

## 第17回R&Dシンポジウム 基調講演

# 「自然エネルギーの活用を目指す エネルギーマネジメントの現状と展望 ～太陽光発電システムを中心として～」

早稲田大学 理工学術院 教授  
若尾 真治 氏

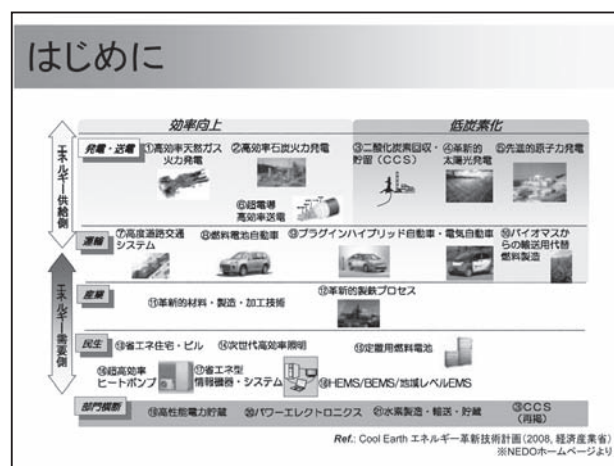
1989年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1993年同大学院理工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）。2006年早稲田大学理工学術院教授、現在に至る。主として、電磁エネルギー機器を対象とする数値解析技術、太陽光発電システムの設計・運用最適化技術に関する研究に従事。内閣府総合科学技術会議評価専門調査会「太陽エネルギーシステムフィールドテスト事業」評価検討会委員、経済産業省総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会電力安全小委員会委員、日本太陽エネルギー学会理事など。2008年電気学会学術振興賞・論文賞受賞。



本日のシンポジウムでは、「環境負荷の軽減」というキーワードが掲げられています。その環境負荷軽減にはさまざまなアプローチがあると思いますが、私からは「自然エネルギーの活用を目指すエネルギーマネジメントの現状と展望」というタイトルで、普段私が携わっている太陽光発電システムを中心にお話いたします。

この図は「Cool Earth エネルギー革新技術計画」の報告書にある図です。2050年までの温室効果ガスの50%削減を目標に、重点的に取組むべきエネルギー革新技術がまとめられています。上半分がエネルギーの供給側の技術、下半分がエネルギーの需要側の技術、左側がエネルギーの利用や発電の効率向上、右側が低炭素エネルギーの利用拡大というように分類されています。

例えば①の高効率天然ガス火力発電については、JR東日本では車両が利用する電力の60%は自営の発電で賄われていますが、その発電方式としてガスタービンと蒸気タービンのコンバインドサイクルという高効率な発電方式に切り替えが行われており、低炭素社会に向けて非常に貢献されていると聞いています。そのほか、エネルギー需要側においては住宅やビルの省エネルギー技術が、また低炭素エネルギーの利用拡大においては、電気自動車もキーテクノロジーとして挙げられています。



Ref. Cool Earth エネルギー革新技術計画(2008, 経済産業省)  
※NEDOホームページより

太陽光発電は光のエネルギーを半導体デバイスに照射し、電気エネルギーに直接変換します。この太陽光発電はエネルギー供給側の技術に位置づけられておりますが、発電した電力は負荷に供給されるわけですから、需要側の技術とも関連性があります。供給側と需要側の両者の関係を視野に入れ、エネルギーマネジメントという視点でいくつかお話しいたします。

## 目次

～太陽光発電システムにおけるエネルギーマネジメント～

1. 背景と国内外の動向
2. 太陽光発電システムの特徴と概要
3. 大量導入時の課題と技術動向  
・実証プロジェクト事例や研究事例
4. 今後の展開

まず太陽光発電システムが高い注目を集めるようになった背景と国内外の動向について説明します。そもそも太陽光発電とはどのような特徴があるのか。

また現在日本において高い導入目標量が掲げられていますが、大量に導入されたときにはさまざまな問題点が考えられ、その事に対する課題を見据えての実証プロジェクトや技術動向を紹介し、今後の展開へとまとめてまいります。

## はじめに(国内の動向)

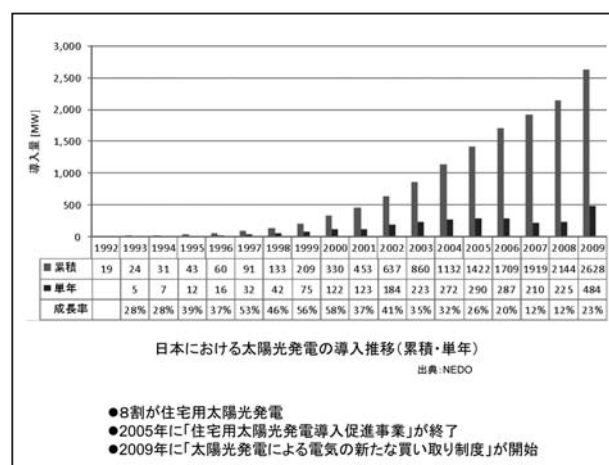
### 「低炭素社会づくり行動計画」\*

- ・ 太陽光発電は、再生可能エネルギーの中でも特に潜在的な利用可能量が多く、国産エネルギーとして重要な位置を占める可能性がある。
- ・ 太陽光発電の導入量を2005年基準の1.4GWに対し、2020年に10倍、2030年に40倍とすることを目標。
- ・ 3～5年後に太陽光発電システムの価格を現在の半額程度に低減することを目標。

\*平成20年7月29日閣議決定

※ 平成21年4月10日に政府・与党会議、経済対策閣僚会議合同会議が公表した「経済危機対策」では、国として2020年頃に20倍程度の約2800万kWの導入を目指すとの方針が示された。

最初に背景と国内外の動向についてお話しします。太陽光発電が高い注目を集めるようになった理由のひとつに考えられるのが、平成20年に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」です。この報告書には太陽光発電は「再生可能エネルギーの中でも特に潜在的な利用可能量が多く、国産エネルギーとして重要な位置を占める可能性がある」と明記されています。その中で導入目標値は2005年を基準に、15年後には10倍、さらに25年後には40倍と見込まれており、太陽光発電を推進していこうという計画になっています。当時は福田首相でしたが、その後の麻生内閣においては、15年後の目標が、10倍から20倍へ引き上げられています。

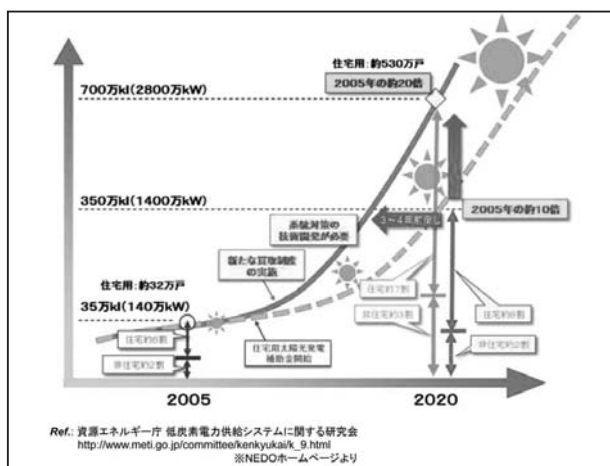


次に、この「低炭素社会づくり行動計画」が出る以前の日本の太陽光発電の導入状況をグラフで示します。2本の棒グラフの左側が累積の導入量、右側のグラフが単年度ごとの導入量を示します。まず、特徴としては導入量の8割が住宅用です。太陽光発電は大規模集中的なイメージもあるかもしれませんが、日本では、住宅用のように非常に小規模なものが分散している状況であることが特徴です。

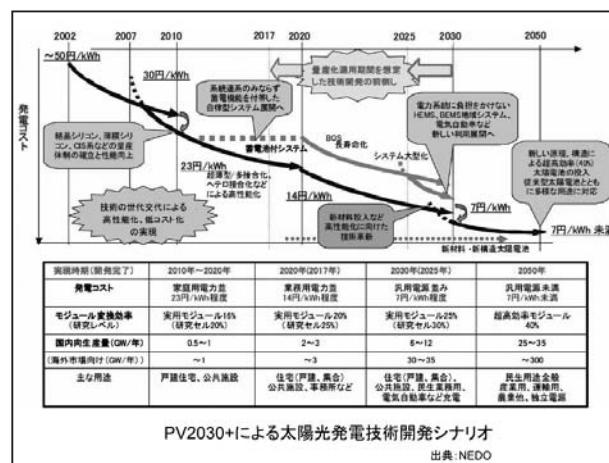
# Special feature article

グラフの2005年のところで、単年度の導入量がいったん減速しますが、要因として2005年に住宅用の太陽光発電の導入促進事業という補助が終了したという背景があります。2009年からは太陽光発電による電気の新たな買い取り制度が開始され、再び単年度の導入量が上昇しています。これらの推移からもわかるように、まだ太陽光発電産業が自立している段階とは言えず、何かしらのサポートを得ながら自立に向けて頑張っている分野であると言えます。

では今後の目標はどのように掲げられているかと言いますと、2005年を基準に2020年には新築持家住宅においては7割以上が太陽光発電を設置するという非常に大量の導入目標になっています。



図のように2005年の20倍を考えると約530万戸という数値が目標値となります。これは出力にすると28ギガワットという容量となります。非常に大きな数値でありわかりにくいのですが、日本の電力会社10社の2009年時点の発電容量は204ギガワットですので、今から10年後には太陽光発電が全体の10%を超えるような量となる目標が、現段階で立てられているという事になります。一方、現状での発電コストはといいますと、代表的な資料に基づく方法から算出すると、キロワットアワーあたりの住宅用は37円から46円となり、現在一般的な住宅用電力料金が23円前後ですので、6割以上は高めと言えます。



これはNEDOが2009年に発表した太陽光発電に関する技術開発のロードマップで、今後の技術革新の推移と目標を掲げた表です。時間経過とともに、発電コストが下がっていくシナリオが示されています。太陽電池の製造における低コスト化も重要であり、また寿命が長ければライフサイクルの中で発電できる電力量が増え、発電コストの低減にもつながっていきます。技術を積み重ね、2010年代の間には少なくとも住宅用電力料金と同程度にし、さらに技術開発を進めていくことで、最終的には7円/kWh程度を目指し、現状の5分の1から6分の1への発電コスト軽減を目標に掲げています。

そもそもなぜ太陽光発電が非常に高い注目を集めているかと言うと、その背景としては、まずひとつは皆さまよくご存知のことと思いますが、低炭素社会に向けた貢献という面があると思います。地球温暖化にCO<sub>2</sub>が少なくとも何らかの影響を及ぼしているということが言われております。地球温暖化の防止に向けて、太陽光発電のような低炭素エネルギーによる発電技術の開発を行うことは意義がある、ということが理由としてひとつにあげられると思います。

## なぜ？

- 低炭素社会に向けた貢献  
(地球温暖化の防止)
- エネルギー源の多様化  
(エネルギーセキュリティの向上、  
化石エネルギーの枯渇)
- 新エネルギー産業の創生  
(産業競争力の向上)

この温暖化の問題以外に太陽光発電が注目される背景としては、エネルギー源の多様化への貢献が考えられます。日本は非常にエネルギー資源が少ない国であり、しかも化石エネルギーの特に石油燃料に依存している割合が高いと言えます。一種類の資源への依存が高い状況では、その資源に何かあったときには非常に脆弱になることが考えられます。エネルギーのセキュリティを向上させるうえで、エネルギーの選択肢を増やしておくことは非常に意味のあることです。化石エネルギーは有限であり、いつかはなくなることとあわせて考えると、国産のエネルギー源の開発を試みることはとても意味のあることと言えます。

将来、使用したいエネルギー量と使えるエネルギー量のギャップを発生させないためにも、化石エネルギーとは違うエネルギーを開発する必要があり、その1つの候補として自然エネルギーは有力と考えられます。

3番目の理由ですが、技術立国日本として、新エネルギー産業の創生の可能性があると考えています。国際競争力の向上という観点です。

## はじめに(海外の動向)



まず現在の海外の動向ですが、全世界の太陽光発電の導入量は2009年の段階において、既に20ギガワットに上っており、2010年には30ギガワット程度まで伸びるのではないかとされています。世界の導入量のトップは現在ドイツですが、2005年に日本は助成制度が終わり一旦減速をした、丁度その時期に日本はドイツに抜かれ、1位の座を奪われています。さらに2007年から2008年にかけてはスペインに抜かれ、現在3位になっています。

次に導入目標量についてですが、日本と同様、海外でも高い導入目標量が掲げられています。

### 再生可能な資源からのエネルギー使用の増進に関する指令におけるEU加盟国の2020年目標値

|         | 最終エネルギー消費量に占める<br>再生可能エネルギーの割合[%] |      |      | EU指令による<br>国別目標値 |
|---------|-----------------------------------|------|------|------------------|
|         | 2001                              | 2003 | 2005 |                  |
| ベルギー    | 1.3                               | 1.6  | 2.2  | 13%              |
| ブルガリア   | 7.1                               | 9.0  | 10.6 | 16%              |
| チェコ共和国  | 2.4                               | 4.2  | 6.3  | 13%              |
| デンマーク   | 12.3                              | 14.9 | 17.0 | 30%              |
| ドイツ     | 3.9                               | 4.4  | 5.8  | 18%              |
| エストニア   | 15.3                              | 14.9 | 18.0 | 25%              |
| アイルランド  | 2.2                               | 2.2  | 3.0  | 16%              |
| ギリシャ    | 6.5                               | 7.2  | 7.5  | 18%              |
| スペイン    | 9.1                               | 9.4  | 7.6  | 20%              |
| フランス    | 10.9                              | 9.9  | 9.5  | 21%              |
| イタリア    | 5.2                               | 4.4  | 4.8  | 17%              |
| キプロス    | 2.5                               | 2.5  | 2.9  | 13%              |
| ラトビア    | 34.4                              | 31.9 | 35.5 | 40%              |
| リトアニア   | 15.3                              | 15.4 | 15.0 | 23%              |
| ルクセンブルク | 0.7                               | 0.8  | 0.9  | 11%              |
| ハンガリー   | 2.6                               | 4.7  | 4.3  | 13%              |
| マルタ     | 0.0                               | 0.0  | 0.0  | 10%              |
| オランダ    | 1.6                               | 1.8  | 2.4  | 14%              |
| オーストリア  | 23.8                              | 21.8 | 23.0 | 34%              |
| ポーランド   | 6.9                               | 7.0  | 7.2  | 15%              |
| ポルトガル   | 20.5                              | 21.5 | 17.0 | 31%              |
| ルーマニア   | 13.7                              | 15.4 | 19.2 | 24%              |
| スロバキア   | 16.1                              | 14.3 | 14.9 | 21%              |
| スロベニア   | 6.2                               | 5.2  | 6.9  | 14%              |
| フィンランド  | 27.9                              | 26.7 | 28.5 | 38%              |
| スウェーデン  | 40.0                              | 33.9 | 40.8 | 49%              |
| 英国      | 0.9                               | 1.0  | 1.3  | 15%              |

Ref: "RENEWABLE ENERGY SOURCES IN FIGURES" (2008, BMU), Directive 2009/28/EC (NEDOホームページより)

### 欧州

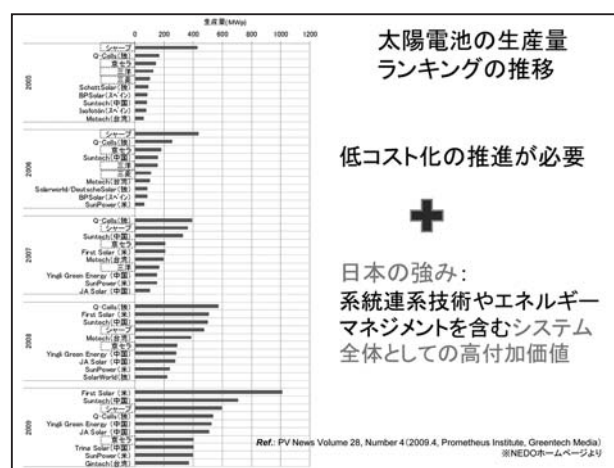
2020年までに、EU全体のエネルギー消費全体に占める再生可能エネルギーの比率を20%に引き上げることで合意。……2007年3月 欧州理事会

2020年には180TWhが太陽光発電によって供給されると予測。これは2020年時点の欧州の電力需要予測(3,914TWh)の約5%に相当。

### 米国

New Energy for America計画：電力消費量に占める再生可能エネルギー由来の電力量の割合を、2012年までに10%、2025年までに25%に引き上げる。

欧州では2020年までにEU全体のエネルギー消費全体に占める再生可能エネルギーの比率を20%まで引き上げようという目標や、あるいは2020年には電力需要として予測されている量の5%相当を特に太陽光発電で賄おう、という目標があります。他には、New Energy for America計画という名称の計画があり、こちらは電力消費量に占める再生可能エネルギー由来の電力量の割合を2012年までに10%、2025年までには25%に引き上げようという内容になっています。このように、いずれの国も非常にアグレッシブな目標を掲げて国際競争をしている状況です。



このような状況において、日本の相対的な位置の変化ですが、太陽電池の生産量のランキングを見てみると、2005年の段階では生産量の世界トップ5社中、4社に日本のメーカーが入っていました。それ以後、徐々に抜かれ、現在ではトップ5社に1社だけしか入っていない現状です。

また太陽電池の世界シェアに関しても、2005年には約50%でしたが、2009年には14%まで下がっている状況です。この理由の1つには価格競争で非常に辛い戦いを強いられていることがあげられます。現在世界シェアトップのファースト・ソーラー社は、カドテル系という非常に安価で高効率な太陽電池を生産しており、また2位の中国のサンテックという会社は、人件費の安さという強みがあり、共に価格競争に優位性をもって挑んでいると言えます。そういった意味では、日本でも今

後低コスト化の推進が勿論必要と考えます。しかしながら、それだけでは限界があります。そこで日本の強みは一体何であるかと考えた際、非常に高品質な電力を安定供給できるという高い技術力があることと考えます。例えば太陽光発電にしても系統連系を行うことや、さまざまなエネルギーマネジメントをして、高付加価値を備えて戦いに挑むというような視点が非常に重要になってくると思われます。

いままで背景や、国内外の動向について述べてきましたが、この太陽光発電とは、どういうものであるかを簡単にご説明します。

## 太陽光発電の特徴と概要

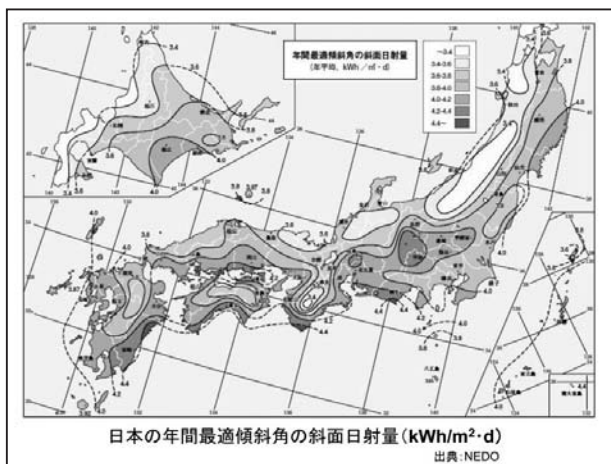
長所: 非枯渇エネルギー

運用時にCO<sub>2</sub>や熱の排出が無く、クリーン  
偏在性が無く、どこでも利用可能  
可動部が無く、保守が容易  
オンサイト発電が可能(送電コスト小)

短所: エネルギー密度が低い

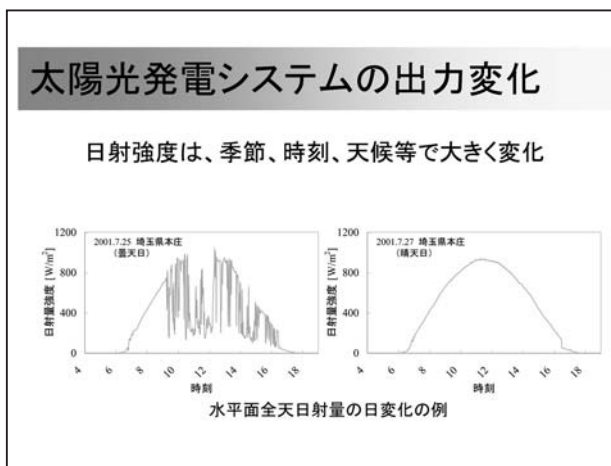
出力が時間的に変動する

長所としては非枯渇エネルギーであり、製造時には当然CO<sub>2</sub>が発生しますが、その後の運用時にはCO<sub>2</sub>や熱の排出がなく、非常にクリーンなエネルギーと言えます。また石油など化石燃料はとれる場所が限られていますが、太陽光発電は、日が当たっているところであればどこでも電気をつくれるので、偏在性が少ないと言えます。このように何処でもつくれるということで、使いたいところのすぐ隣で発電でき、送電コストの面でメリットが得られるケースも出てきます。また、他の自然エネルギーによる発電と比較し、可動部分がない為、相対的には保守が容易であるということがあげられます。

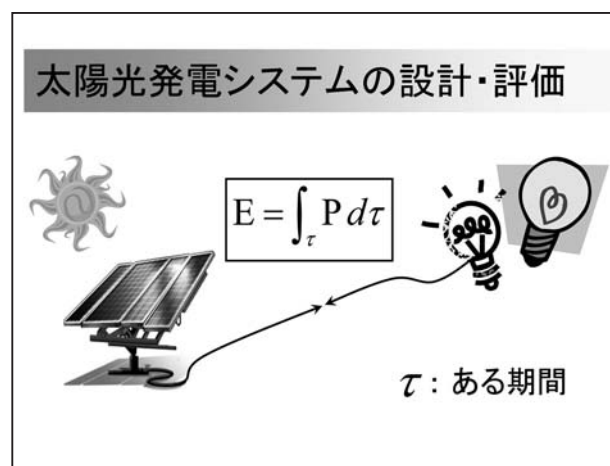


日本の日射状況はどれぐらいかをNEDOのガイドラインからの抜粋図で説明しますと、山梨や長野、静岡、和歌山、高知、宮崎などの県で特に日射状況の良い所があります。一般に、出力1キロワットの住宅用太陽光発電の設備を使うと1年間で1,000キロワットアワーくらいの電力量が得られます。日本家庭の年間消費電力量の平均が約4,200キロワットアワーと考えられるので、大体3キロワットから4キロワットの設備が1軒に相当しているという計算になります。

では、このように良いことばかりかというと、いくつか短所もあります。1つは非常にエネルギー密度が低いことがあげられます。他の発電方式と比較して、広い面積が必要になります。また2つ目としては、出力が時間的に変動することがあげられます。



図は実際の実測データの1例になります。雲ひとつない晴れの日においては、朝日が出て日が沈むまで、太陽の高度に応じて安定した出力が得られます。非常にイメージしやすい出力が得られます。これに対して、雲があるような日は極端な場合では図のような大幅な変動がみられるケースもあります。ただしこのケースは一箇所での実測データの話となります。面的な広がりを考えて複数個所での日射を合計した場合は、変動はならされることになります。



負荷には負荷の変動特性があり、この様に太陽光発電の出力にも非常に激しい変動がある場合には、2つの組み合わせだけでは両者のマッチングがとれない場合が出てきます。ある長さの期間において両者の合計値をほぼ等しくすることはできても、瞬時瞬時で常にマッチングさせることは不可能です。

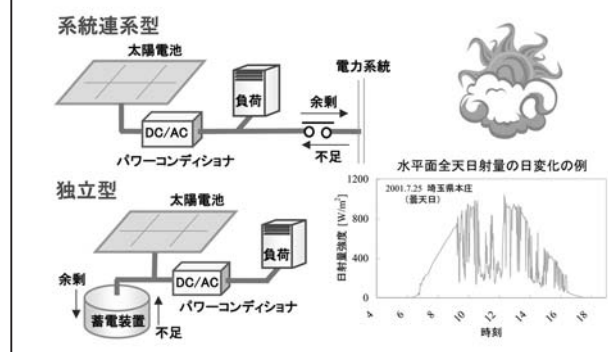
ネットワークという言葉は情報分野でも使われますし、エネルギー分野にもネットワークという言葉があります。しかし、同じネットワークという言葉でも、両者では意味に違いがあります。情報においては、例えばインターネットを利用している際に、「今日はちょっとアクセスが遅いな、あるいはちょっといま動画が止まったな」などの事象が起きた際に、勿論良いことではないのですが、比較的受け入れることができます。

## 太陽光発電システムの概要



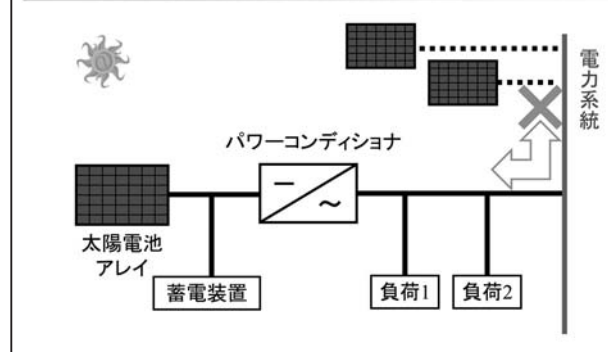
それに対して、エネルギーの場合は瞬時瞬時で完全にマッチングをしなければなりません。今ちょっと電気が止まったな、ということは許されません。その中で自然エネルギーを使う場合はどのようになるか、概要図からご説明いたします。アンコントロールな自然エネルギーがあり、これを負荷に供給する。負荷側も変動し、かつ経済的な合理性があり安定で品質も良い電力を受取りたい。すると自然エネルギーと負荷の2つだけではどうしても実現できないことは明らかであり、それを補完するコントロールな何かを組み合わせなくてはならない、と言うのが太陽光発電“システム”の基本的な考え方となります。この「システム」という単語は非常によく使われる言葉ですが、あらためて広辞苑を引くと「複数の要素が有機的に関係し合って全体としてまとまった機能を発揮している要素の集合体」とあり、このようなアンコントロールな自然エネルギーをコントロールなもので補完する事で、さまざまな目的を満たすようにバランスをとることが太陽光発電システムの基本的な考えとなります。

## 太陽光発電システムの形態



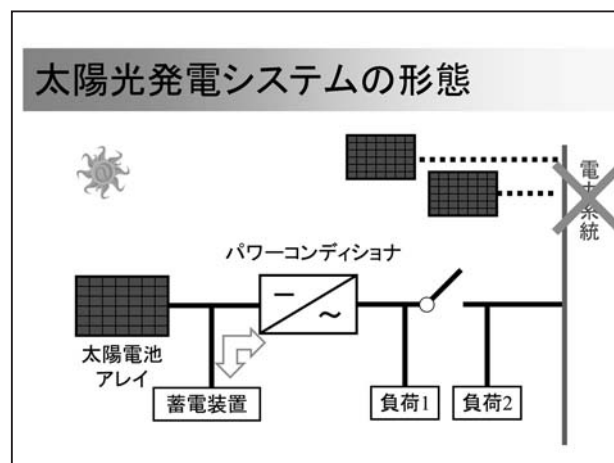
では、太陽電池と補完的なものを組み合わせた代表的な例をここに示します。1つは系統連系型です。太陽電池は直流電力を生じますが、負荷の多くは交流電力を使用しているため、直流から交流に変換するためのパワーコンディショナーが必ず間に入ります。この不安定な太陽光発電と負荷の間にはミスマッチがおきるので、発電電力が余ったときは電力系統に逆潮流し、また足りないときには系統から電力を受け取る必要があります。このように電力系統が補完の役割を果たしているのが日本のほとんどの太陽光発電の形態です。それ以外としては、系統に頼らずに蓄電装置をつけることによりミスマッチを補完する形態があります。太陽光発電の出力変動の補完という1点のみを考えればすむのであれば単純なのですが、他にもいろいろと考慮すべき事項を考えると、システム全体としてバランスをとることは難しい問題となってきます。

## 太陽光発電システムの形態



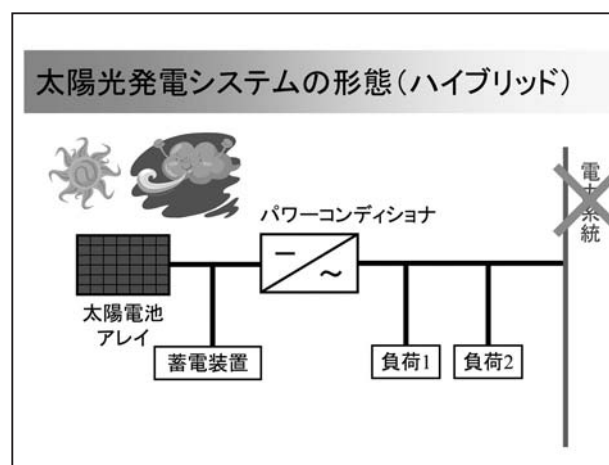
1つの例ですが、電力系統に太陽光発電の出力変動の補完を頼る場合、太陽光発電が大量に導入されてくると、その出力変動が電力系統における電力品質に影響を及ぼす可能性が近い将来考えられます。そうすると、発電電力の余剰分が生じた際に、太陽光発電のエネルギーを電力系統に逆潮流したいけれどもできないという状況が起きます。すなわち、日射エネルギーが降り注いでいるにもかかわらず、それを活用できないことになります。

このようなことを防ぐ対策として、蓄電池をつけることで余剰分を一旦吸収し、夜間などに有効活用する方法が考えられます。

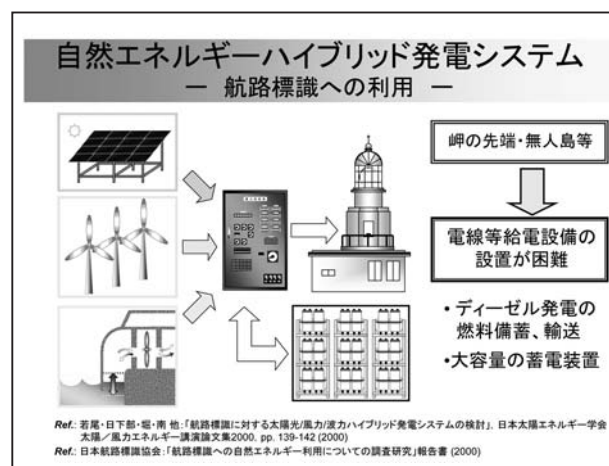


またこの蓄電装置自身には他の役割も考えられ、例えば電力系統に事故が起きたときに、特定の負荷にここからエネルギー供給するなどの役割が考えられます。前の事例ではこの蓄電池は余剰電力を引き受ける役目を担いますので、おなかをすかせている空の状況での待機がベストとなりますが、これに対して事故が起きるなどのケースで後者の役割を果たす為には、蓄電池内のエネルギーだけが頼りということになり、バッテリーマネジメントとしては極力おなかを膨らませている満充電の状態で待機させておく方が好ましいと言えます。

システムはダイナミックにいろいろな状況に応じて目的が変わりますので、複数の目的同士が相反することは多々あります。その中でどのようにしてシステム全体を視野に入れてバランスをとっていかうかということは簡単なようで、とても難しい問題です。



このようなコントローラブルな要素を組み合わせることでバランスをとろうという以外に別の考え方もあり、おもしろい事例をご紹介します。



図のように異なる自然エネルギーを組み合わせる考え方もあります。不安定なもの（太陽光、風力）と不安定なものを足すことにより安定化させる方法です。この応用例として、灯台などの航路標識への適用例があります。

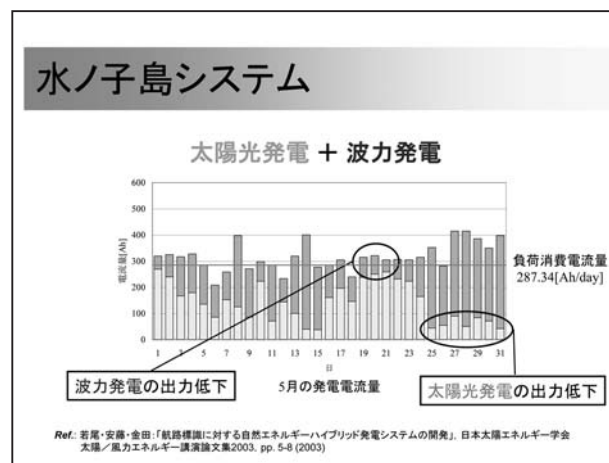
航路標識は主に岬の先端や無人島など、電力供給が非常に不便なところにあります。ディーゼルエンジンなどの自家発電で対応するか、もし自然エネルギーによる発電を活用しても長期の出力低下時のために非常に大容量の蓄電池を置く必要があります。ここでは、太陽光や風、波のエネルギーをうまく併用することにより、ある程度出力の安定化が出来、また必要な設備の小容量化ができるのではないかと試みた例をご紹介します。



大分県の水ノ子島の灯台のシステムです。海上から灯台に向かって伸びている建造物が波力発電の設備です。灯台横の建物の屋根部分にあるのが太陽電池パネルです。写真を見れば、ディーゼル発電を行うにしても、その燃料供給には大変な労力を必要とすることが容易に想像できます。



波力発電では、波が打ち寄せて押し上げられた空気が室内のタービンを回し、発電が行われます。屋根の太陽電池パネルの発電と合わせて、負荷への電力供給が行われています。



この水ノ子島のシステムで、データをとった結果がグラフにあります。横軸が日付を示し、縦軸が発電電力量です。また、グラフは波力発電の出力および太陽光発電の出力の内訳も示しております。天気がよくて波が穏やかなときは太陽光発電が頑張る、それとは逆に天気が悪いけれども、海が荒れているときは、波力発電が頑張る形となり、両者を併用することで合計出力がうまく平滑化されていることが分かります。不安定なものとは不安定なものを足すと、場合によってはさらに不安定になるというケースもあります。ご紹介した例は過去のデータを詳細に分析してシステム設計を行った結果、出力の平滑化を達成した事例です。

では、このような太陽光発電を大量導入していくと、今後どのような課題が新たに出てくるか、またそれに対してどのような技術開発が必要になるか、それを踏まえて現在どのような実証プロジェクトが行われているかなどについて紹介していきます。

## 太陽光発電の大量導入時の課題

- 電圧変動(主に配電系統)
- 単独運転の課題
- 周波数調整容量の不足(需給調整)

……など

大量導入時の課題として、例えば配電系統の電圧の変動や単独運転、需給調整の問題などがあげられます。いくつかのプロジェクトの事例を紹介しますが、事例1としてこれは群馬県の太田市で行われましたプロジェクトの例です。

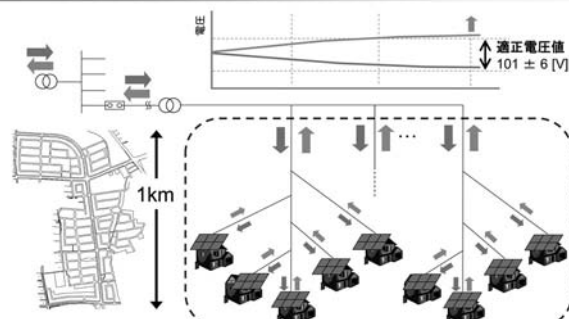
### NEDO 集中連系型太陽光発電システム実証研究



Ref: 集中連系型太陽光発電システム実証研究(成果報告書), H20, NEDO

限られた区域のほとんどの家が集中的に太陽光発電をつけて電力ネットワークに連系しているケースです。さきほど2020年目標では新築持家住宅の7割以上に太陽光発電パネルがつくというお話をしましたが、まさしく日本中がこうになるイメージです。

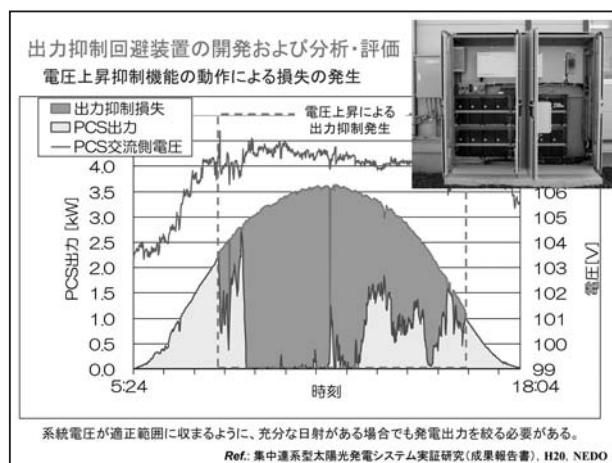
### NEDO 集中連系型太陽光発電システム実証研究



Ref: NEDO, <http://www.nedo.go.jp/activities/portals/p20550.html>  
Y. Ueda, K. Kurokawa, et al., Performance ratio and yield analysis of grid connected clustered PV systems in Japan, WCPEC4, Hawaii, 2006

この場合どのような問題が起きるかという、配電用の変電所から配電線が伸びていますが、各家庭へ電力が供給された場合、いまだ基本的に住宅は電力を受け取るだけの立場にあり、電力は変電所から住宅へ向けてただひたすら流れるだけでした。この場合、基本的には電圧は変電所の位置で一番高く、電力の流れに従いどんどん末端に向かい下がっていくといえます。

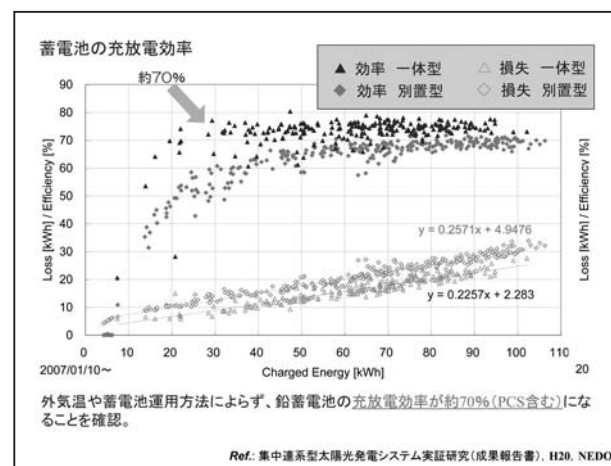
この受ける側ですが、適正な電圧というのがあり、101プラスマイナス6ボルトの間にはおさめましょうとなっています。電圧は下がるばかりですので、下がり過ぎがないよう、配電所の位置で電圧を調整しながら末端の電圧を範囲内におさめることとなります。しかし、先ほどの風景では、多数の住宅に太陽光発電がつくことになっており、この発電電力は当然この住宅内の負荷でも消費されますが、発電量が多い時には余剰分も発生します。余剰分が電力系統に逆潮流することで、今度はエネルギーの流れが逆転することになり、逆に末端のほうが電圧が高くなり、変電所に向かって下がっていくというような分布になります。この変電所には複数の配電線があり、太陽光発電が大量につく配電線もあれば、ついていない配電線もあり、電圧が上側にふれるものと下側にふれるものが混在することになり、どこか1点だけの調整で、うまく電圧管理できないようなおそれがあります。



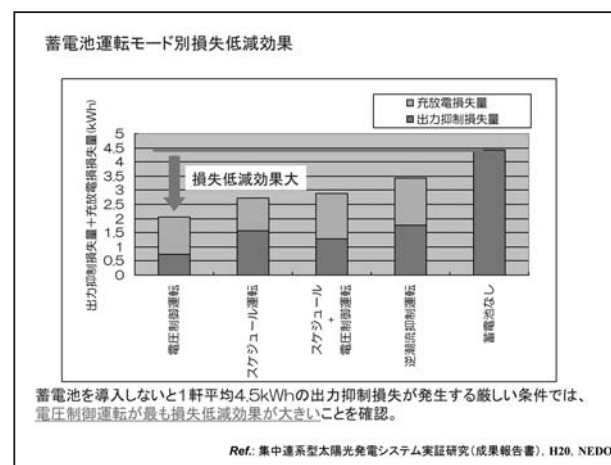
では実際に計測されたデータの1例から説明いたしますと、朝に太陽が照り始め、どんどん太陽光発電の出力が増加し、正午をピークに徐々に下がってくる状況を考えます。この過程で、余った電力はどんどん逆流しますので、配電線の末端の電圧は上がっていきます。そのまま適正電圧範囲を超えると、これ以上電圧は上げられないので、太陽光発電はどのような振る舞いをするかというと、出力を抑制します。出力抑制損失で示すように、発電を行うことができるにもかかわらず、絞り込みをして発電をしない部分ができることになり、その電力は活用されないこととなります。夕方になり日が陰り始めると余剰電力の逆潮流は減り、またもとの状況に戻る様子が示されています。本来は太陽光のエネルギーがもっと利用できたのに、出力抑制損失に示す部分が有効活用されないということであり、言い換えると何のために太陽光発電を入れたかわからないということになると言えます。

このプロジェクトでは、このような電圧上昇に起因する出力抑制損失部分のエネルギーを、各家庭にバッテリーを置いていったん吸収しようと考えました。その吸収した電力を夜間に放電することで有効活用しようということです。ただし、バッテリーを利用する場合に気をつけなくてはならないのは、一旦充電して、次に電力を取り出す際に充放電損失が発生しますし、その充放電の仕方によっては、バッテリーの寿命に悪い影響を与えることもあります。

では、マネジメントにおいて一番良い方法を検討した次の実証例がありますので紹介いたします。



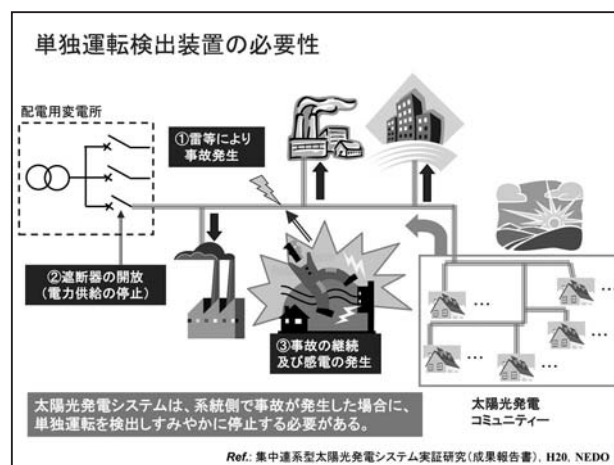
鉛蓄電池を用いた場合、約70%の充放電効率でした。これは先ほどのパワーコンディショナーも含んでの充放電効率になりますが、約3割の損失が発生することになります。



ではこの充放電損失をふまえたうえで蓄電池の適切な運転方式を考え、最終的に検討した例がこのようになります。

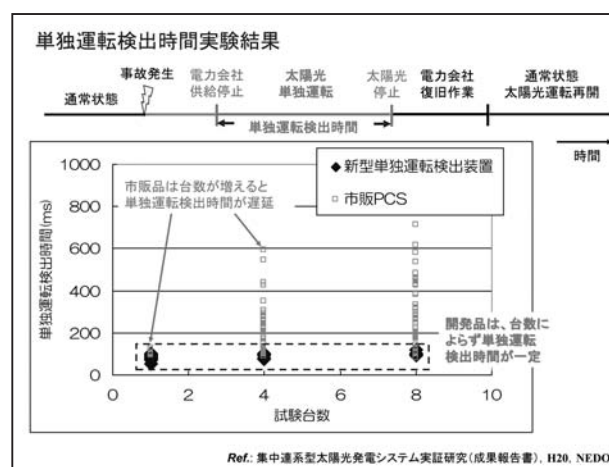
これらの運転方式は実証研究で試されており、蓄電池がないときは大きな出力抑制損失量が発生していることが分かります。電圧上昇により、切り捨てざるを得ない太陽光発電電力量が棒グラフの出力抑制損失量で示す部分です。これに対して、蓄電池を活用し様々な運転方式を実施すると、新たに充放電損失を伴うものの、総計として損失が下がるといえます。

この実証研究を見ると、電圧だけを見て最低限の充放電を行う電圧制御運転が、充放電損失が一番少なく効率的といえます。しかしこの運用では天候不順等が続くとバッテリーが長い期間空に近い状態が続くことが考えられ、その場合はバッテリー自体の寿命に悪影響を及ぼすことが考えられます。このことから充放電量を最低限にするという1つの目的だけでチューニングすると、一方では設備面でトラブルを招く可能性があるといえます。そこで、スケジュール運転方式など、様々な運転方式が検討されています。



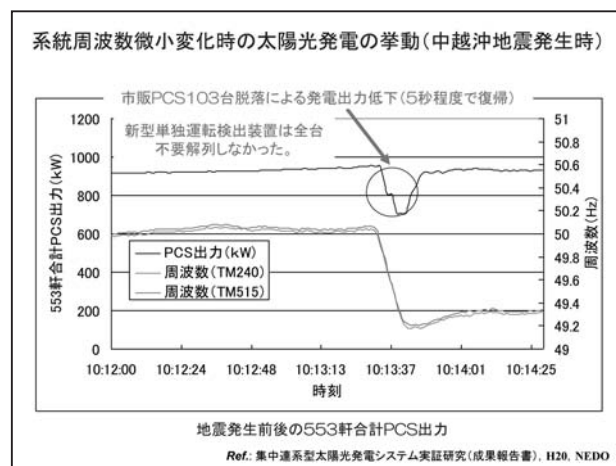
いままではエネルギーマネジメントについての1例についてお話ししました。もう1つの話として、太陽光発電が大量導入され電力インフラとしての役割をこれまで以上に担っていく場合に、いままで考えなくてよかったような要件を考える必要がでてきます。例えば、電力系統において何か事故が起こったときの事故検出について考えてみます。この場合、配電用変電所の遮断器が開放され、本来であれば停電となる状況になっているとします。もしここで太陽光発電が運転を継続すると、

場合によっては、配電線は電気が生きた状況となるおそれがあります。例えば、太陽光発電電力と負荷とが絶妙にバランスが取れているような状態です。そうした場合、事故の復旧に取組む作業者が感電するというようなおそれなども考えられます。この様な事を避けるためには、太陽光発電に課される役割として、「事故」と認知したら、すぐにこれを切り離しなさい、という要件があります。さきほどバランスがとれている状況と説明しましたが、能動的に信号を出してこのバランスを崩すことにより、「事故」であることを認識して切り離すという機能が太陽光発電には備わっています。しかし、将来的に多数の太陽光発電が電力系統に連系されると、それらの信号が干渉する可能性が出てきます。本来は1足す1が2になるところですが、事故時に信号の位相がずれてキャンセルされていると、有効な検知ができないのではないかという問題が発生します。



いままでのパワーコンディショナーですと、台数が増えるに従って「事故」だと判断する時間が延びる可能性がありました。そこで、このプロジェクトでは何台増やしてもそのような動作をしないよう、新たなパワーコンディショナーの開発も行われています。一方で、停電ではないのだけれど、需給のバランスが崩れることで周波数などが若干振れるようなケースもあります。そうした場合に「事故」と勘違いをして太陽光発電を切り離してしまう可能性も考えられます。太陽光発電が大量導入された場合には、相当量のエネルギー

を供給する役割を担うわけですから、誤動作で簡単に切り離す運用となつては困ります。そういう観点からすると、明らかに「事故」のときには早く切り離すが、ちょっとした変動であれば踏みとどまるというようなことが求められることになります。



このプロジェクト実施中に新潟県中越沖地震が起きました。その際、需給バランスが崩れ周波数が約8秒で0.8ヘルツぐらい下がったことがありました。これは柏崎刈羽原子力発電所が停止したことにより、周波数が一瞬落ちたということだと思います。このプロジェクトでは太陽光発電を付けた553軒の家屋がありましたが、そのうち5分の1がそれを「事故」と誤検知し、太陽光発電を切り離したというデータがとられています。この問題は、誤動作により一斉に太陽光発電が切り離されて一瞬にして電力が不足してしまうような状況が起きないよう、大量導入時に考えなければならない課題のひとつです。

ここまで、システム設計と一言でいっても、運用面も含めて様々なことを考慮する必要がある、ということはいくつかの事例を紹介しながらお話ししてきました。このようなシステムの最適化設計をする際に、どんな視点が必要か、私が大学で考えていることを紹介いたします。

## 系統連系型太陽光発電システムにおける蓄電池運用方式の多目的最適化

### 太陽光発電システムの集中連系

- ・ 電圧上昇問題
- ・ システムの発電電力が抑制される

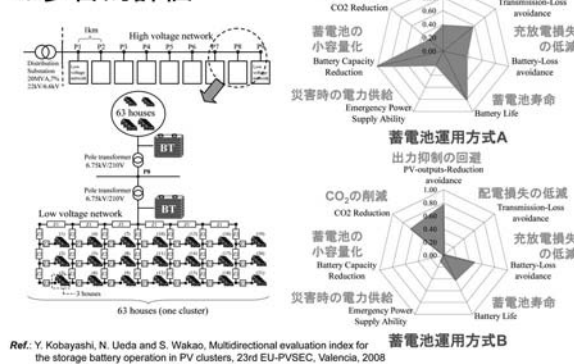
集合型蓄電池(蓄電ステーション)の導入、その運転方式について検討

蓄電池の導入

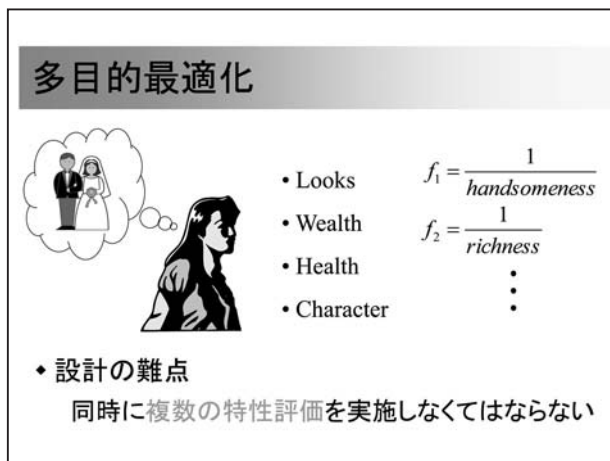


先にも述べましたが、蓄電池を運用する立場で見たときに、「系統の事故時に電力を供給しましょう」という目的と、「太陽光発電の活用しきれない余剰電力を一旦蓄電して有効利用しましょう」という目的は、トレードオフ関係にあります。

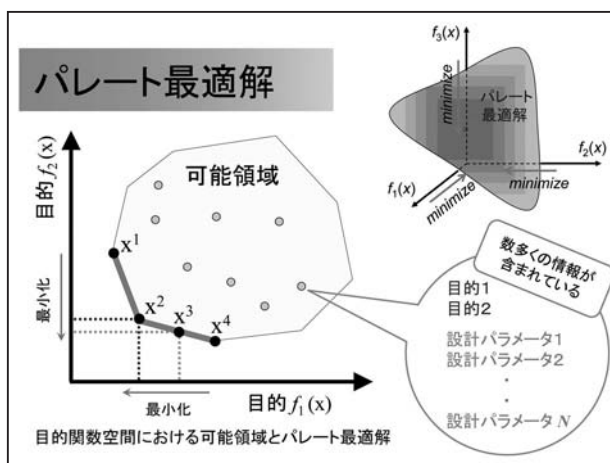
## 蓄電池運用方式の多目的評価



これ以外にも電池の運用方法に対してはさまざまな評価軸があります。例えば「充放電による損失を少なくしたい」ということもありますし、「CO<sub>2</sub>の排出量削減に貢献したい」といった効果も期待したいですとか、あるいは「蓄電池の寿命を短くしないようにしたい」など、いくつもの目的が考えられます。しかし、このようにいくつもの目的がある場合に非常に難しいのが、それぞれの目的があらを立るとこちらが立たずなどの関係になり得ることです。

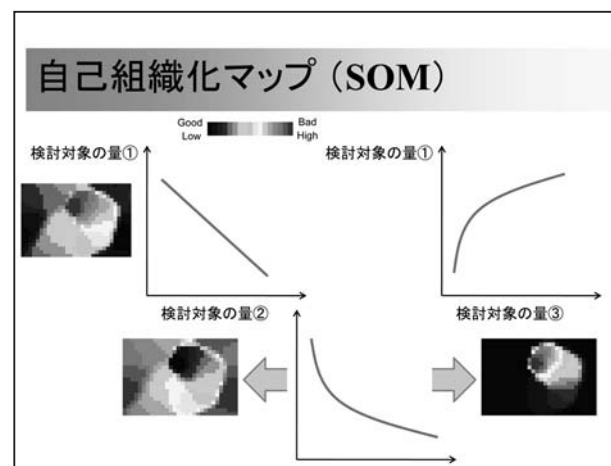


私が大学で講義をする際に、学生に「あなたが一生の伴侶をみつけたときには何で判断しますか」と聞きます。するとまず真っ先に「ルックス」が出てきて、次に「経済力」ということも出てきます。または大事なものは「健康」という学生や、明るい人が良いので「キャラクター」ということもよく聞きます。さてここで難しいのは、「ルックス」もよく「経済力」もあり、「健康」で「キャラクター」も素敵な人、と全てを兼ね備える人は簡単には見つからないということです。すべてが完璧な理想の人というのは実は世の中に存在しないかもしれない。だから「気をつけなさい」と私は学生に言っております。システム設計もそうだと思います。あちらを立てるとこちらが立たずというようなことが多々出てきます。そのようなことは定性的には理解できるのですが、何か定量的に実態が見えないと、なかなか意思決定というものができないといえます。このような問題において「目に見えるような形に情報を抽出しましょう」ということを大学で行っています。

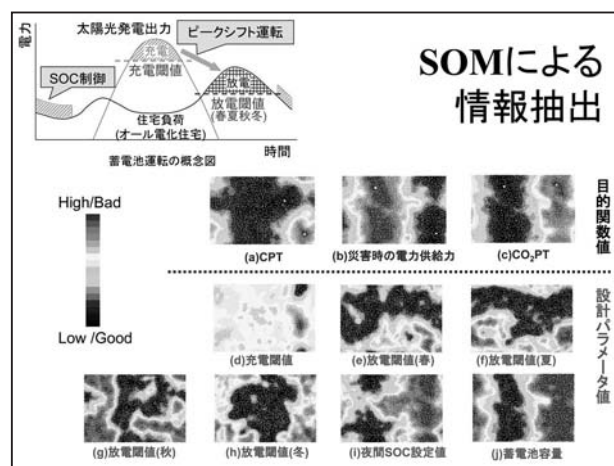


複数の特性を考慮する際に、例えばどういう答えを探すかということについて、この概念図でイメージしていただきたいと思います。値が極力小さいほうが好ましい2つの目的関数を最小化する問題を取り上げて考えてみます。その場合、図中に小さな丸で描かれたいろいろな解を比べていただきますと、 $x^1$ から $x^4$ のような端っこに位置する解というのがとても重要であることが分かってきます。これらの解は、可能領域内のどんな解を持ってきても、2つの目的関数の値で勝負して絶対に全敗しませんよ、少なくとも1勝はしますよという解のグループです。このようなものをコンピューターに探させるということになります。そして、これらの解の候補群をコンピューターに出させておいて、その中から人間が見てどの解を選択するのか最終決定をくださという流れになります。

最終的な決定を行う際に難しいのは、2つの目的関数の値ぐらいであればこのように図で表すことが出来ますが、実はこの中には目的関数の値以外にいろいろな設計パラメータの情報が含まれています。それが4つや5つと増えていけば一度に図示することもできなくなり、人間が容易に理解できないような事態が起きてきます。



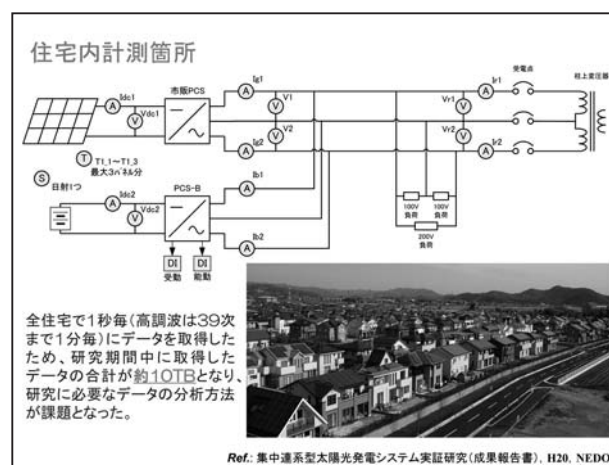
このように情報の次元が上がっていくと、人間が理解するには複雑すぎる問題になっていくと言えます。このような時にどう対処するかというと、例えば人間がパッと見てわかるような何か色のついた模様のようなものに多次元情報を置きかえようという技術があります。具体例として、2つのパラメータの関係が、こちらを増やすとこちらが減るというようなトレードオフ関係にある場合は、図のように色が反転した2つの模様が得られます。また、模様の形がまったく一緒ということは、非常にきれいな線形関係にあるということを意味しています。したがって、例えば、正比例ではなく非線形ではあるけれど一方を増やすと他方も増えるという関係の場合は、同系の色合いで形が多少違う2つの模様を得られることになります。いま紹介した技術を活用すれば、検討したいパラメータ間の関係というのは多分こうであろうと、模様をながめながら頭の中で想像がしやすくなります。一例ではありますが、このように多次元の情報を人間が視覚的にわかりやすくなるようなマップに加工する技術の開発などを大学で行っています。



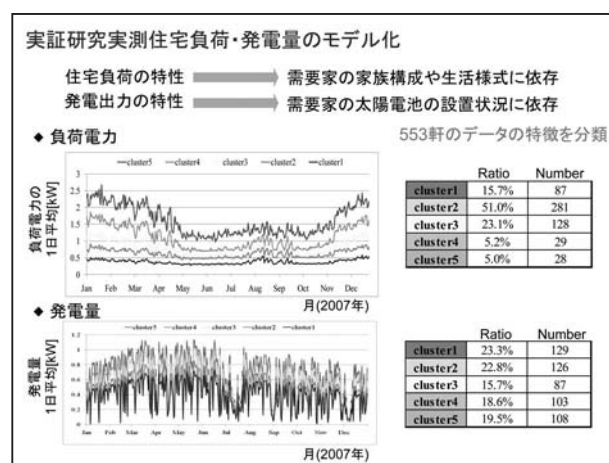
例えばこのような技術を、蓄電池を併用した太陽光発電の運用設計に適用してみます。10次元のデータを分析した結果ですが、すべてのマップを並べてみると、例えばCO<sub>2</sub>削減という目的と災害による停電時の電力供給力を高める目的とは、ちょうど模様の色合いが反対となり、蓄電装置の運用指針としてこれらは両立しないということが図からわかってきます。このような

情報を効果的に抽出することで、適切な設計指針を定めることができます。

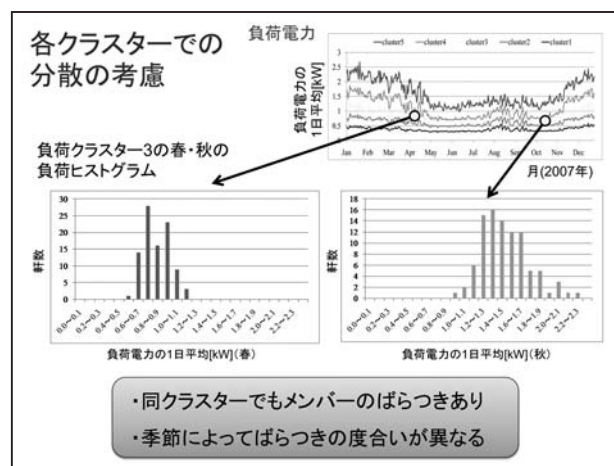
ここで話題を変えたいと思いますが、太陽光発電システムの設計で大事なことに、負荷特性の詳細な把握があります。



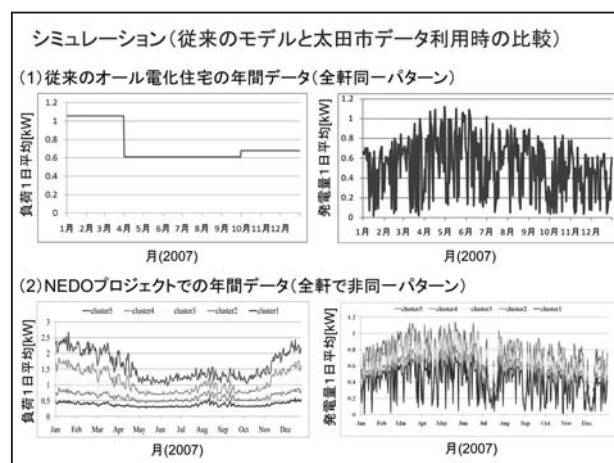
これは先程の太田市のプロジェクトの例ですが、ここでは非常に大量の計測が行われており、1秒ごとに太陽光発電の発電電力ですとか、負荷電力といった様々な物理量を対象に、数年のレベルでデータ解析をしています。非常に膨大なデータ量になりますが、これを分析した結果が次のグラフです。



このように553軒の家がありますが、大きなグルーピングをすると、このように5つの負荷パターンが見えてまいります。住宅負荷というのは家族構成やライフスタイルに影響されます。ある家庭に比べると2倍、3倍使うような電力消費の多い家が全体の5%近くあるということがわかりますし、また電力を使わない家庭ほど1年を通じて使用量の変動も小さい傾向にあるということもわかります。また季節で見ると夏は各家庭必ず電力消費が増えていますが、特に消費量が多い家庭ほど冬の消費量が急激に増加することもわかってきます。



システム設計では、主役である負荷の特性を本当にわかっていないと踏み込んだ解析が出来ないといえます。主役を十分に理解したうえで、これに対してどうやって自然エネルギーを、あるいは補完するものをさらに組み合わせるマッキングをとるかということを考えることが必要です。

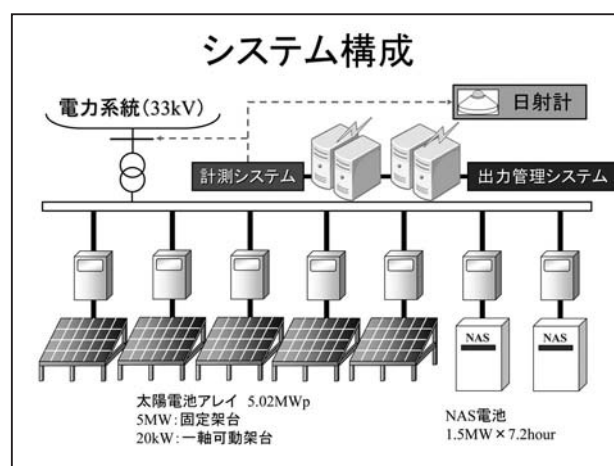


システムの挙動をいろいろとコンピューターでシミュレーションするときには、代表的な平均値で解析をするのと、今回のように分析をしたデータを用いてやるのでは計算結果はかなり変わってきます。環境負荷の軽減を図るうえで、効果的な自然エネルギーの導入を実現するためには、負荷自身をよく知ることがとても大事であるということをあらためて実感した例です。

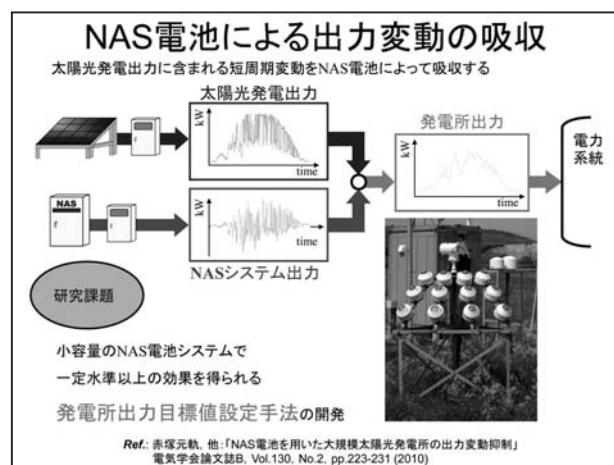


最後に、実証プロジェクトをもう一例ご紹介します。これまで日本では小規模分散設置が特徴であった太陽光発電ですが、最近では、太陽光発電を大規模集中化して発電所をつくろうという動きがあります。こちらはNEDOで行われている「大規模電力供給用太陽光発電系統安定化等実証研究」の例ですが、山梨県の北杜市と北海道の稚内市の二ヶ所において発電所としての太陽光の活用について研究が行われています。今回は稚内の実証研究についてご紹介いたします。

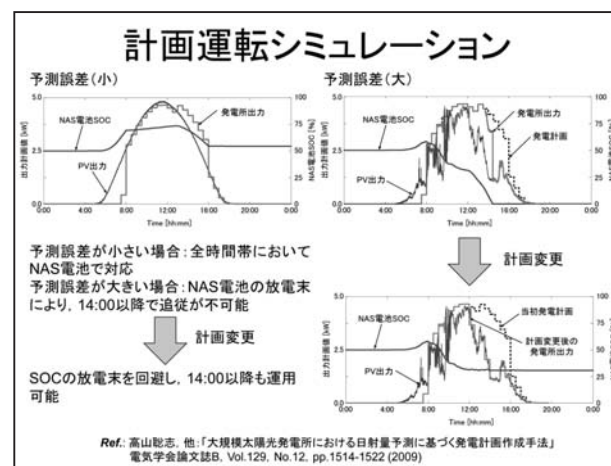
この実証研究での太陽光発電の規模は5メガワットです。一般の家庭用太陽光発電の約1,600軒分のサイズに相当します。近隣の市営球場2つ分と比較していただくと、大きさがイメージしていただけると思います。太陽光というのはエネルギー密度が低いということが1つの難点であるところ説明しましたが、このように5メガワットの発電所となりますと、非常に大規模な敷地が必要になります。発電事業となれば、太陽光発電電力をコントロール可能なものにして、電力としての価値を高める必要がありますので、お任せの発電というわけにはいきません。



このプロジェクトでは、大規模な電力用のエネルギーバッファとしてNAS電池を使い、大規模太陽光発電の出力変動抑制技術について検討が行われています。

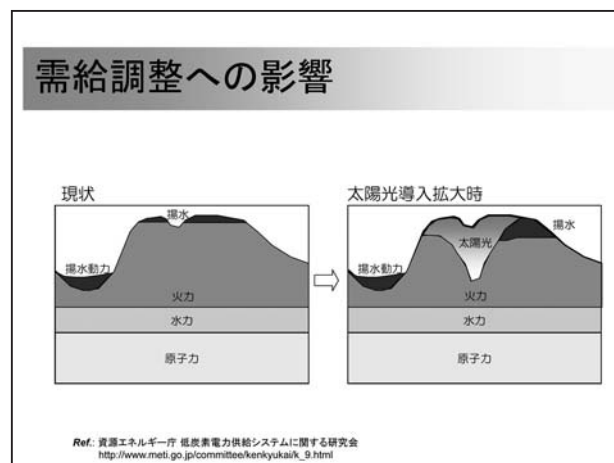


太陽光発電を自然まかせにすると図のようになります。これに対してNAS電池からの充放電電力を適切に調整することで、発電所全体の出力をかなり平滑化することが可能となります。この時に大事な事は、当然平滑化の能力を極力高めようとするのであれば、NAS電池容量をどんどん大きくすれば良いということになりますが、それは経済的な合理性という意味においては必ずしも良い解とは言えません。そこで、限られた電池容量の中で最大限に平滑化をするにはどうしたら良いかということが検討されています。

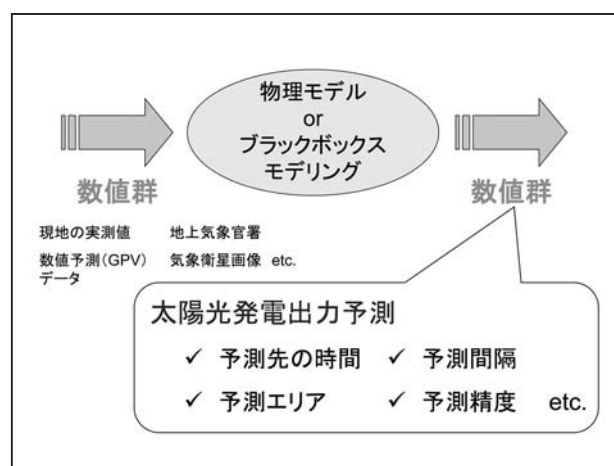


この図は、翌日の日射量がどのようになるかということを実測しながら、太陽光発電所の計画運転を試みている例となります。横軸に時間、縦軸に蓄電池の残存容量、あるいは出力計画値を示していますが、もし翌日の射量予測が比較的あっている状況であれば、太陽光発電所において当初の計画のとおりに出力が出せるということになります。これに対して、予測がずれた場合は、例えば途中で放電し過ぎて蓄電池が空に近くなるような状況を回避するために、適切に当初の計画を変更せざるを得ない事態も考えられます。

このように、このプロジェクトでは、日射量予測なども利用して、いかにして限られた容量の蓄電池を最大限に活用するかという発電計画手法が検討されています。



今後、太陽光発電の導入量が増えるにしたがって、その変動規模も拡大していきます。導入量が膨大になれば、最終的には電力の需給調整を行うために、火力、揚水などの他の既設発電所の出力調整が必要になってきます。そのためには、太陽光発電の出力をあらかじめ把握する必要がある、大量導入になればなるほど日射量予測の技術は重要性を増すことになります。では、この予測について大学での取組みを紹介いたします。

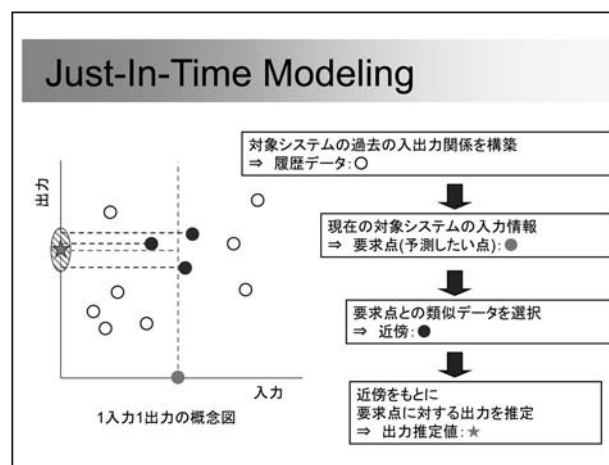


日射量予測と言っても、例えば、前日のいつの段階でどれぐらい先を予測するか、あるいは予測する時間間隔はどれぐらいのかなどバリエーションがあります。先に述べたような太陽光発電の大量導入においては、ひとつの地点の日射量というよりは、広域全体を足し合わせたトータルの日射量が大事になってきます。その場合、局所的には日射が大きく変動しても、面的に広がりを持って太陽光発電が導入された際の出力の総計値で見た場合には、その変動特性がならされることになります。ただしどれぐらいならされるかということについては、定量的にはまだ正確にはわかっていないのが現状です。このならし効果について、国レベルのプロジェクトで現在実測と分析が行われている状況です。

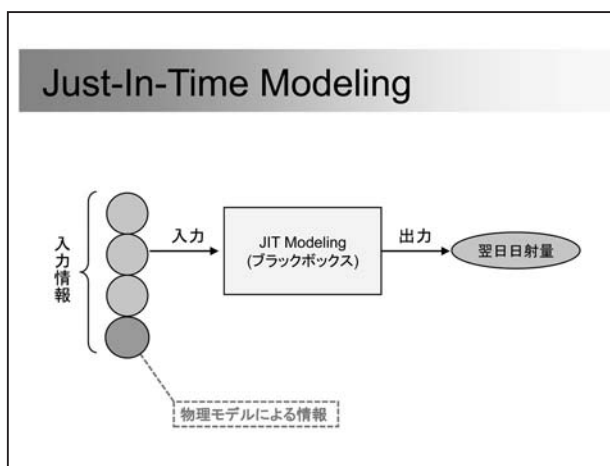
この予測については大きく分けて2つの方法があります。1つは物理モデルに基づいて計算していく方法で、私たちが普段目にする天気予報がこれに相当します。複雑な気象モデルに基づいて、大型計算機による大量の計算が必要となります。

一方で、ブラックボックスモデルという考え方があります。一例ですが、小難しいモデル化はやめてしまい、いまと同じ状態をずっと昔を振り返って探す、そしていまと似た状態を見つけて、その時の状況の記録を参考に、翌日の日射状況を予測するという非常にシンプルな考え方です。

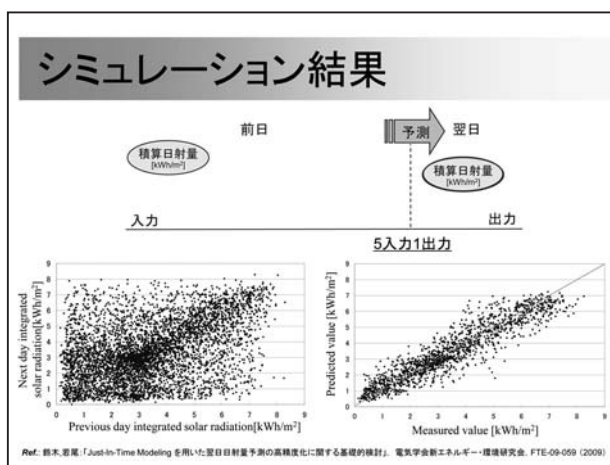
このような物理モデルとブラックボックスモデルをうまく組み合わせながら予測の精度を上げることに取り組んでいます。



この過去を振り返る方法は、ブラックボックスモデルの一種でJust-In-Time Modelingと呼ばれる方法です。現在対象としているシステムの入出力関係について、過去のデータベースを用意しておきます。そして、現在の入力に近い状況をデータベースに記録された過去の事実からみつけ、その時の出力を参考に未来の出力を予測する、という非常に単純なものです。少しいい加減にも見えるかもしれませんが、包含される物理現象が非常に複雑過ぎて、直接的なモデル化が難しいという場合にこのような考え方が役に立つといえます。

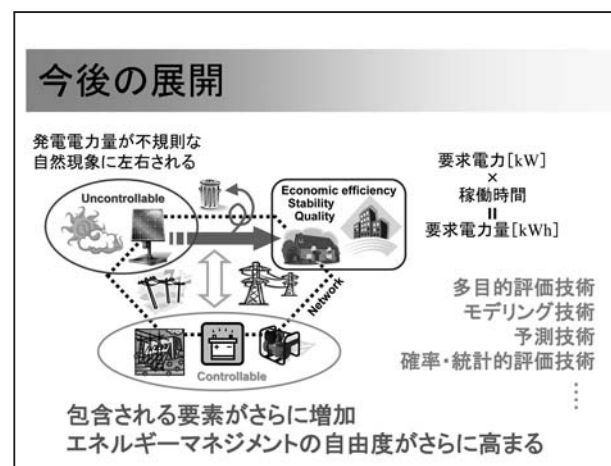


ここでは翌日の日射状況が出力に相当しますが、いかにしてこの出力と相関が強い入力情報を見つけ出し、適切なデータベースを構築するかというのがキーポイントになります。



今日1日の積算日射量と翌日の積算日射量との関係をグラフ化すると、両者の相関は高くないことが分かります。これに対して、平均気圧や日照時間、物理モデルに基づいて算出された予報情報などもこのJust-In-Time Modelingの入力群に入れながらチューニングをすると、ある程度の精度で翌日の日射量予測ができると考えています。

このように翌日の日射量を予測する精度を上げていくことも自然エネルギーを大量導入していくうえでは非常に重要であると考えています。



最後に、今後の展開についてお話ししたいと思います。自然エネルギー、特に太陽光発電もそうですが、アンコントローラブルなものであるといえます。負荷に対してエネルギー供給をするうえで、補完の役割を担うコントローラブルなものを組み合わせてシステム全体でバランスを取るのが基本的な考え方です。しかし、先にもご説明したとおり、システムに包含される要素が増えれば増えるほど、このバランスを取るということが非常に難しいといえます。昨今スマートグリッドという言葉が非常に盛んに聞かれますが、これは情報ネットワークを活用して電力供給側のみならず負荷側をも積極的にコントロールし、全員総出でバランスをとろうという考え方です。システムの対象範囲に包含される要素がさらに多くなり、エネルギーマネジメントの自由度は一層高まる傾向にあります。



最近では規模がさらに大きくなってきており、スマートグリッドから新しい街づくりとしてのスマートコミュニティという概念にまで広がっています。こうなると情報ネットワークや、エネルギーネットワーク以外に交通ネットワークまでも包含され、みんなで協調をとろうという内容になってきます。

この将来の姿については盛んに議論されておりますが、忘れてはならないのは、現実として現行のシステムがすでに存在しているということです。30年先あるいは40年先の議論だけをしては不十分で、それだけでは現在とつながって来ないといえます。現在のシステム形態から将来の形態への移行プロセスも含めて、最適な解を考えて今後の戦略を練っていく必要があると考えています。

### まとめ 1/3

- 太陽光発電の導入量が大量になればなるほど、エネルギーネットワークシステムの視点からの課題解決が重要性を増す。

膨大な戸数の家庭に分散設置された太陽光発電に対し、集中型および自律分散型制御の分担範囲と協調をどのようにするかなど、次世代の電力供給(エネルギーマネジメント)システムの姿はまだ不透明。

いろいろご紹介しましたが、最後にまとめますと、まず太陽光発電の導入量が大量になればなるほどエネルギーネットワークシステムの視点からの課題解決が非常に重要性を増すといえます。太陽光発電は非常に小規模なものが極めて多く分散しているのが特徴であり、その分散したものは数が多くなればなるほど、コントロールする事が非常に難しくなるというも述べてまいりました。よって分散した電源に、ある程度自律的に考えて動作してもらうという要素も入ってきます。しかしすべてを任せることには限界があり、どこかにおいては集中的にコントロールするようなどころも出てきます。この両者の線引きについては現段階ではまだ不明瞭です。これらの話題や、解決に必要な技術について、いくつか紹介させていただきました。

### まとめ 2/3

- 今後、再生可能エネルギーを大量に連系可能な電力供給ネットワーク形態のあり方を模索する際、ネットワークでの電力品質や保護・保安、太陽光発電の有効活用・経済性・環境性などの様々な点を考慮してエネルギーマネジメントの技術開発の方向性を絞り込んでいくことが重要。

再生可能エネルギーを大量に導入した電力供給ネットワーク形態のあり方を今後模索するうえで、ネットワークの電力品質や、保護・保安、太陽光発電の利用効率、インフラとしての経済性・環境性など、多くのことを考えていながら、エネルギーマネジメントの技術開発の方向性を絞り込んでいくことが重要であるといえます。このような中で、非常に多次元なデータを分かりやすく見えるような形にするといった技術開発も必要になってくることをお話ししました。

検討対象がコミュニティー規模にもなれば、主役はやはり人間でもありますので、人間の居住性などソフト面も含めシステムを評価していくことが望まれます。

## まとめ 3/3

- 将来の太陽光発電の大量導入目標の実現のためには、数十年先のあるべき電力供給(エネルギーマネジメント)システムの姿を議論するだけでは不十分。

太陽光発電の導入が段階的に進展すること  
も考慮して、現状の形態から将来の形態への移行  
過程も含めて最適な解を検討することが重要。

将来の太陽光発電の大量導入目標の実現のためには、数十年先のあるべき電力供給システムの姿の議論だけでは不十分であり、太陽光発電の導入が段階的に進展する事も考慮して、現状の形態から将来の形態への移行過程も含めて最適な解を検討することが重要と考えております。