

スマートなエネルギーネットワーク構築に向けて



特 集

大阪大学名誉教授・招聘教授（工学研究科）

辻 毅 一 郎 氏

●はじめに

私は1980年頃から今話題のスマートコミュニティに相当する分野の研究を行ってきました。退職後、大阪大学で国際交流担当ということで研究から離れていたのですが、それが昨年終わり、再び招聘教員という形で、キャンパス内スマートグリッド研究イニシャチブというグループに参加しています。この方面の進展は非常に速く、とくにICT（情報・通信技術）関係はめまぐるしく変化しています。十分にフォローできるかどうか心もとないのですが、私なりに整理してみましたので、イントロダクションという感じで聞いてください。講演では、まず「スマート何々」の復習をし、その後に「スマートなエネルギーネットワーク」のイメージを描き、それを実現する上で考えるべき事項を5つほど紹介したいと思います。

政府の総合資源エネルギー調査会の中に基本問題委員会が設置されていますが、その委員会で、「革新的エネルギー・環境戦略」の原案が作成されました。この案は、政府のエネルギー・環境会議で今年9月に承認されましたが、その中で原子力を将来ゼロにするという話があり、原子力に代わるものは再生可能エネルギーだとしています。今日のテーマであるスマートハウスやマイクログリッド、スマートグリッド、スマートコミュニティは全て、再生可能エネルギーをいかに利用して行くかにつながるものです。日本の将来のエネルギーシステムをいかに創って行くかという意味で、今、非常に重要な時期にあると言えるでしょう。

●スマートハウス

まずはスマートハウスですが、1950年代からの概念だと言われています。ウォルトディズニーが亡くなったのは1966年ですが、彼は50年代の終わり頃から将来の都市の計画というか、夢みたいなことを考えていました。オランダのディズニワールドの1つ、エプコットセンターは、ウォルトディズ

ニーがその昔に考えていたものです。コンピューターの処理能力がわずかの時代に、未来の住宅として省エネでヘルスケアもできる夢の住宅を描いていたようです。スマートハウスという名称が実際に使われたのは1985年、アメリカの建築業界のプロジェクトの中でと言われています。

歴史としては長いのですが、最近は商品として提供されるくらい盛んになってきました。現在のスマートハウスでは、HEMSを備えていて、エネルギー消費情報が見える化されています。また、外から家電機器の操作もできるようになっていて、カーテンの開閉などの自動省エネ対策も盛り込まれています。太陽光発電と家庭用コージェネレーションシステム、あるいはエコキュートのようなヒートポンプの給湯器などを使って、家庭内のエネルギー供給システムの運用と最適化を行っていくのが常識的になってきました。多様な料金メニューが今後提示されてくる可能性がありますし、エコポイントなどへの対応も行われています。

平成21年度には経産省がスマートハウス実証プロジェクトを実施し、多くの住宅メーカーが参加しました。また、住宅産業は独自に実証試験を行って



講師 辻 毅一郎氏

います。私もスマートハウス実証プロジェクトで行われたもの見学会（さいたま市）に参加したのですが、いろいろなことができる魅力的な住宅でした。

●スマートビル

スマートハウスがビルになったものがスマートビルであり、BEMS（Building Energy Management System）を備えていて、取得した多くのデータの見える化をする。加えて省エネアドバイスを受けて省エネ、節電を進めていくというものです。太陽光発電、風力発電、CGS、地中熱利用・蓄熱装置、電力貯蔵などを入れてそのビルに合った形のシステムを構成するとともに、運用の最適化等も行っているになっています。個人の位置情報から省エネ空調・照明を調整する自動省エネ支援装置などもあります。先日、ある研究会で聞いた話では、この装置で、照明需要の70%程度が削減できるそうです。

日経BPクリーンテック研究所のデータによると、この市場は非常に大きく、市場規模は65兆円（2020年）。とくに中国で大きいようです。もちろん政府も補助金を出していて、NEDOによる次世代省エネルギー等建築システム実証事業、経産省による地域エネルギーマネージメントシステム開発事業などが行われ、多くの建築関連企業が参加しています。

●地域電力システム（配電網）

昔から電力は電力会社が地域独占で供給していますが、分散電源を取り入れていくためには配電網を何とかしなければいけないと私達は考えていました。1990年代半ばに北海道大学の先生を中心に提案された「FRIENDS」という地域電力システムについて、一緒に考察を進めましたが、現在のマイクログリッドに近い発想だったと思います。そして電力中央研究所は、配電網に太陽光発電などが入ってきたときの電圧上昇等を軽減するためにループコントローラーの設置を主なアイデアとする「需要地系統」という概念を提案しています。両方とも太陽光や風力などの分散型電源の導入への対処が狙いでしたが、FRIENDSにはそれに加えて品質別電力供給のアイデアがありました。

昔に提案したFRIENDSを取り出してきたのはなぜかというと、昨年3月の東日本大震災のときに、東北福祉大学の近くの病院でこれに類するシステム



が既に運用されていて、途切れない電力の供給ができた。FRIENDSの品質別電力供給のアイデアは、信頼性、途切れては困る電源は保証していくというもので、良いアイデアだったということになります。

●マイクログリッド

2000年頃にアメリカでマイクログリッドというアイデアが出ました。アメリカから何かが出ると、一気に日本に流れてくるという傾向があります。FRIENDSとか需要地系統とか言っていた研究者達も、マイクログリッドという名前は思い浮かばず、これもアメリカにしてやられました。マイクログリッドについては今でも研究が続いています。とくに米国LBNL（ローレンスバークレー国立研究所）は、マイクログリッドに焦点を絞ったシンポジウムを毎年開催しています。2005年から始まり今年が8回目で、ポルトガルで開催されました。ポルトガルでは、スマートグリッドやマイクログリッドに関する研究が進んでいます。スペインが太陽光発電の先進国になっていますが、ポルトガルも熱心に取り組んでいるのです。シンポジウムはエボラという世界遺産になっている小さな町で開かれたのですが、そこではスマートグリッドに関する実証実験が行われていました。

マイクログリッドは小さな地域が対象です。アメリカでの典型的な例に、軍の施設や刑務所が入っているので何となくイメージできると思いますが、住宅で言えばおそらく数百戸くらいの地域になります。地域内の分散電源を活用し、コージェネを入れ、熱利用を含むような形でグリッド（電力網）を構成する。系統電力とは一点で接続されていて、日本では、平時には系統電力に依存しつつ運用し、もし系統電

力が切れた場合には重要負荷だけに供給すると言う考え方を採ることが多いように思います。一方、アメリカでは系統電力から切り離し、独立して運転できることが主眼に考えられている場合が多いようです。

マイクログリッドは、それを1つの大規模な需要家と考えて、系統電力と協力し合う関係であれば、全体の電力ネットワークを形成するための貴重な構成要素となると考えられます。

●スマートグリッド

マイクログリッドより後に、スマートグリッドという言葉が出てきました。先ほど触れたように、グリッドとは電力系統や送配電網のことを言います。熱供給についてもグリッドという概念があり、デンマークのコペンハーゲン周辺には熱供給のグリッドがあります。それはさておき、スマートグリッドとは、電力系統全体をICTで「スマート化」した次世代電力システムのことを指しています。爆発的にスマートグリッドが知られるようになった理由の1つは、全需要家に「スマートメーター」を取り付けるという壮大な構想であることです。その中でスマートメーターは双方向の通信をする、つまり需要家側から消費情報等を提供するし、系統側から需要家内の機器のコントロールもできるというものです。単純な機能のものから、家電など全てのものをコントロールする複雑な機能を備えたものまで考えられますが、最低限、自動検針的な電力量計測機能と系統側からシャットダウンする機能は備わっているようです。

スマートグリッドの特長は需要家の情報を得ながら、需要家設置の機器の制御も含め、対象とする電力系統全体を最適（例えばCO₂排出量の最小化）に運用するということです。膨大なデータ処理が必要になりますが、これができるようになったICTの進歩には、驚くべきものがあります。分散型電源、電気自動車を含めた電力貯蔵などを系統全体で適切に運用するということで、大変複雑なアルゴリズムが必要でしょう。例えば風力発電がフルに稼働していて、太陽光も豊富にあるという時、また再生可能エネルギーを35%も入れるようになる場合、電力が余る可能性があります。そんな場合にどうするかということで、例えば水を電気分解し水素にしてお

き、後で再び燃料電池で発電して電力系統に戻すという考え方もあります。そうしたことも含めて全体的にコントロールすることになっています。

デンマークは昔からエネルギーの先進国で、非常に多くの分散型電源が入った国です。すでに300を超える地域熱電併給のプラントが入っていたのですが、今はさらに全体をスマートグリッドにしようとしています。HPによると電気が余った時に水素に変換する、あるいは熱に変換し、後から利用するといったことも考えているようです。デンマーク全体のスマートグリッドが今後どう動いていくのか、非常に興味があるところです。

アメリカでは2009年1月にオバマ大統領のグリーン・ニューディール政策に盛り込まれ、爆発的に注目を集めることになりました。スマートメーターを全ての家に入れることになったら、巨大な市場が生じます。対象が広域で需要家も膨大で、標準化も必要ですし、従来は電機関連企業が主であった電力システムの計画に、情報通信関連企業が多く参入してきました。スマートメーターがどの程度の役割を担うのか、需要家の個人情報の取り扱いがどうなるのか興味深いところです。

宮古島（離島におけるスマートグリッド）など多数の所で実証実験が進められています。NEDOも米国などで実証実験を開始しています。政府は東日本大震災後の平成23年7月に第2回エネルギー・環境会議を開催しましたが、その時の資料には「2020年代に原則全戸導入としていた目標を思い切って前倒しし、今後5年以内に総需要の8割をスマートメーター化する」と書いてあります。学会では、IEEEスマートグリッドWebサイトが設置されていますし、Smart Grid Comm、ISGTなど多数の国際コンファレンスが開催されています。電気学会でもスマートグリッド特別研究グループが研究を進めています。

●スマートコミュニティ

スマートコミュニティという言葉は、マイクログリッドと異なり、比較的小さなエリア（コミュニティ）の中で、電力供給システムだけでなく、都市ガスや熱供給も含めたエネルギーネットワーク、そして、もっと広く上下水道、廃棄物処理、排熱回収、交通システムなど全ての都市インフラを考慮して、

街全体の省エネ・低炭素化インフラの構築を考える場合に使われています。さらに加えて、高齢者の見守りなどヘルスケアを含めたような真のコミュニティサービスを理想として追求しているものもあります。経産省が支援して、スマートコミュニティアライアンスの設置や次世代エネルギー・社会システム実証試験が行われています。

●スマートなエネルギーネットワーク

グリッドには、広域に供給する電力供給のグリッド、ガス供給グリッドがあり、将来的には水素の供給グリッドもあるでしょう。今後、これらの広域的なグリッドに依存しつつ、分散電源・エネルギー貯蔵装置を有する需要家または需要家群が、それぞれ独自のネットワークを構成していくことになると考えられます。要は、大規模集中電源を持つ基幹の電力系統がなくなるわけではなく、それがあって、各地域の色々な大きさのコミュニティでスマートなエネルギーネットワークが作られて行き、それらの総合体としてスマートなエネルギーネットワークが構築されてゆくものと思います(図1)。

グリッドに依存しつつも、分散エネルギーを主に利用するところもあるでしょうし、グリッドに全面的に依存する需要家や需要家群もあるでしょう。これらが構成要素になります。そして地域にまたがる発電・需要家群、例えばコンビニエンスストアといった同業種をまとめたものも、地域分割とは異なる形で構成要素と考えられます。

ICTによる「賢さ」が入っているのが、スマートなエネルギーネットワークです。各要素にエネルギー・マネージメント・システム(EMS)が設置され、

これらがエージェントになって供給グリッドと需要家を結ぶことになるのだらうと思います。実証実験の中では、色々な料金プランが試行されていますが、こうしたものにどのように対処するのか。個人の住宅で対応するのか、まとまった形でエージェントにやってもらうのかなど、グリッドと需要家の情報のやり取りに関してはさまざまな選択肢があると思います。エネルギー消費の見える化、災害時の賢い対処法にも色々な方法があるでしょう。

このようにスマートハウス、マイクログリッド、スマートコミュニティ、スマートグリッドなどが構成要素になって全体的にネットワークを構成する。それをスマートなエネルギーネットワークと呼ぼうということです。これが原子力ゼロに直接に結びつくものではありませんが、特徴は、分散型電源をできるだけ取り入れること、加えて電力の貯蔵も考えていくというところにあります。貯蔵は難しい問題ですが、進めてゆく必要があるでしょう。

●スマートなエネルギーネットワークの光と影

開発する側としては光を見ていくと思うのですが、少し懸念されるところもあり、影の部分も開発の段階で考えていくことが必要でしょう。ここでは5つの項目を挙げてみました。

第1に、どうしても社会的コストは上がっていくということ。簡単に言えば電力料金が上がり、それを国民が負担していくことになるということです。現状ではまだ国民のコンセンサスがどこにあるのかよく分っていません。

第2に、維持管理体制の脆弱性。これは分散型電源というものが万能のように言われているようです

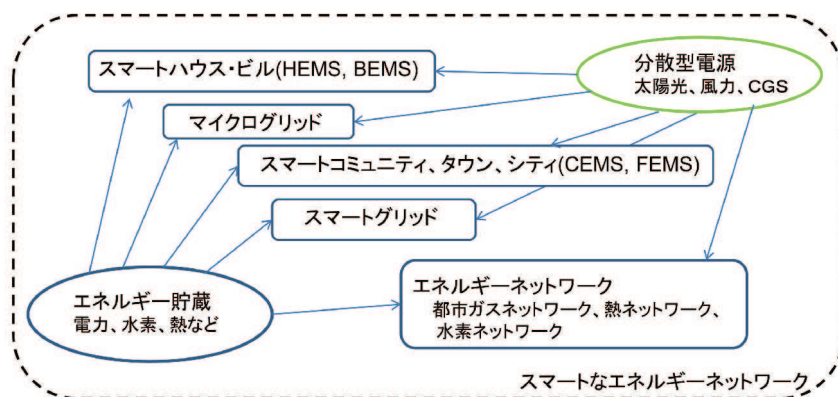


図1 スマートなエネルギーネットワークの構成要素

が、太陽光発電も設置して10年も経てば古くなります。その時どうなるのか、すでに、不慣れな業者が設置してすぐに壊れてしまったという事例も出ています。やはり維持管理体制などをよく考えていかなければいけません。家庭用コージェネも入れた段階ではよいとしても、経年変化はまだよく知られていないこともあり、信頼性を向上させていかなければなりません。

第3に、需要家の機器の第三者による制御をどこまで許すのか、誰が制御の主導権をもつかということが問題になります。

第4に、対災害性という問題。ある講演会で聞いた話ですが、東日本大震災で東北地方は電源と需要地の両方が被災しました。電源が失われたのですが、需要も減って結果的には電力供給を続けることができた。東京は電源だけが失われて需要地が健全でした。需要地はやむなく節電をしたわけです。阪神淡路大震災の時は、発電所は大丈夫で需要地だけが破壊されました。いろいろな状況を予め考えておく必要があることが分かります。分散型電源が被災したら、エコキュートなど給湯設備が地震で倒れてしまったら、ということを考えておくということです。

最後にサイバー攻撃の問題。サイバー攻撃に対し強い情報・通信・制御システムが構築できるのかが懸念されるところです。

●実現へ向けた今後の展望：構造的な省エネ

スマートなエネルギーネットワークの実現へ向けて、まずは建物・都市の構造的な省エネを考えてほしいと思います。断熱性の低い住宅では困ります。南さんというコンサルタントの方がライフライン遮断時の実態調査を実施していて、東日本大震災の直後、断熱が良い家とそうでない家とでは、室温が20℃～5℃と大幅に違っていたことが明らかにされています。

都市構造についてはコンパクトシティと言う概念が古くからあります。今、スマートコミュニティそのものを外国に輸出しようという動きがありますが、その際に考えてほしいのは、地域の事情もあるでしょうが、始めからエネルギーを浪費するような街の構造にしていけないということです。いつも思うことですが、ロサンゼルスやその周辺は、コンパクトシティの概念からはほど遠く、どう考えても

エネルギーを大量に消費するようにつくられてしまっています。日本の街は狭く、いろいろ我慢を強いられている面もありますが、コンパクトでエネルギー効率がよいことは明らかです。

●見える化の必要性

2つ目が見える化の必要性です。エネルギー消費を計測して可視化することで、省エネ行動が誘発されるのは事実です。スマートメーターが普及すれば、膨大な情報が集まります。ここから何を見つけ出すのか、どのように活かしていくのかが重要で、需要家への見える化はその第一歩だと思います。これには広い意味があって、テレビやマスメディアを通じた情報提供も一種の見える化です。震災後に東京電力管内で13%のkWh削減、ピークには1,000万kWも削減しています。しかし、震災後に行われた様々な調査によると、節電や省エネの知識はまだまだ不足しているようで、見える化への努力は今後必要でしょう。

図2は私が1998年頃から計測した住宅におけるエネルギー需要のデータです。「大阪大学工学研究科住宅用エネルギー計測調査データ」と書いてありますが、未来開拓学術研究推進事業として行ったもので、この図は和泉市の一戸建て住宅16軒の平均を表しています。こうした曲線が描けるということが、実はあまり知られていません。これを見れば、例えば夏の冷房がどのように使用されているかがよく分かります。HEMS・スマートメーターのデータをきっちり整備すれば、こうしたことができます。しかし往々にしてHEMSは電力だけを扱い、都市ガスは計測していない。家庭用のエネルギーは電力だけでなく、都市ガスもあるのです。

また、図3は京阪地区の一戸建て住宅を対象に調査した世帯別暖房用エネルギーの分布です。暖房用エネルギーは世帯によって、こんなに差があるということが分かりました。この差の要因は何か。日本の住宅では図4にありますように、真夜中に暖房を切りますので、室温が下がる様子がわかります。私は建築でなく電気出身ですから、この室温変化を見て、多少乱暴ですが、単純なRC（抵抗とキャパシタ）回路で室温特性をモデリングしてみました。そして、外気温5℃のとき室温が20℃から10℃まで下がるのに要する時間を調べてみると、ここに示したグラ

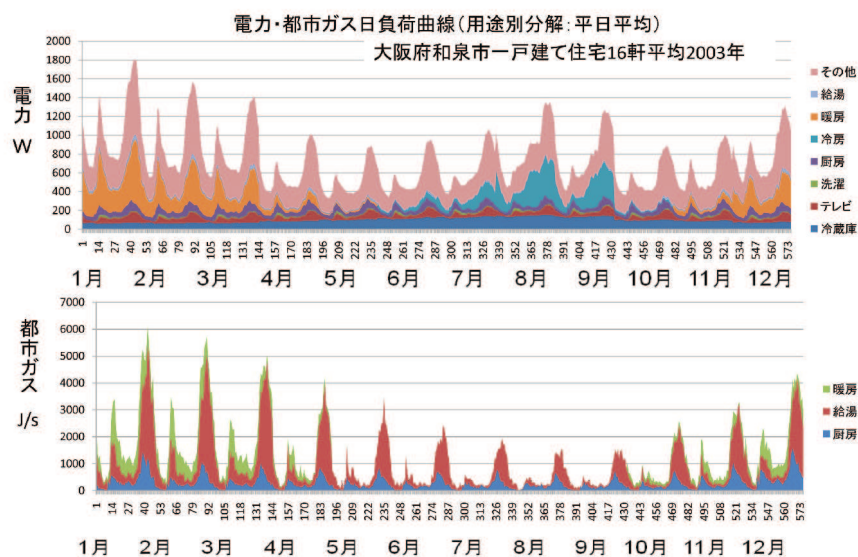


図2 住宅における用途別エネルギー需要曲線の例

出典：大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻：
「大阪大学工学研究科住宅用エネルギー計測調査データ」（未来開拓学術研究推進事業他）

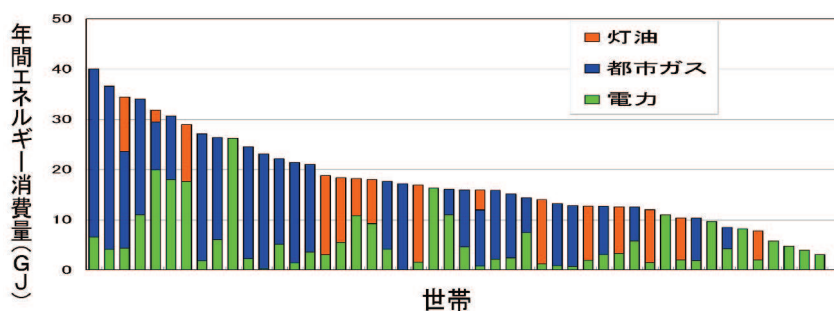


図3 世帯別暖房用エネルギーの分布（一次エネルギー換算値（1kWh = 10.3MJ））

出典：大阪大学工学研究科住宅用エネルギー計測調査データ：京阪奈地区の一戸建て住宅

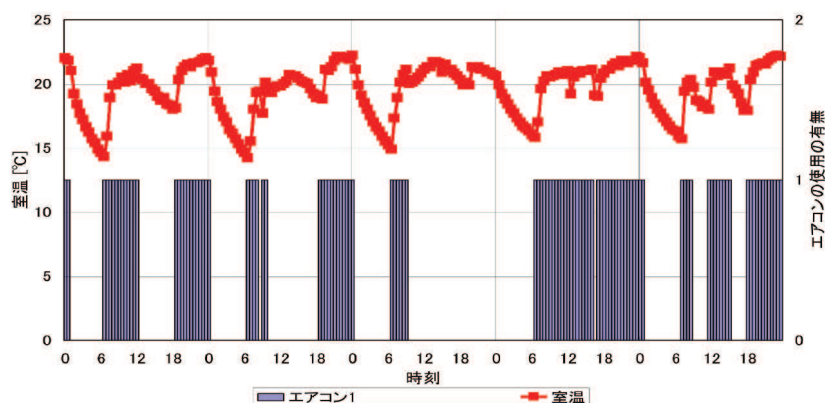


図4 エアコンの使用状況と室温の変化の一例

出典：大阪大学工学研究科住宅用エネルギー計測調査データ：京阪奈地区の一戸建て住宅

フ（図5）のようになりました。速く冷える家は3時間程度で冷えて、冷えない家は30数時間も冷えない。それくらいの差があります。どうしてそうなるのかを学術的に明らかにすることはできなかった

のですが、要するに室内で蓄熱の作用があることと、断熱の影響と考えられます。冷えやすい家が、より多くの暖房用エネルギーを消費していることは統計的に確かです。

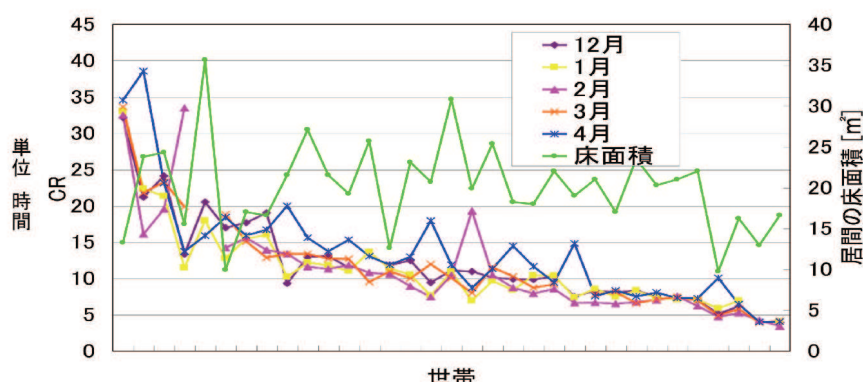


図5 推定された室温低下時定数CRの分布
(CR＝外気温5℃のとき室温が20℃から10℃まで下がるのに要する時間)

出典：大阪大学工学研究科住宅用エネルギー計測調査データ：京阪奈地区の一戸建て住宅

●既成市街地における展開

重要なのが、既成市街地における展開です。既成市街地では「軽装備」のスマートハウスの導入がよいのではないのでしょうか。スマートハウスというと、自動化省エネシステム、コージェネレーション、HPなどにより省エネ化を追求した、いわば「フル装備」のスマートハウスをイメージします。これに対し「軽装備」とは、見える化と高効率機器導入だけをするような、ある種の簡易版スマートハウスを指しています。

都市のエネルギーシステムをいかに最適化するかについていろいろ考えました。行き着いたのがこのグラフ（図6）で、横軸は一次エネルギーの削減率、縦軸は費用の削減率を表しています。これはトレードオフ曲線と言われるもので、同じ削減率を達成し得るシステム構成のうち最も費用が少なくなる点（パレート最適解あるいは非劣解と言われる点）が曲線上の点になります。このグラフの原点（エネルギー・費用の削減率がともにゼロの点：基準点）は、従来型システムを表しています。グラフから、同じ費用でエネルギーが削減できるシステム構成が存在することが分かります。さらに、私たちはトレードオフ曲線上、またその曲線に近いところに様々なシステム構成が存在するを確認することができました。だから各企業から様々な提案されているスマートハウスのシステム構成、さらには軽装備のスマートハウスとフル装備のスマートハウスなどは、いずれも多目的最適化というところのパレート最適解（非劣解）になっていると考えることもできます。

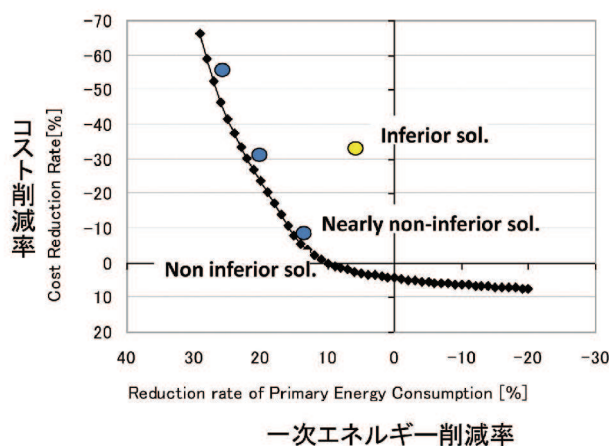


図6 望ましさの尺度と解の多様性費用対効果のトレードオフ曲線

フル装備のスマートハウスは初期投資が大きくなり、回収期間が長くなります。そして増エネの懸念も無きにしも非ずです。実は、計測調査時にコタツ暖房の家が10軒程度ありました。コタツを使っている人は別に我慢しているわけではなく、1枚余分に着れば十分ということだったのです。部屋の温度は13.5℃でした。それで、コタツをやめてエアコンを入れた場合のエネルギー消費のシミュレーションを行いますと、結果的には室温を上げることとなり、ライフスタイルが変わるので、増エネになってしまいます。だからフル装備にする必要は必ずしもないのではないか、軽装備であっても、スマートグリッドのデマンドレスポンスへの対応はできるし、低コストで大量に普及させることができれば社会全体としての省エネ効果は相当上がると期待できるのです。

●ビジネス環境の整備

電気事業者として、最近特定規模電気事業者や高圧一括受電サービス提供事業者が増えてきました。また、経産省が300億円の資金を投入し、BEMSアグリゲータ事業を進めています。こうした中で、スマートコミュニティ実証事業においては規制緩和への要望が出ています。一例を上げると、戸建て住宅を含む街区等で高圧一括受電ができると、大規模ビル同様、街区全体がエネルギーマネジメントの対象となるのですが、電気事業法施行規則第2条の2第2項にいう「一の需要場所」に該当せず、高圧一括受電ができないことになっています。ビルなら1つの需要家と見なせるが、面的に展開すると見なせないということなので、街区においてマイクログリッドをつくろうとするときの障害になります。

こうしたことに対して規制緩和ができれば、ビジネス環境が整備されることになります。そうすれば、多くの企業が地域エネルギーシステムのビジネスに参入し、結果的にスマートなエネルギーネットワークが続々と構成されてゆくことになると思います。地域独占の電気事業の下で、面的供給が非現実的であった十数年前から比べると、はるかに実現に近い段階にたわけですから、このような規制緩和に大いに期待しているところです。

●人材の育成

最後に人材の育成ですが、スマートコミュニティを計画することは、非常に大きなシステムエンジニアリングです。スマートコミュニティをデザインしていくには、強力な人材が必要になります。ハード、ソフトの両方を理解できる人材、総合力、デザイン力を持つ問題解決型の人材が必要だということです。ところが問題解決型の人材の教育は大学の中でもあまり重要視されていません。どちらかと言えば大学は基礎研究に注力すべしという意見が強いのも事実です。しかし、それでは不十分だと思っています。今後、システム科学、応用システム解析、エネルギー経済、エネルギー学、社会心理学などの要素を含めたシステム工学カリキュラムの開発が必要でしょう。

<質疑応答>

Q)： 電力を貯めるため電気分解して水素を貯める場合、効率はどうなのか。

A)： どんな効率になるのか私自身ははっきりと分からない。揚水が目標になっていることは聞いています。揚水式発電は往復で70%。現在どの程度まで行っているかは、情報を持ち合わせていないので分からない。

