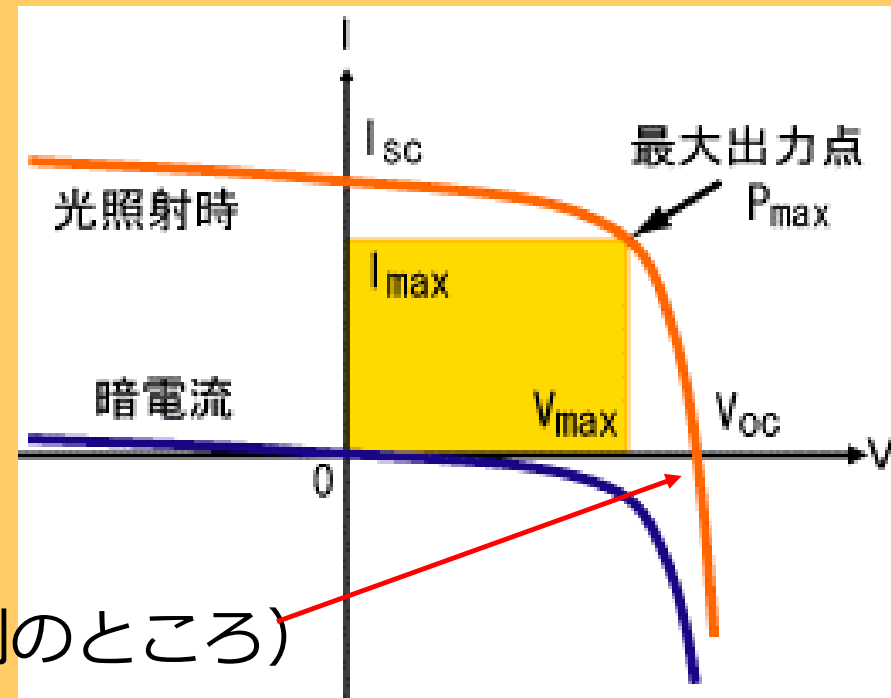
$$I = I_{sc} - I_0 [\exp\{e(V + R_s I) / kT\} - 1] - (V + R_s I) / R_{sh}$$

光照射のとき  $I_{sc}$

暗電流のとき

(内部抵抗を無視して)

電流なしの状態  $I = 0$  (右側のところ)



$$0 = I_{sc} - I_0 [\exp(eV/kT) - 1] \quad (V = V_{oc} \text{ の状態})$$

$$\rightarrow V_{oc} = (kT/e) \ln(I_{sc}/I_0 + 1) - \exp \text{の逆関数}$$

$V_{oc}$ : 開放電圧     $I_{sc}$ : 短絡電流

● バイアス電圧がゼロ(入り口): **短絡電流 密度**

△ 電流は流れにくい, 電圧は増加する

● 電流がゼロの点(出口): **開放電圧**

電流 \* 電圧 (J\*Vカーブ) のところに,

**最大出力点**がある — 曲がったところ

曲線因子  $FF = J_{max} * V_{max} / J_{sc} * V_{oc}$



$\text{mA/cm}^2 * \text{V} = \text{mW/cm}^2$

$P_{max}$ で, 最大になる。

## エネルギー変換効率 PCE

照射光のエネルギー  $P_{inc}$

$$PCE (\%) = 100 * J_{max} * V_{mac} / P_{inc}$$

測定のため

100mW/cm<sup>2</sup>の光源をつかう ( $P_{inc}=100$ )

$$PCE (\%) = J_{max} * V_{mac} = J_{sc} * V_{oc} * FF$$

**類似太陽光 AM1.5G (100mW/cm<sup>2</sup>)**

普通の太陽光  $\theta \sim 48^\circ$ に近いとき

$$= 1 \text{ kW/m}^2$$

# ◆ 動作温度で、出力電圧が低下する現象

太陽電池の基礎… (5.3節) 後日また取り上げる

(開放端) 電圧は 温度が上がると減少

$$I_{sc} = I_0 \times [\exp(eV_{oc} / kT) - 1] \quad \checkmark$$
$$\approx AT^\gamma \exp(-E_{g0} / kT) \times \exp(eV_{oc} / kT) \quad \gamma \approx 3$$

$V_{g0} \equiv E_{g0} / e$  と書いて、温度で微分すると

$$\frac{dI_{sc}}{dT} \approx 0 \approx \underline{A\gamma T^{\gamma-1}} \exp[e(V_{oc} - V_{g0}) / kT]$$

$$+ \underline{AT^\gamma \frac{e}{kT} \left[ \frac{dV_{oc}}{dT} + \frac{V_{oc} - V_{g0}}{T} \right]} \exp[e(V_{oc} - V_{g0}) / kT]$$

$$\therefore \frac{dV_{oc}}{dT} \approx -\frac{V_{g0} - V_{oc} + \gamma kT / e}{T} \approx \underline{-2.3 \text{ mV} / ^\circ \text{C}}$$

**温度+30度で-70mV 減少** — 結構大きい

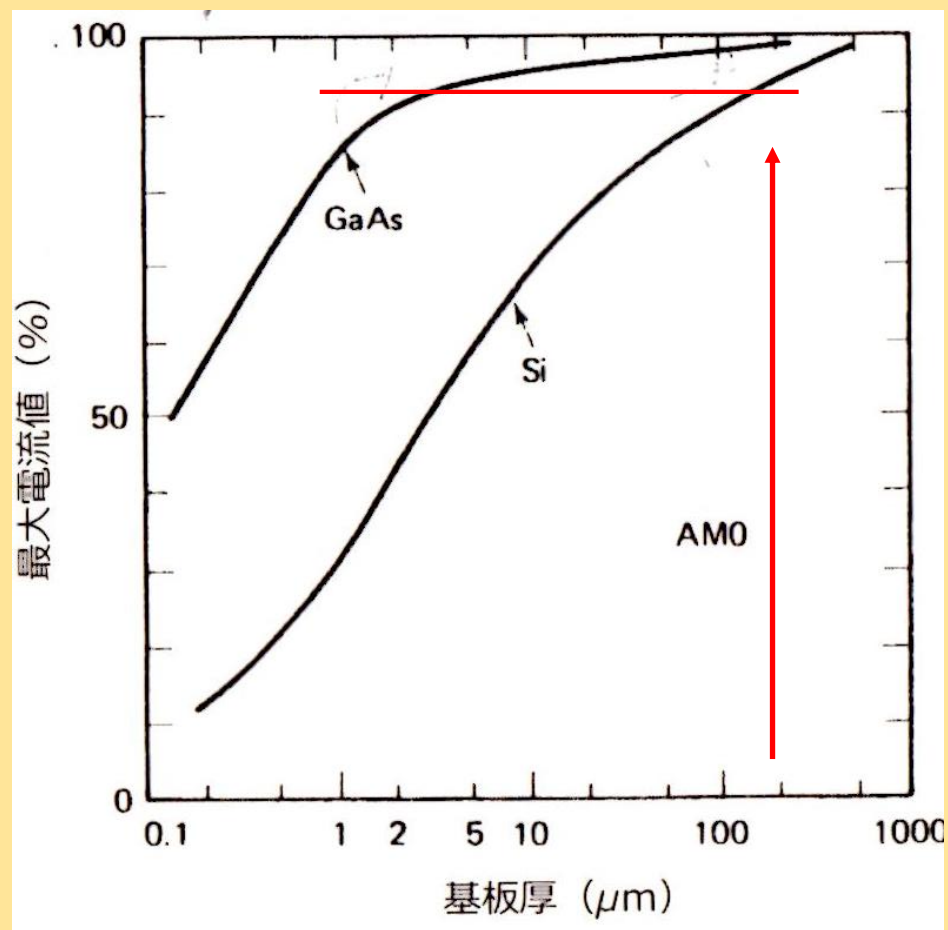
$V_{g0} \approx 1.2 \text{ V}$ ,  $V_{oc} \approx 0.6 \text{ V}$ ,  $\gamma \approx 3$ ,  $T = 300^\circ \text{C}$  における値

◆ 短絡電流のセル厚さ  
依存性 (太陽電池の... 5.4節)

\* **GaAs** 直接遷移によるので  $2\ \mu\text{m}$  程度でよい

\* **Si** 間接遷移で、遷移が遅い

$200\ \mu\text{m}$  厚みが必要





# 第4,5回講義 風力発電 (Wind Turbine)



風車(使っている)、オランダ

田中基彦 2015-2023年度

## 風力の利用について

第4, 5回 資料1 PDF

風力発電 約15 ページ

## 風力発電

第4, 5回 資料2-4 PDF

イギリスの風力発電 約11ページ

洋上風力発電の世界の動向 OHP

日本の風力発電 約11ページ

資料：<https://ja.wikipedia.org/wiki/風力発電>

2021年版を読む

ヨーロッパ, 中国, 日本の風力発電

# 第4回資料1

<https://ja.wikipedia.org/wiki/風力発電>

## ≡ 風力発電

文A 92の言語版 ▾

ページ ノート

閲覧 編集 履歴表示

出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia) 』

**風力発電**（ふうりょくはつでん）とは、**風**の力で**タービン**を回して**電気**に変換する**発電**方式である。**再生可能エネルギー**の一つ。

### 歴史 [編集]

イギリスでは1887年にグラスゴウのJ.ブライスが垂直風車により出力3kWの発電を開始したとされる。アメリカ合衆国では1888年にクリーブランドのC.F.ブラッシュが直径17m144枚のブレードからなる巨大な多翼風車で12kWの風力発電を1908年まで20年間使用されたとされる。1891年にはデンマークのアスコウ（Askov）でポール・ラ・クールによって風力発電研究所が設立され、風力発電で電気分解した水素と酸素で発電の実験が実施された<sup>[1]</sup>。日本では1949年に山田基博が北海道札幌市に(株)山田風力電設工業所を設立して風車の本格的製造を開始した。オイルショックを機に風力発電などの代替エネルギーへの関心が高まり、1973



風力発電用の風車群



### 再生可能エネルギー



# 第4回 資料2

<https://ja.wikipedia.org/wiki/イギリスの風力発電>

## ≡ イギリスの風力発電

文A 5の言語版 ▾

ページ ノート

閲覧 編集 履歴表示

出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

A ↔ あ

この項目「**イギリスの風力発電**」は翻訳されたばかりのものです。不自然あるいは曖昧な表現などが含まれる可能性があります、このままでは読みづらいかもしれません。（原文：[en:Wind power in the United Kingdom](#)13:57, 9 September 2019）  
修正、加筆に協力し、現在の表現をより自然な表現にして下さる方を求めています。[ノートページ](#)や[履歴](#)も参照してください。（2019年9月）

**イギリスの風力発電**では**イギリス**における**風力発電**について説明する。

イギリスは世界でも風力発電に最適な場所の1つで、ヨーロッパでは最適と考えられている<sup>[1][2]</sup>。2017年に風力発電はイギリスの発電の15%、2017年の最終四半期には18.5%を占めた<sup>[3]</sup>。陸上の風力発電は、発電技術に炭素原価が適用される場合、イギリスにおける発電技術のMWhあたり最も低い<sup>平均</sup>等化発電原価 (LCOE)になる<sup>[4]</sup>。2016年、風力発電はイギリスの発電において初めて石炭を上回り<sup>[5][6]</sup>、2018年の第1四



スコットランドにあるブラックロウ風力発電所(en)の風力タービン2基



# 第4, 5回 資料3

## 洋上風力発電所に関する世界の動向

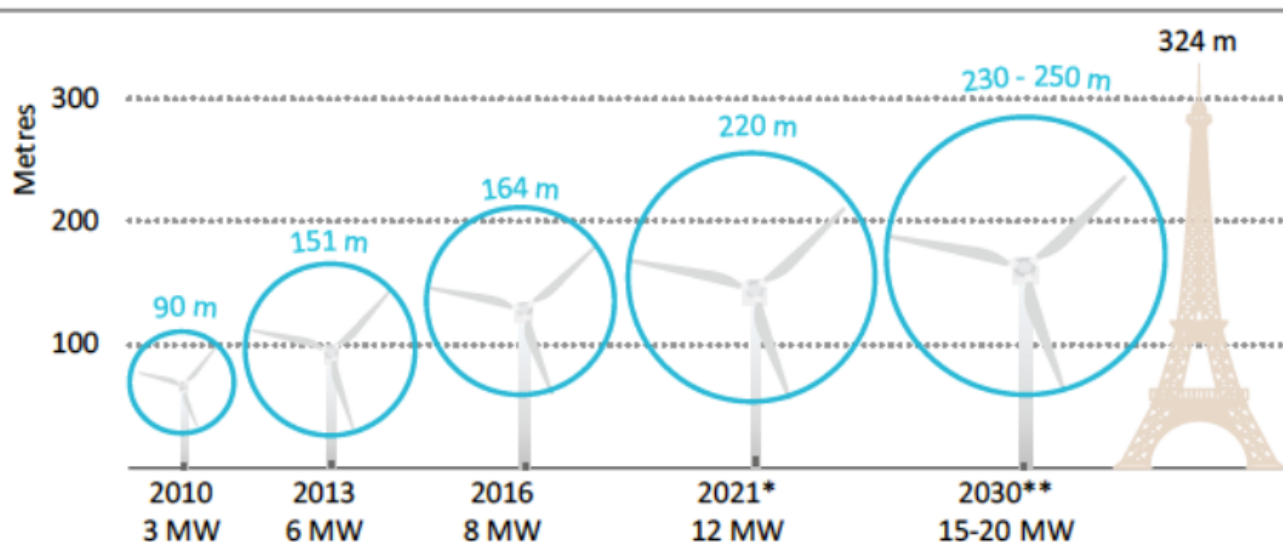
[https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/202106\\_OffshorewindInfo.pdf](https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/202106_OffshorewindInfo.pdf)

### 洋上風車の大型化



自然エネルギー財団

- 洋上風力発電機は大型化する傾向にある。
- 発電量の増加が期待されると同時に、kWあたりの基礎単価、建設単価、メンテナンス作業単価も減少する。



商業利用可能な洋上風車の推移



# 第4, 5回 資料4

<https://ja.Wikipedia.org/wiki/日本の風力発電>

## 日本の風力発電

文 1の言語版 ▾

ページ ノート

閲覧 編集 履歴表示

出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

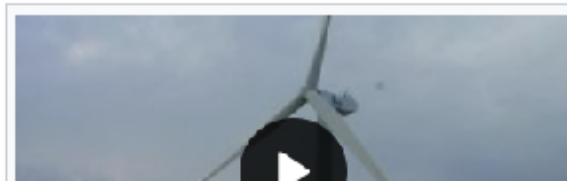
**日本の風力発電**（にっぽんのふうりょくはつでん）では、**日本の風力発電**について説明する。日本では吹米諸国に比して普及が進んでいない。理由として、台風や地震に耐える風車を施設すると欧米と比較しくコストが上がることや、常に強い風が吹きかつ大量の風車を設置できるだけの土地の確保が困難なこと、風力発電に適した地域（北海道、東北、九州）が電力需要の多い地域から遠いことなどが挙げられる。<sup>[1]</sup>

日本の電力会社は風力発電事業に消極的であるが、自治体による「自治体風車」や市民グループによる「市民風車」等のプロジェクトの取り組みが進んでいる<sup>[2]</sup>。

2006年に地図記号の1つとして風車が追加された<sup>[3]</sup>。

## 開発・普及状況 [編集]

日本国内の風力発電の累計導入量は2021年末時点で2,574基、総設備容量は4,581MWであり<sup>[4]</sup>、標準的な原発（100万kW前後）4.5基分である。1基あたりの出力を見ると、2006年度以降では設備容量1MW以上の機種が大部分を占めるようになった<sup>[5]</sup>。主要な風力発電会社は、**ブー**



第6回大学院講義

# 近い未来のエネルギー

いま変わり行く未来の姿

中部大学・大学院工学研究科 客員教授 田中基彦

[http://photon.isc.chubu.ac.jp/Energy\\_of\\_mirai.pdf](http://photon.isc.chubu.ac.jp/Energy_of_mirai.pdf)

# はじめに

[目次へ](#)

私たちは豊かな地球上で、ネットの情報を受けとり、チャットを楽しみ、コンピュータにより決済を行う。海外へ仕事や旅行のため、飛行機にのって出かける。EV(電気)自動車、新しいFCV(水素)自動車が国道を走る21世紀である。

しかし、石油・天然ガスがなくなり、マーケットから姿を消すのは今から50年(～100年)のことか？それは地下資源である石油、天然ガス、原子力エネルギーが有限資源のためである。石油文明が始まって2世紀目のことであるが、アメリカ、ロシア、アジア、ヨーロッパ、アフリカなど固有の問題ではない。

そのとき独裁者が台頭して統制経済を行う国、それと対照的に、理性により正しい道を選ぶところもある。後者では、未来エネルギーの道標がはっきり記されている。ここでは、近い未来の人たちがどう考え対処すべきか、行動の方法を知ろう。

## ◆ 自然に湧き出す「未来のエネルギー」

風力発電の優位(kW当りのコスト)は, 世界で変わらない。  
主要エネルギー源の大きさ (未来の予測は右側に)

### 1. 風力発電 *Wind factory* 5割

風力発電は単価kWあたりの設備費, コストが安い。

1日24時間で運転が可能。数百MW規模の風力発電

### 2. 太陽電池 *Solar power* 3割

潤沢なシリコン太陽発電。2400 H/年の稼働(太平洋側)

→ GaAs, CdTe の太陽電池は, ガリウム(半導体)が枯渇

### 3. 水力発電 *Hydraulic power* 1割

小さい水力発電(KWからMW程度) を活用する

≫ 水力発電の良いところ: 貯蔵できること



# 風力発電, 太陽光, 水力発電



## 1) 風力発電

a) 12 MW (2MWx6)

b) 50 MW (3.2MW x16)

瀬棚町, 北海道



## 2) 太陽光発電

70,000 solar panels, generates 14 MW of solar power, Nevada, United States



## 海上風力 発電

京都大学など  
(カーボンファイバ)

広い海洋を  
活用する



## 3) 水力発電

黒部川第4発電所、富山  
小さな水力発電も多く存在する



## ◆ 風力発電, 太陽発電: 長所と短所

### ● 風力発電

[目次へ](#)

1日24時間, 運転できる可能性がある (A)

一部だけを休止して, システムを交換ができる

— 風がよわいと休止 <- 地域連携で風力を確保する

— 騒音被害の問題 -> 沖合風力発電を活用する

### ● 太陽発電

1日 8-12時間程度で, 運転時間は決まる

緯度, 季節により決まる (B)

— 夜は休止, 昼間でも曇り/雨では休止

— 熱い機器のため, 効率が下がる

太陽電池の特性 -- 太陽熱のため, 30%はダウン

# 近い未来のエネルギー

[目次へ](#)

人類の未来エネルギーである「風力, 太陽光, 水力発電」は「再生可能エネルギー」と言われる。これらを軸に,

1. 未来エネルギーの形, 2. 人類活動のためのエネルギー,
3. 省エネルギーの移動手段, 4. 風力, 太陽発電どうしのリンク,
5. 鉄とレアメタル等の消費量の問題。そして結論。

## <<総まとめ>>

未来エネルギー社会は, 自然世界では十分に可能である。

1. 風力発電は, 電磁誘導で電気に変換, 風力 -> 機械力の利用。
2. 太陽光発電は, 太陽電池により蓄電の上に利用する。
3. 水力発電。その他, バイオマスなどを活用する。

石油, 天然ガス, 原子力は有限。未来のエネルギーを選ぶ。



## 第7回目以降

(無機)太陽電池

シリコン半導体, II-VI属半導体

III-V族半導体, ほか

有機太陽電池

有機増感太陽電池

英語論文を読む 解説と読解法