

科学技術未来戦略ワークショップ報告書
再生可能エネルギーと分散制御システム

平成23年8月6日(土)開催



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）は、JST の研究開発戦略を立案するとともに我が国の研究開発の推進に資することをミッションとして活動を行っている。システム科学ユニットでは、システム科学の現代科学技術における位置づけとシステム科学技術分野推進のための方策をとりまとめた「システム構築による重要課題の解決にむけて ～システム科学技術の推進方策に関する戦略提言～」を平成 22 年度にとりまとめ、その中で、我が国の社会が直面している重要かつ深刻でシステム構築が核心的な解決策となる課題の 1 つとして、「分散再生エネルギー源を含む安定かつ持続可能なエネルギー供給を可能とする社会システムの構築」の必要性を指摘した。

この課題についてシステム科学技術を中心とした技術的課題の内容を豊富化し、研究開発戦略立案につなげる活動の一環として、平成 23 年 8 月 6 日に開催した「再生可能エネルギーと分散制御システム」を開催し、講演と討論を通じて、研究開発における技術的および研究システムのボトルネックの現状把握および今後の課題抽出、公的資金を投入する意義の明確化などを行った。本報告書は、このワークショップでの議論について、とりまとめたものである。

再生可能エネルギー導入によるエネルギー源の多様化と新たなエネルギーマネジメントシステムの必要性は、新成長戦略や第 4 期科学技術基本計画、エネルギー基本計画など、実に様々な文書で強調されている。「現在の集中型エネルギーシステムの改良ではなく、分散型の新たなエネルギーシステムを目指す」ことが、革新的エネルギー・環境戦略等で議論されている。システム科学ユニットでは、分散型の新たなエネルギーシステムを構築し、新たなエネルギーベストミックスを実現するためには、分散制御システムに関する理論および基盤技術に早急に着手する必要があると考え、昨年度の提案をさらに具体化した「再生可能エネルギーの安定かつ頑強な分散型エネルギー需給管理運用システム構築のための理論および制御基盤技術開発」と称するプロジェクト提言案を新たに作成した。

ワークショップでは、このプロジェクト案のブラッシュアップを図るため、現状の集中型エネルギーシステムの問題点と分散型にする必要性、そのために必要な研究課題について議論を行った結果、「分散」「協調」「予測」制御の必要性、市場メカニズム研究の必要性、システム研究の必要性、基礎研究の必要性とアカデミアに期待される役割、および具体的な研究課題等が整理された（詳細は 5 章のまとめを参照）。

目 次

エグゼクティブサマリー

1. ワークショップの概要	1
1. 1 開催趣旨	1
1. 2 ワークショップ開催概要	2
1. 3 ワークショップ参加者一覧	3
2. オープニング概要	4
2. 1 主催者挨拶	4
2. 2 行政からの期待	4
2. 3 開催趣旨および提言案説明	4
3. 講演概要	12
3. 1 再生可能エネルギー大量導入に向けたエネルギー供給システムの技術課題	12
3. 2 再生可能エネルギーとモデル予測制御	14
3. 3 人工衛星とモデルを用いた日射量推定	16
3. 4 再生可能エネルギーと分散協調制御	18
3. 5 計算機シミュレーション・模擬シミュレータ	20
3. 6 電力市場における再生可能エネルギーの役割	22
3. 7 電力ネットワークにおける利己的意思決定と統合メカニズム	24
4. 総合討論	26
4. 1 システム分野の理論および基盤研究の必要性	26
4. 2 プロジェクトの成果として何がもたらされるか	27
4. 3 実データの重要性	28
5. まとめ	29
6. ワークショップ講演記録	33
6. 1 飯野穰先生 ご講演記録	33
6. 2 藤田政之先生 ご講演記録	61
6. 3 中島映至先生 ご講演記録	86
6. 4 滑川徹先生 ご講演記録	103
6. 5 林泰弘先生 ご講演記録	120
6. 6 マルタ マルミローリ先生 ご講演記録	145
6. 7 内田健康先生 ご講演記録	160
付録	177

1. ワークショップの概要

1. 1 開催趣旨

独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）は、JST の研究開発戦略を立案するとともに我が国の研究開発の推進に資することをミッションとして活動を行っている。そのなかで、システム科学ユニットは、モデリング・シミュレーション、統計的手法、制御理論・工学、ネットワーク論、最適化技術、リスクマネジメント、システム構築方法論などにかかわるシステム科学技術の学問的な基盤を構築することを通して、課題達成型イノベーションを実現するために、細分化された科学技術を俯瞰的体系的な手法で統合していくことを目指している。

わが国の今後の経済成長の発展には、課題達成型イノベーションに向けた国家戦略が重要であることが、新成長戦略や第 4 期科学技術基本計画の中で指摘され、重要課題のうちに、再生可能エネルギーの導入と新しいエネルギーマネジメントシステムの構築が掲げられている。システム科学ユニットでも、システム科学の現代科学技術における位置づけとシステム科学技術分野推進のための方策をとりまとめた「システム構築による重要課題の解決にむけて ～システム科学技術の推進方策に関する戦略提言～¹」を平成 22 年度にとりまとめ、その中で、我が国の社会が直面している重要かつ深刻でシステム構築が核心的な解決策となる課題の 1 つとして、「分散再生エネルギー源を含む安定かつ持続可能なエネルギー供給を可能とする社会システムの構築」の必要性を指摘した。

本ワークショップは、この課題についてシステム科学技術を中心とした技術的課題の内容を豊富化し、研究開発戦略立案につなげる活動の一環であり、研究開発における技術的および研究システムのボトルネックの現状把握および今後の課題抽出、公的資金を投入する意義の明確化などを目的として開催した。

¹ <http://crds.jst.go.jp/output/pdf/10sp04.pdf> 参照

1. 2 ワークショップ開催概要

名 称：科学技術未来戦略ワークショップ「再生可能エネルギーと分散制御システム」

日 時：平成 23 年 8 月 6 日（土） 13：30～18：00

場 所：（独）科学技術振興機構 研究開発戦略センター 2 階大会議室

オーガナイザ：木村英紀 JST-CRDS 上席フェロー

コオーガナイザ：藤田政之 東京工業大学 教授

プログラム （敬称略）

13:30 - 14:00 はじめに

- ・主催者挨拶：木村英紀（JST/CRDS）
- ・趣旨説明：武内里香（JST/CRDS）
- ・行政からの期待：福井俊英（文部科学省環境エネルギー課 環境科学技術推進官）

14:00 - 17:00 ご講演（説明 18 分+質疑 4 分、7 名）

- ・飯野穰（㈱東芝）
「再生可能エネルギー大量導入に向けたエネルギー供給システムの技術課題」
- ・藤田政之（東京工業大学）
「再生可能エネルギーとモデル予測制御」
- ・中島映至（東京大学 大気海洋研究所）
「人工衛星とモデルを用いた日射量推定」
(15：10～15：20 休憩)
- ・滑川徹（慶應義塾大学）
「再生可能エネルギーと分散協調制御」
- ・林 泰弘（早稲田大学）
「計算機シミュレーション・模擬シミュレータ」
- ・マルタ マルミローリ（塚本幸辰 代理）（三菱電機(株)）
「電力市場における再生可能エネルギーの役割」
- ・内田健康（早稲田大学）
「電力ネットワークにおける利己的意思決定と統合メカニズム」
(16：50～17：00 休憩)

17:00 - 18:00 総合討論

- ・座長：藤田政之（東京工業大学）

18:00 終わりに

- ・閉会挨拶：木村英紀（JST/CRDS）

1. 3 ワークショップ参加者一覧

敬称略

氏名	所属機関	役職
講演者		
飯野 穰	(株)東芝 スマートコミュニティ事業統括部	主幹
滑川 徹	慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科	准教授
藤田 政之	東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻	教授
中島 映至	東京大学 大気海洋研究所 地球表層圏変動研究センター	教授
林 泰弘	早稲田大学 先進理工学部 電気・情報生命工学科	教授
マルタ マルミローリ	三菱電機株式会社 系統変電システム製作所 電力流通プロジェクト G	グループマネージャー
内田 健康	早稲田大学 先進理工学部 電気・情報生命工学科	教授
コメンテータ		
東 俊一	京都大学 大学院情報学研究科 システム科学専攻	准教授
石井 秀明	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻	准教授
井村 順一	東京工業大学 大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻	教授
太田 快人	京都大学 大学院情報学研究科 数理工学専攻	教授
大塚 敏之	大阪大学 大学院基礎工学研究科 システム創成専攻	教授
大森 浩充	慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科	教授
加嶋 健司	東京工業大学 大学院情報理工学研究科 情報環境学専攻	助教
櫻間 一徳	京都大学 大学院情報学研究科 システム科学専攻	特定研究員
三平 満司	東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻	教授
杉江 俊治	京都大学 大学院情報学研究科 システム科学専攻	教授
杉原 正顯	東京大学 大学院情報理工学系研究科 数理情報学専攻	教授
鷹羽 浄嗣	京都大学 大学院情報学研究科 数理工学専攻	准教授
畑中 健志	東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻	助教
宮里 義彦	統計数理研究所 数理・推論研究系	教授
事務局		
木村 英紀	JST 研究開発戦略センター	上席フェロー
安岡 善文	JST 研究開発戦略センター	フェロー
本間 弘一	JST 研究開発戦略センター	フェロー
豊内 順一	JST 研究開発戦略センター	フェロー
森 猛	JST 研究開発戦略センター	フェロー
武内 里香	JST 研究開発戦略センター	フェロー
オブザーバ		
福井 俊英	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	環境科学技術推進官
湯本 道明	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	地球観測推進専門官
根塚 崇喜	文部科学省 研究開発局 環境エネルギー課	エネルギー科学技術係長
原 浩二郎	経済産業省 資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー対策課	課長補佐

2. オープニング概要

2. 1 主催者挨拶

再生可能エネルギーの比率が増えるに従って、それを安定かつ効率的に消費者に送るためのネットワークのマネジメントが重要な課題になりつつある。再生可能エネルギーの本質は分散性にあるため、供給と消費を分離する従来の送配電システムの理論や手法は役に立たない。新しいシステム論が再生エネルギーのマネジメントのためには必要であり、特にネットワーク制御の分野が今後の発展のカギを握ると考えられる。

再生可能エネルギー導入にあたっては、実際には数多くの問題がある。それに対して、個別の要素技術だけではなく、全体的な視点で、システムとして考えていけるのはシステム制御分野を初めとしたシステム科学技術分野であると大いに期待している。

2. 2 行政からの期待

本日は、将来的な明確なビジョンと、その実現につなげるために必要な課題についてご議論いただき、抽出していただきたいと思います。さらに、大学等で行うべき基礎的な研究についても抽出していただければと思っている。

スマートグリッドは非常に重要だとよく言われるが、各人が抱くイメージも様々であり、ともすれば太陽光発電や蓄電池等の要素技術のみの研究になっている。システムとしてどのような研究をやっていくか、ぜひ忌憚のないご意見、ご提案をお聞かせいただきたい。

2. 3 開催趣旨および提言案説明

(開催趣旨に関しては、1.1 も参照のこと)

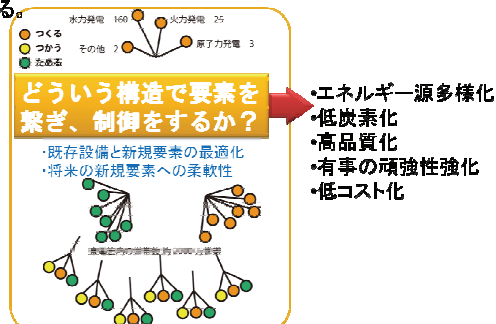
本ワークショップは、今年3月に発行した「システム構築による重要課題の解決に向けて～システム科学技術の推進方策による戦略提言～」の中で行った3つのプロジェクト提案のうちの1つ、「分散再生エネルギー源を含む安定かつ持続可能なエネルギー供給を可能とする社会システムの構築」に関して、研究開発課題及びその推進方法を具体化、詳細化し、国が今後研究投資を行うべき領域の提案へつなげることを目的としている。

再生可能エネルギー導入によるエネルギー源の多様化と新たなエネルギーマネジメントシステムの必要性は、新成長戦略や第4期科学技術基本計画、エネルギー基本計画など、実に様々な文書で強調されている。最新の例でいえば、「「革新的エネルギー・環境戦略」策定に向けた中間的な整理」(平成23年7月29日、国家戦略室 第2回エネルギー・環境会議)において、「現在の集中型エネルギーシステムの改良ではなく、分散型の新たなエネルギーシステムを目指す」と記載されており、中期の優先課題として、需要家が参加する需給管理システムの普及や、技術革新と価格メカニズムによる重要制御の進展などが挙げられている。

分散型の新たなエネルギーシステムを構築し、新たなエネルギーベストミックスを実現するためには、図1の理由より、分散制御システムに関する理論および基盤技術に早急に着手する必要があると考える。

制御研究の必要性（１）

- 再生可能エネルギーや各種インフラ設備の導入状況、都市計画、予算、構成要素の性能・コスト等の変化に合わせ、**速いスピードで柔軟に戦略を書き変えながら進展する必要がある。**



制御研究の必要性（２）

- 環境に依存した不安定な属性を持つ再生可能エネルギーの安定利用のために、予測技術と制御技術の連携が必要。
→ 予測制御、発電予測（地域気象予測）、需要予測
□ ダイナミクス、リアルタイム
- 分散型のエネルギーシステムは、分散電源、蓄電池、コジェネ、EV等、制御対象の種類と数が爆発的に増え、**システムの複雑性と不確かさが増す。**（要素が地理的に分散するだけでなく、マネジメントを協調しあう分散へ）
→ 分散制御、協調制御、階層化
□ 既存の集中型のシステムとは本質的に異なる性質を持ち、設計論、synthesisの部分から欠如している。
- 社会・経済的な安定性・価値づくりが必要
→ 価格メカニズムによる需要誘導

図 1 制御研究の必要性

戦略提言中のプロジェクト提案は、昨年度 CRDS システム科学ユニットが主催した制御システム分科会においてなされた検討をもとに簡単にまとめたものであるが、このワークショップを開催するにあたり、制御システム分科会のコアメンバーを中心として更に議論を深め、「再生可能エネルギーの安定かつ頑強な分散型エネルギー需給管理運用システム構築のための理論および制御基盤技術開発」として、より具体的なプロジェクト提言案を新たに作成した（図 2 および資料 1 を参照）。

現在、国内外でスマートグリッドや関連するインフラ整備を含めたスマートシティに関する実証的なプロジェクトが数百におよび進行中であるが、今完成しつつある技術を組み合わせ、応用開発研究や社会実験といった出口に近い部分が中心である。基礎研究に関しては、日本では、太陽電池や蓄電池、スマートメータ、EV といったハードウェア要素技術開発に関連したプロジェクトは存在しているが、システムやソフトウェア部分に関するものは皆無といってよい状況にある。今後この分野で、我が国が世界をリードしていくためには、ハードウェア要素技術はもちろん、これらをどのようにつなぎ合わせ、どれだけ高い付加価値を持つ機能を発揮させるかというシステムの部分の理論および基盤技術が必要不可欠である。システムの部分を押さえることが、社会的・経済的に大きな価値につながり、国の競争力強化にとって極めて重要なポイントになることは、Apple や Microsoft といった例をあげるまでもなく、明らかであろう。

今回のプロジェクト提案は、再生可能エネルギー源を含む分散エネルギーシステムのシステムの基礎研究にあたる部分であり、抽象的に表現すると、エネルギーネットワークをシステムとしての全体像でとらえ、要素間のフィードバック構造をモデル化して問題の原因解析や解決策を探る研究や、そこから出てきたモデルのシミュレーションを行い、システムの問題構造を正しく把握しているか、解決策がどのような成果を出し得るか有効性を評価する研究などに関するものである。具体的には、図 2 の①～④であり、各講演と議論により、内容をブラッシュアップする予定である。



図2 プロジェクト案概念図

資料 1

2011/7/19

JST 研究開発戦略センター
システム科学ユニット

再生可能エネルギーの安定かつ頑強な 分散型エネルギー需給管理運用システム構築のための 理論および制御基盤技術開発（提言骨子案）

1 提案の概要

我が国では、エネルギー政策のあり方の再検討により、再生可能エネルギーの本格的な系統導入が必須である。また、災害に頑強なエネルギーインフラの構築も希求されている。

分散型のエネルギー需給管理運用システムは、既存の集中型のものとは本質的に異なっており、その構築に必要な基礎的知見を得るため、環境に依存した不安定な属性を持つ再生可能エネルギーの安定利用のための下記のようなシステム制御技術基盤の確立を目標として、本領域を提案す

る。

達成目標

- 再生可能エネルギーの大量導入と災害時の頑強性を目指した分散エネルギーシステムにおける、センシング、状態推定・予測、分散制御、システム構築のための理論および基盤技術創出
- 発電側・需要者側の統合メカニズムと市場原理を考慮したエネルギーマネジメントの最適化により、システムの経済的合理性を担保する理論および基盤技術開発
- 地域気象予測や空間情報（地理情報システム等）と連携した安定かつ頑強なエネルギー需給管理運用システムのための基盤技術構築

2 研究投資する意義

- 本領域の研究成果を基盤に、経済産業省や環境省が支援する都市エネルギーインフラのスマート化・グリーン化関連の実証研究の成果をつなげ、次世代の分散型のエネルギー需給管理運用システム構築へ向けた実証段階の事業に展開・発展させる。
- これらの実現により、分散型のエネルギー需給管理運用システムの社会的普及が促進され、本来不安定でエネルギーネットワークに取り込みにくい再生可能エネルギーの受容可能量が増大し、災害にも頑強なエネルギーインフラが実現し、グリーンイノベーションの目標実現に向けた重要課題「安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現」の達成に貢献する。
- 我が国の高度化した電力系統技術をさらにスマート化（知能化）し、社会インフラソリューションパッケージの一つとして海外事業展開を狙う。また、世界各国への技術移転により CO₂ 排出量削減の達成により地球環境対策に貢献する。

3 具体的研究課題

①分散エネルギーシステムの安定性、最適性のための理論および基盤技術開発に関する研究

再生可能エネルギーを本格的に導入するためには、大規模・複雑化していくシステムをどのような形態（並列、あるいは並列×垂直など）で接続するかというネットワークトポロジーの視点から、電力システムの安定性・最適性のための協調分散制御などの理論や構造設計論が必要である。

また、環境に依存した不安定な属性を持つ再生可能エネルギーから引き出す電力品質（周波数・電圧など）の確保のために、再生可能エネルギー源と蓄電池の組合せに予測制御を施すことにより、安定化する必要がある。

具体的な課題例としては、

- 平時の安定性や効率化を目指した電力ネットワークトポロジー制御に関する研究
- 停電後、速やかに自己復旧可能な電力ネットワークシステムに関する研究
- 再生可能エネルギー発電と蓄電池のリアルタイム予測制御やシミュレーション技術など。

②発電側・需要者側それぞれの利己的意思決定をエネルギーネットワーク全体の社会的利益につなげる理論および統合メカニズムの研究

再生可能エネルギー源が分散的に多数の需要家に導入された際には、各需要家はそれぞれの利己的意思決定のもとに挙動をするため、電力ネットワーク運用面上において、不安定性、不確実性が増す。個々の需要家を電力価格等のインセンティブによって制御（誘導）できる確率システムとみなし、ネットワーク全体の社会的利益（省エネ化、低炭素化、経済的合理性や信頼性など）につなげる理論や統合メカニズムの研究を行う。

具体的な課題例としては、

- 電力需要のピークを平準化させるための動的な電力価格決定に関する研究
- 市場原理を用いた社会的公共性を担保する電力取引マーケット構築に関する研究
- センシング・情報収集・情報交換のためのスマートインターフェイスを活用した需要誘導技術の研究

など。

③衛星データを用いた地域気象予測、地理情報、学習・モデル修正等の融合により、精度の高い需要予測と再生可能エネルギー発電予測を可能にする研究

環境に依存した不安定な属性を持つ再生可能エネルギーをより効率的にかつ安定にエネルギーネットワークに組み入れるために、精度の高い地域規模の気象予測から再生可能エネルギーの発電量予測を行う必要がある。また同時に、需要予測の精度も向上する必要がある。

具体的な課題例としては、

- 気象観測衛星データと地域気象予測モデル、沿岸モデル、波浪モデル等を活用して、数時間から半日程度先の直達日射量、風向風速、沿岸流・波浪の強度等を準リアルタイムで予測可能にする研究
- 地域気象予測と地域の地理情報（地形、再生可能エネルギー発電機器設置、人口・産業分布等）との統合的解析を通じて、地域規模での再生可能エネルギー発電量予測を可能にする研究
- 過去の需要データの分析および季節、気温や曜日等から精度の高い需要予測を行う電力需要モデル研究

など。

④エネルギー供給、蓄積、需要のモデルに基づく、計算機シミュレーションおよび模擬シミュレータを用いた、上記理論およびシステムの評価研究

上記①～③で得られる理論やシステムの評価を可能にするために、計算機シミュレーションおよび模擬シミュレータ開発が必要である。

具体的な課題例としては、

- 小規模の実験装置を併合したハイブリッドシミュレータの開発と実証実験
- 並列分散型計算機を用いた電力ネットワーク制御の高精度シミュレータの開発

など。

4 検討の経緯

- JST 研究開発戦略センターシステム科学ユニットでは、制御システム分科会（平成 21 年 2 月～平成 22 年 12 月）を開催し、その第 1 回、第 2 回、第 4 回において、グリーンイノベーション分野に関して議論した。
- 分科会の議論を受け、第 9 回システム科学技術推進委員会（平成 22 年 10 月 有識者 23 名参加）において、システム科学技術が中心となって解決可能な重要課題の一つとして議論。
- 上記の議論を踏まえ、戦略提言「システム構築による重要課題の解決にむけて ～システム科学技術の推進方策に関する戦略提言～」を発行。
- より具体化するために、科学技術の未来を展望する戦略ワークショップ「再生可能エネルギーと分散制御システム」（平成 23 年 8 月）を開催。

5 国内外の状況

5.1 政策上の位置付け（政策体系における位置付け、政策上の必要性・緊急性等）

- 答申「科学技術に関する基本政策について」見直し案（平成 23 年 6 月 総合科学技術会議）
 - II-3. グリーンイノベーションの推進
 - (2) 重要課題達成のための施策の推進
 - i) 安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現
 - ・さらに基幹エネルギーと分散エネルギーの両供給システム及びエネルギー需要システムを総合的に最適制御するスマートグリッド等のエネルギーマネジメントに関する研究開発や自律分散エネルギーシステムの研究開発を促進し、これらの海外展開を図る。
 - III-2. 重要課題達成のための施策の推進
 - (5) 科学技術の共通基盤の充実、強化
 - i) 領域横断的な科学技術の強化
 - ・先端計測及び解析技術等の発展につながるナノテクノロジーや光・量子科学技術、シミュレーションやe-サイエンス等の高度情報通信技術、数理科学、システム科学技術など、複数領域に横断的に活用することが可能な科学技術や融合領域の科学技術に関する研究開発を推進する。

5.2 政策上・研究動向上の必要性・緊急性等

- 震災以降の状況変化により、再生可能エネルギーの本格的な系統導入は、より緊急の政策課題となっている。第 9 回新成長戦略実現会議（平成 23 年 6 月 7 日）においても、従来の集中型システムの改良だけでなく、分散型の新システムを目指す新パラダイム戦略を立てる必要性も視野にいたれた議論が始まっている。
- 新たなエネルギー戦略の議論にあたっては、集中型と分散型のシステムの調和、導入コスト、災害時も含めたシステムの安定性などに関して、科学的根拠に裏付けられた検討が必要である。そのために、これまで我が国でこの問題に主として携わってきた送配電工学、パワーエレクトロニクスや電力計測だけでなく、制御、信号処理、モデリング、ネットワーク、適応

学習、シミュレーションなどシステム科学技術の分野を含む新しい統合研究をスタートさせることが望まれている。

- 人類の共通課題である地球環境問題への貢献として、再生可能エネルギー大量導入に向けたエネルギーインフラ技術の早期確立と実用化、海外も含めた水平展開は、世界における我が国の役割である。そのためには経済性、拡張性も視野にいたしたシステム構築の方法論の確立が急務である。

5.3 他の関連施策との連携

- 気候変動適応研究推進プログラム等で得られた衛星データを活用した気象予測に関する成果と連携し、より高度なエネルギー需給管理運用システムのための基盤技術構築につなげる。

5.4 他の関連施策との役割分担・政策効果の違い

- 米国ニューメキシコ州における日米スマートグリッド実証（NEDO、平成 21 年度～平成 25 年度）や、資源エネルギー庁が行っている次世代送配電系系統最適制御技術実証事業、次世代型双方向通信出力制御実証事業、太陽光発電出力予測技術開発実証事業、次世代エネルギー・社会システム実証事業は、安定した集中型電力ネットワークを大前提に再生可能エネルギーの変動を系統電力網側の調整余力で対応し、スマートグリッド向け各種技術の実証を進めている。
- これに対して本提案は、上記で実現可能性を実証したスマートグリッド向け各種技術や、太陽光パネル、蓄電池などの要素技術を、経済性も含め社会としてどのように組合せ制御することがよいのかの、基礎研究（理論構築、制御方式、評価方式等）を目的とする。単に再生可能エネルギーの大量導入を目指すばかりでなく、災害時にも頑強な分散型のエネルギー需給管理運用システム構築を目指すものである。

5.5 国内外の研究動向

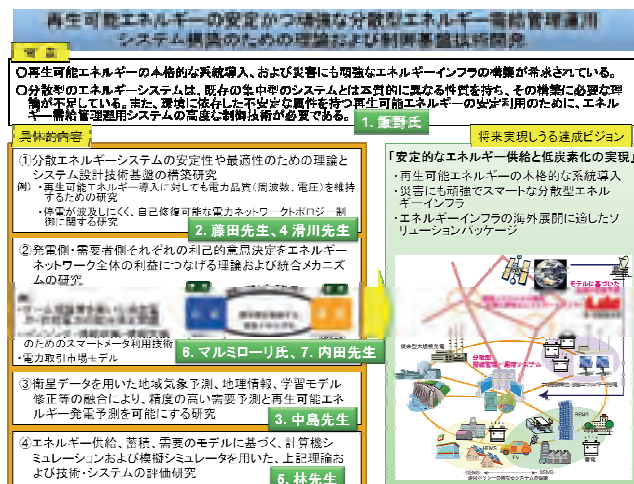
- 我が国では、高度な集中型の電力システムが構築されていたため、再生可能エネルギーの導入は、それほど切迫した課題とは受け止められていなかった面があり、そのため我が国におけるこの分野の貢献は決して大きくない。しかし、再生可能エネルギーの系統への本格導入が焦眉の課題になったことにより、今後の急速な発展が期待される。
- 海外におけるスマートグリッドの研究の中核は集中型の給配電網を対象としており、再生可能エネルギーをベース電力とした送配電網の制御や需給管理については、まだそれほど研究が進んでいるわけではない。しかしこの数年で、学会での発表件数やワークショップ等の企画は増加してきている。
- 日本はこれまでもパワーエレクトロニクス分野など個々の要素技術としては世界でも先導的な立場を担ってきた。これらの大規模複雑化するスマートグリッド向け要素技術全体を俯瞰的に扱い、課題分析・解明やシステム設計、要素技術の統合化などを実現するシステム科学技術をベースに引いて、新しい分散型エネルギー需給管理運用システムを戦略的に振興することにより、我が国が世界をリードする研究体制と実施体制を築くことは不可能ではない。
- スマートグリッドを進める米国エネルギー省は、気象・気候予測を行う商務省海洋大気庁と

連携して行うとしている。多国籍企業でも中東での電力発電に気象予測情報を活用することを考えており、我が国の気象・気候予測研究を実施する大学に対して技術提供を求めてきている。我が国の研究開発成果を我が国の利益として守りつつも国際展開する必要もあり、そのための研究開発を促進することは重要であるといえる。

以 上

3. 講演概要

7名の有識者によるご講演の位置付けは、図3の通りである。



1. 飯野穰（㈱東芝）
「再生可能エネルギー大量導入に向けたエネルギー供給システムの技術課題」
2. 藤田政之（東京工業大学）
「再生可能エネルギーとモデル予測制御」
3. 中島映至（東京大学 大気海洋研究所）
「人工衛星とモデルを用いた日射量推定」
4. 滑川徹（慶應義塾大学）
「再生可能エネルギーと分散協調制御」
5. 林 泰弘（早稲田大学）
「計算機シミュレーション・模擬シミュレータ」
6. マルタ マルミローリ（塚本幸辰 代理）（三菱電機(株)）
「電力市場における再生可能エネルギーの役割」
7. 内田健康（早稲田大学）
「電力ネットワークにおける利己的意思決定と統合メカニズム」

図3 プロジェクト案上の各講演の位置付け

3. 1 再生可能エネルギー大量導入に向けたエネルギー供給システムの技術課題

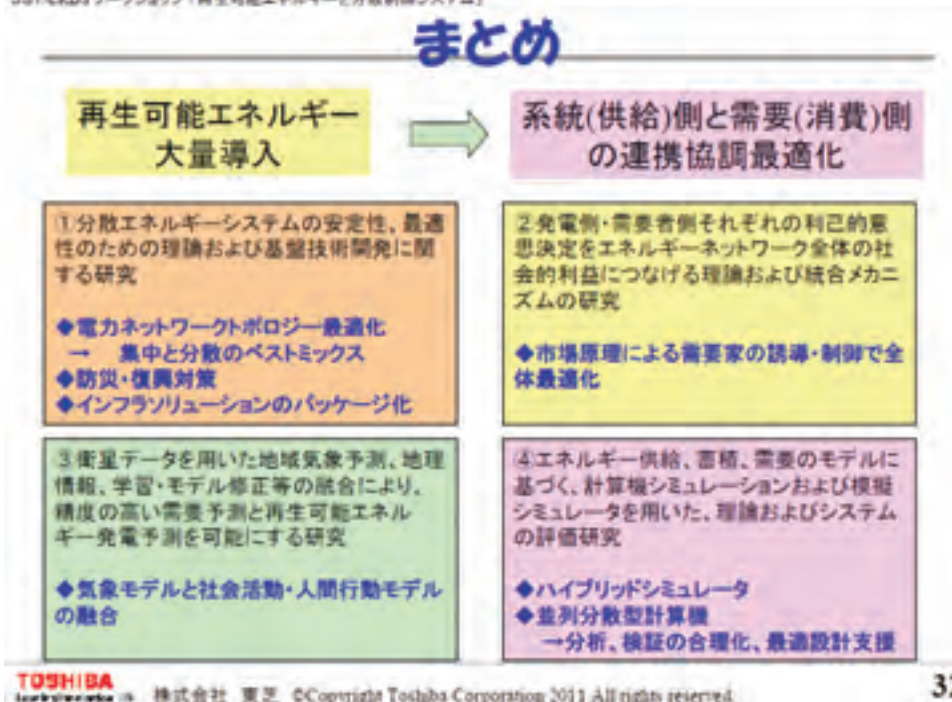
飯野穰（㈱東芝 スマートコミュニティ事業統括部 主幹）

- ◆ 世界的な人口増加により、エネルギー消費量やCO₂排出量が増え続けている現状において、再生可能エネルギーやそれをうまく利用するスマートグリッドが注目されている。特に最近では、スマートグリッドに、交通や水道、廃棄物なども含めたスマートコミュニティという概念が注目され、ICTをかぶせて社会インフラをうまく統合することが考えられている。その中心となるのが制御技術やシステム理論である。
- ◆ スマートグリッドにはいろいろなタイプがあり、日本や欧州では、再生可能エネルギー大量導入型に分類される。これまでの日本の電力系統は、発電所から電力系統、配電系統、需要家と一方向的な流れであったが、ここに再生可能エネルギー源や、移動する負荷／電池であるEVが大量導入されると、双方向の流れになり非常に複雑な問題がでてくる。分散型エネルギー、そのための分散制御システム技術がいよいよ必要とされる状況になっている。
- ◆ 例えば、現在は系統の電圧と周波数を既定値内に保つ必要があるため、電力の逆潮流は許されず、発電の機会が損失、つまり経済損失が発生している。また、天候に左右される太陽光発電の変動を吸収するために、調整用の発電機や大量の蓄電池などの設備投資が必要になる。こういった問題を安く、賢く解決するところにシステム技術や理論の活躍の場があると思う。
- ◆ 現状の日本の電力系統は、発電→送電→配電→需要家と電力の流れが一方向で、それがどんどん枝分かれしていく階層構造になっている。中央給電指令所が全体（基幹系統、配電系統、各需要家）を見ているが、階層構造の上下方向も水平方向も情報が分断され、

連携していない。エネルギーネットワークとして、配電系統、基幹系統、需要家系統それぞれのエネルギーマネジメントシステムの構造はフラクタル状である特徴を持つが、このフラクタル構造をそれぞれのレイヤーでいかに最適に動かし、連携させるかが課題である。

- ◆ また、発電機側と負荷側の間に、位相や電圧といった物理系の電力バランスメカニズムはあるが、予測情報をやりとりするなどの情報を取り入れたメカニズムは今のところない。ここに ICT をかぶせて制御すれば、もっとパフォーマンスを上げられる可能性がある。
- ◆ ローカル最適化が全体最適化ではないため、ローカル同士の協調制御も必要である。
- ◆ 分散型にするメリットは、設備投資を段階化できること、インフラをパッケージ化することにより管理保守や海外展開が容易になること、機能の分散による信頼性向上、安全性の確保などがある。また、分散している蓄電池システムを社会資産として共有（クラウド化）することにより、柔軟で巨大な仮想電池システムが実現できて、太陽光の変動を吸収できる可能性もある。例えば、個人の所有物である EV を社会全体で共有するなども考えられる。
- ◆ 市場原理によって需給バランスをとるメリットは、公平性や透明性があること、需要家を柔軟にコントロールして、発電側だけではなく需要家側も含めて全体最適化することができることである。これにより、発電コストの低下、需要家側の利益創出、CO₂ の削減による社会全体の利益という、3 者の利益の同時実現の可能性はある。さらに、電力量の経済価値だけでなく、余力や変化対応能力、無効電力の価値など、新しい価値を需要家から引き出せる可能性も広がる。
- ◆ スマートグリッドは、電力ネットワークの上に ICT をかぶせ、サービスという付加価値をかぶせる構造と考えている。ICT をどう電力にかぶせるかは様々な研究が進められており、スマートメータ等を利用して需要予測を高精度化することによって高度な制御を行ったり、生活支援といった付加価値側のサービスに役立てたり、様々な課題がある。

JST-CRDSワークショップ「再生可能エネルギーと分散制御システム」



3. 2 再生可能エネルギーとモデル予測制御

藤田政之（東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻 教授）

- ◆ 第4期科学技術基本計画等においては、再生可能エネルギーの普及や分散エネルギーシステムの革新に大きな期待が寄せられているが、その実現へむけては、再生可能エネルギー特別措置法やFITなどの社会システムの変革にかかわる部分と、再生可能エネルギーの導入コストや出力量、出力の動的不安定性といった課題がある。
- ◆ これらの課題に対し、我が国が誇るものづくり技術による革新が望まれ、様々なタイプのプロジェクトが動いているが、特に出力の動的な不安定性に関しては、ものづくり技術だけでなくことづくり、システム科学技術による要素の統合化による課題解決が必要である。ものづくりとことづくりのシステム化によって本当の意味でのスマート化ができると考えている。
- ◆ モデル予測制御は、時々刻々得られる情報をもとに一定時間未来の挙動を予測し、与えられた制約の範囲内で行動を数学的に最適化するものであり、出力の動的な不安定性の課題に対して非常に強力な技術である。例えば、非常に出力変動がある風力発電機と蓄電池、需要家の組み合わせに、このモデル予測制御を用いてエネルギーマネジメントシステムを構築することにより、非常に安定した電力出力を保つ研究などが始められている。今後、衛星データを用いた地域気象予測や、 H_∞ フィルタ理論などの最新の予測推定の理論をモデル予測制御の中に取り入れることにより、高度なエネルギーマネジメントシステムの構築が可能になる。
- ◆ エネルギーマネジメントのプラットフォームにかかわる研究を推進することは、非常に重要である。PCやiPhone、iPad等の収益構造をみれば、ハードウェアの実体よりも、むしろそれを動かしているプラットフォームOSのほうが付加価値や利益率が高く、支配力が強いことが明白である。
- ◆ エネルギー管理システムを現在の中央集中型からお互いに協調しあう分散協調型へ変えていく必要がある。ピラミッド状のエネルギーシステムの中に、再生可能エネルギーが大量導入されても、中央に情報集約して全体最適にしようとしても、計算量が爆発してしまう。分散協調型のシステムにし、さらにそこでモデル予測制御を行うことにより、再生可能エネルギーの本格導入の実現へ近づく。
- ◆ 「分散協調モデル予測型最適エネルギー管理システム」は、エネルギーと情報の両方を双方向にやりとりし、モデル予測制御を用いて互いに協調し合う構造である。ポイントは、局所局所をある一定のアルゴリズムで処理して協調させることにより、全体を最適化させることができるようになることである。このようなシステムは、新しい要素を柔軟に追加していくことができ、また逆に、災害等によって部分的に障害発生したとしても、被害を最小限度に抑える能力を持つ大変強力な基本アーキテクチャである。その実現のために、モデル予測制御や分散協調制御に関する理論および基盤技術の研究が望まれる。
- ◆ 再生可能エネルギーや分散エネルギーシステムの革新や普及に関しては、モデル予測制御による出力の安定化、分散協調型による全体の最適化が十分可能なレベルにある。本当の専門家による本格的なプロジェクトを行い、日本製の基本設計図をつくることが我々に課されているミッションだと認識している。



まとめ

環境エネルギーを対象としたグリーンイノベーションの推進
再生可能エネルギーの普及の大幅な拡大に向けた革新技術
の研究開発、分散エネルギーシステムの革新を目指した
研究開発等の取組を促進する。

モデル予測制御によって
再生可能エネルギーの出力安定化が可能

分散モデル予測制御によって
分散エネルギーシステムの全体最適化が可能

**分散協調モデル予測型
最適エネルギー管理システム**

→

次世代先進グリッド実験模擬装置ANSWER
<http://www.eb.waseda.ac.jp/hayashi/>

Tokyo Institute of Technology
29

3. 3 人工衛星とモデルを用いた日射量推定

中島映至（東京大学 大気海洋研究所 地球表層圏変動研究センター 教授）

- ◆ 再生可能エネルギーをうまく利用するためには、日射量や地表風ベクトル、地表面温度などの地球の環境パラメータを地域ごとに予測する地球科学の専門知識に基づいたモデルが必要不可欠である。気象庁による気象予測値は、晴や曇、最高・最低気温、雨量等を数日先まで予測するものであり、前述のパラメータ推定にそのまま利用することはできない。
- ◆ 次期静止気象衛星ひまわりでは、10 分間隔で、空間解像度も非常に高分解なデータ（可視 0.5km、赤外 2km）を撮ることができる。これだけ衛星の時間・空間解像度があがってくれば、雲や大気汚染物質の詳細なデータが取れ、これに風ベクトルをあわせれば、リアルタイムで日射量予測を行うことが可能になるだろう。太陽光発電の発電量は、直達日射量と散乱日射量の比率で決まる。
- ◆ スマートメータが普及すれば、どの地域で発電量すなわち日射量が減り、それが時間的に伝達していくかという情報も得られるようになり、モニタリングシステムとして使うことができる。スマートメータの密度がどれくらいかにもよるが、この情報をどう利用できるか、工学系の専門家と一緒に考えていくべき課題である。地域ごとの気象予報は、気象会社といった新しい産業にもつながる可能性がある。
- ◆ 地表の日射量は、雲粒の種類や大きさ、雲の厚さ、風の情報など、複数の情報を推定したうえで、更に放射伝達方程式を解いて推定を重ねるため、かなりの計算処理能力が必要とされる。処理速度を高めるために、ニューラルネットワークを使った新しい手法開発などの課題が重要である。
- ◆ 高分解能で力学大気モデルと化学モデルをつなげた NICAM-Chem により、台風により海塩などのエアロゾル粒子が巻き上げられたり、黄砂や大気汚染物質が飛散したりする現象などを、3.5km メッシュで全地球規模をシミュレーション可能になってきている。現在、ここに大気汚染ガスや CO₂などのモデルを組み込んでいるところである。
- ◆ 重要なのは、こういったシミュレーションと地上および衛星観測データとを組み合わせるデータ同化の技術である。地上や衛星の観測値と一致するように、プログラムを何度も走らせるため、これにもかなりの計算処理能力が必要である。日本は、地球シミュレータや京コンピュータなどの次世代の計算インフラが整備されてきており、ハイ・パフォーマンス・コンピューティング分野では強みがある。
- ◆ こういった CO₂あるいは大気汚染物質の濃度や発生源の情報は、市民のエネルギー利用の形を変えるインセンティブになるのではないかと考えている。再生可能エネルギーや EV の利用によって、環境が変わることを見える化できれば、環境問題とエネルギー問題を繋ぎ、新しいストーリーを考えるツールとして使えるのではないかと考えている。
- ◆ 太陽光や風力、地表面温度等、環境から取り出すことのできるエネルギーの最適利用に役立つ最適支援システムを地球科学の面で支援していきたい。新機軸としては、人工衛星、気象予報、地球環境モデルを組み合わせ、こういったものを短時間予報することを考えている。



太陽光等、環境型エネルギーの最適利用に関する 地球科学型支援システムの提案

- 太陽光、風力、地表面温度等、環境から取り出すことのできるエネルギーの最適利用に役立つ最適支援システムを開発する。
- 新機軸として、人工衛星、気象予報、地球環境モデルを組み合わせた太陽エネルギー、風力、地表面温度の短時間予報準リアルタイムシステムの開発。雲、エアロゾル効果を含めた高精度の太陽エネルギーの最新算定アルゴリズムを導入する。
- 大学キャンパスや小規模コミュニティをつないだ実証システムの構築による、システムの検証。
- 地球温暖化、都市ヒートアイランド、全球大気汚染等、地球環境問題の軽減効果の評価とコベネフィット量評価。

3. 4 再生可能エネルギーと分散協調制御

滑川徹（慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科 准教授）

- ◆ 分散型エネルギー需給管理システムがロバストであるために、計測や予測に誤差／ノイズが存在してもシステムの性能を保証すること、また、故障やシステム拡充／縮小へ柔軟にシステムを対応させることが必要である。そのために、外乱を考慮した情報構造制約付き分散予測制御や、反復勾配法を用いた分散制御などの研究課題を解くことが求められる。
- ◆ 外乱を考慮した情報構造制約付き分散予測制御とは、情報とエネルギーの伝達を考慮にいた分散型の予測制御と、そのフィードバックゲインを時々刻々変化させ、システムを適合的に制御するものであり、システムにより柔軟性とロバスト性を与えることができる。
- ◆ 例えば、5つのマイクログリッドが結合している場合、それぞれのマイクログリッドで誤差を含んだ計測や予測情報が集約され、マイクログリッド間で情報やエネルギーが伝達する際に時間差も発生する。マイクログリッド間の結合状態が変わることも考慮する必要がある。計測／予測誤差を考慮し、サブシステム間の距離情報に伴って拘束条件が変わる最適制御問題を解く必要がある。
- ◆ 具体的なシナリオを持った研究例として、太陽光発電量の予測誤差を考慮して、太陽光発電機－マイクロガスタービン－蓄電池を結合して電力融通をしようマイクログリッドシステムの制御がある。気象庁の発表する全天日射量情報をもとに発電量予測を行うが、この予測に不確かさが存在していても、三つの要素間で電力融通をしい、システム全体で発電量を制御可能にできるという研究成果が得られている。
- ◆ 反復勾配法を用いた分散制御とは、1つの制御システムがN個結合しており、外乱や故障信号の情報が入ってくる場合に、ある目的関数にフィードバックを逐次反復しながら値をできるだけ小さくしていくものである。
- ◆ この反復勾配法による分散制御を用いて、風力発電機－ガスタービン－蓄電池群－ヒートポンプ群からなる電力ネットワークの電力品質（周波数変動）に対するシステムの頑健性を検証した。発電機が正常に稼働している場合には従来の制御法と大きな差は出ないが、発電機が故障した場合には、故障に対して適切にフィードバックゲインを調節して安定性を維持できるという結果が得られている。
- ◆ サブシステム間の情報の結合構造をどのように構築すれば、コストを抑えつつ、情報共有してより適切に電量融通ができるかも検討課題である。情報を中央集約して制御する場合（centralized）、情報交換して分散で協調制御する場合（distributed）、情報交換せず個々に制御する場合（decentralized）を比較すると、distributed がコストを抑えつつ、性能を上げられる可能性がシミュレーションによって示されている。
- ◆ 現在はまだまだかなりシンプルなモデルによる検証でしかないので、今後より実際のエネルギーシステムに近いモデルを構築し、計算機シミュレーションや模擬シミュレータを使って検証していく必要がある。

分散型エネルギー需給管理システムの課題



システム構築の課題と社会的ニーズ

1. 予測誤差, 計測誤差, 推定誤差に対する**頑強性**
2. 故障・システム拡充／縮小に対する**安定性と頑強性**
災害や予期せぬ事故に対する**柔軟性**



Toru Namerikawa

Distributed and Cooperative Control for Renewable Energy Network

2

安定かつ頑強な分散型需給管理システムを目指して



分散協調予測型

ロバストエネルギー管理システムの開発

達成目標

1. 計測や予測に誤差／ノイズが存在しても**性能保証**
2. 故障やシステム障害への**柔軟な対応**

目標に対する具体的なアプローチの事例紹介

1. 外乱を考慮した情報構造制約付き分散予測制御
[ICCAS 2011]
2. 反復勾配法を用いた分散制御
[CDC 2011]



Toru Namerikawa

Distributed and Cooperative Control for Renewable Energy Network

3

3. 5 計算機シミュレーション・模擬シミュレータ

林泰弘（早稲田大学 先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授）

- ◆ 再生可能エネルギーの割合が高くなると、電圧と周波数が基準値を超えやすくなり、電気の品質が悪くなる。また、電線や再生エネルギー電源、省エネ機器、蓄エネ機器など、多くの構成要素が面的に広がり、場所と時間で出力変化する。再生可能エネルギー源を発電電力として電気のネットワークに組み入れつつ、電気の品質を維持するために、システム最適化の制御技術が必要である。
- ◆ システム最適化技術の研究成果を導入することにより、CO₂排出量や消費エネルギー量などが従来の評価値よりも改善され、どのくらい効果があつたかが目に見える形で社会に示すことができるだろう。
- ◆ 分散型再生エネルギー連系配電ネットワークへの導入システム技術の研究成果を実証する環境を整えることが重要である。電気ネットワークは構成要素が非常に多く規模も大きいいため、実際の配電ネットワーク全体での実験はできない。制御機器（ハード）は配電線単位で設置されることを踏まえ、実際に電気が流れる配電線単位の模擬シミュレータで、電流・電圧の実測にもとづく制御効果の実証をする。実際にハードをソフトで動かした際に、計測誤差や観測時間の遅れが生じてもちょうんと動くか、実用性の検証も模擬シミュレータで行う。続いて、模擬シミュレータで実証がなされたシステム技術を導入した制御機器配置の配電線を、多数接続して面的に展開した配電ネットワークモデルを構築し、ネットワークとしての技術導入成果の評価・検証は計算機シミュレーションにて行う。
- ◆ 基礎研究により、学術的な保証や数学的な背景の正しさに基づく成果をだすことは、非常に大事である。
- ◆ 現状、日本の電力会社は、配電用変電所が上位とすると、そこからツリー状のネットワークで配電のコントロールを行っている。配電用変電所エリア同士の境は開閉器によって繋がっているが、再生可能エネルギーが今後系統に組み込まれると、より細やかな開閉器の制御を行って、ネットワークのトポロジーを変えないと、制御することはできない。東京電力管内には開閉器が約 13 万個あるが、どこを開けてどこを閉じれば最適になるかといったロジックも必要となってくる。
- ◆ 配電エネルギーの損失を小さくし、少ない回数で電圧の制御をかけた上で、一番よいネットワークの状況を再生可能エネルギーの導入を希望する需要家に見える化するアプローチをすれば、導入は進んでいくのではないかと考えている。
- ◆ ANSWER（Active Network Simulator With Energy Resources）という配電ネットワークの模擬シミュレータを現在開発中である。レゴブロックのように、自由に太陽光発電や蓄電池などを模擬できる構成要素を選択し、電氣的に接続して、いろいろな先駆的な制御ロジック等の有用性を検証することが可能である。フリーデザイン型であるため、装置が陳腐化しないところがポイントである。
- ◆ 再生可能エネルギーの利用のためには、予測に基づいて制御する、そして予測が外れたら、それに対してまた制御で補正をかけるといったシステム技術が必要である。ネット

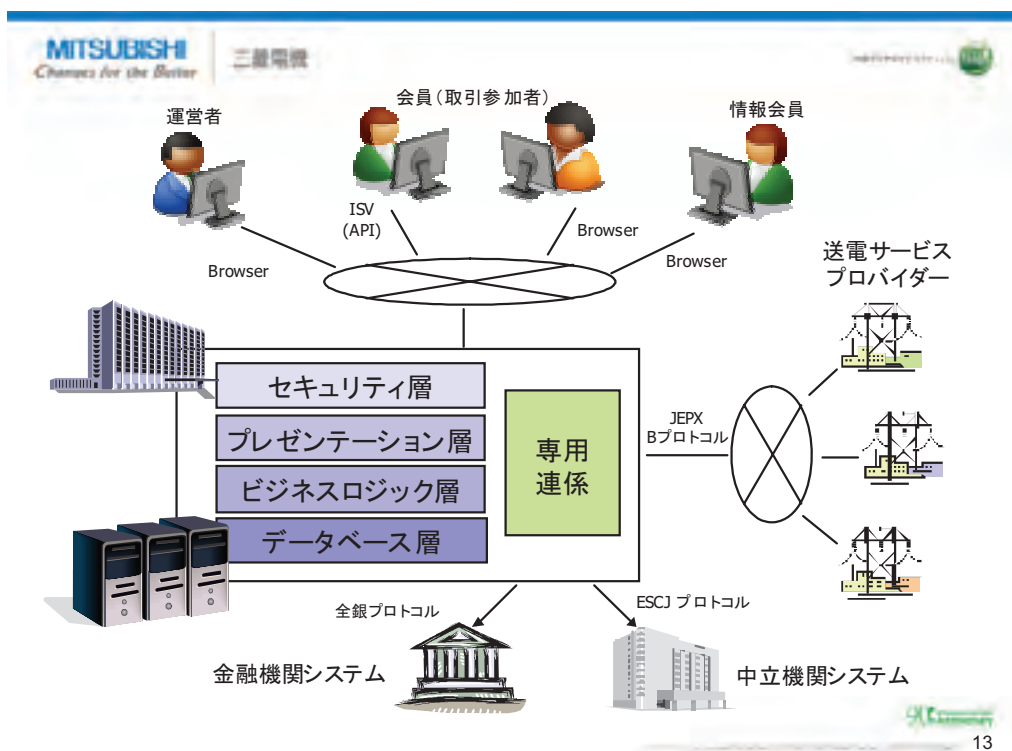
ワークも同様に、電力潮流の予測に基づく制御が大切で、また需要家側においても、太陽光パネルで発電したものを制御する技術が必要となる。そういった再生可能エネルギーとネットワークと需要家側の三位一体の最適な協調制御技術体系が今後必要と考えている。



3. 6 電力市場における再生可能エネルギーの役割

Marta Marmiroli (三菱電機㈱ 系統変電システム製作所
電力流通プロジェクト G グループマネージャー)

- ◆ 太陽光は、特にドイツとか日本、イタリア、スペインにおいてどんどん導入され、今は数ギガワットレベルに増えている。風力はさらに多く導入が進んでおり、特にドイツとかアメリカが突出し、一般の市場に参加する電源となっている。しかし、日本では、スマートグリッドのマーケットのイメージは全くできていない状況にあり、課題は山積している。
- ◆ 再生可能エネルギーはかなり増えているものの、コスト的にはまだフィード・イン・タリフ等のインセンティブがないと市場に入れることはできない。いつまでもそのような制度で市場の外から資金を入れることは不可能であるので、市場価格が上がるか技術が安くなることによってクロスポイントを迎え、再生可能エネルギーが市場に参加するようになると思う。
- ◆ 日本では、2000 年から電力自由化が進み始め、現在 63%が自由化範囲となっている。電力会社以外に、PPS（特定規模電気事業者；Power Producer & Supplier）といわれる電気事業に新規参入した電力供給者から購入することができるが、今のところあまり選択肢はない。PPS は、需要家の使用量と発電所各々の供給量を 30 分単位で一致させるよう制御させることが義務とされている。インバランスが生じた場合、インバランス料金というペナルティが課されるため、再生可能エネルギーが電力取引の現在のスキームの中に参加することは難しいだろう。
- ◆ 電力市場における将来の課題としては、天候に影響され、次の 1 時間でどれくらい電力量をだせるかわからない状態のものが市場に参加すべきかどうかは大きな問題である。市場としても再検討が必要であるが、1 日前の予測との差が少なくなれば、再生可能エネルギーもスポット市場に参加できると考える。
- ◆ 電力を含め、エネルギー関係の市場は価格が振れやすいが、再生可能エネルギーが市場に参入すればさらにその度合いは増す。揺れる市場は投資家の不安を招くので、市場メカニズムの分析と研究による安定化が必要である。
- ◆ もう一つの大きな課題は、送電線の使用法である。再生可能エネルギー、特に風力の場合は発電のロケーションが偏るため、送電権利や送電価格も含めて再検討が必要と考えている。また、先渡の場合も、送電線の制約でエリアによって価格が変わることがある。
- ◆ 日本卸電力取引所（JEPX）のシステムも、再生可能エネルギーを含め、取引の参加者が増えるとシステム的に影響を受ける。新たなシステムに関する研究が必要である。
- ◆ 電気を蓄電池に貯めるだけで、30%程度の損失がでる。よい市場をつくり、よい動きとよい価格で出せるようになれば、できるだけ蓄電池によるロスを出さずに済む。電気を作れるときに電気を使い、電気をつくれないうきには使わなくてよいようになるのが、スマートグリッドではないかと考えている。



3. 7 電力ネットワークにおける利己的意思決定と統合メカニズム

内田健康（早稲田大学 先進理工学部 電気・情報生命工学科 教授）

- ◆ 分散型のエネルギーマネジメントシステムに移行すれば、エネルギーの供給者が分散して存在し、かつ、エネルギー供給源を自由に選択できるような需要者が多数存在するネットワークとなる。刻々と変化する需要者と供給者各々の利己的な決定・制御をうまくデザインしてつなげるメカニズムの研究が、エネルギーの社会的な公共性を維持するためにも重要である。
- ◆ 電力ネットワークを概念的に見ると、スマートメータによってジェネレータとコンシューマーの双方向のエネルギーの流れが実現できるようになる。しかし、それをどう利用するかはまだ何も決まっていない。ポイントは、ある場合には需要家で、ある場合には供給者となるというダイナミクスを持つことで、それをどうやって解決していくべきかと考えている。
- ◆ 価格は状態に応じて決まり、状態は価格によって決まる。これが収束したところが価格決定で、それによって市場が形成されて、最終的には、社会的に満足できる決定につながる市場を設計しないといけない。
- ◆ 市場メカニズムによる制御を目指すメリットは、コストや環境負荷を削減できること、価格弾性化による需要の適正化（ピークカット）、ピーク供給力確保のための過剰設備の抑制などである。市場メカニズムによる制御は、分散型需給制御を実現する最も合理的な仕組みではないかと考える。また、市場を作ることにより、再生可能エネルギーの普及促進も狙うことができる。
- ◆ 再生可能エネルギー源は短周期の変動が大きく、またインバータを用いるため、時定数が小さく、ちょっとした変化が大きな動揺に繋がる。この問題解決のために、発電機の安定化制御の性能向上も必要であるし、統合メカニズム研究によって、プライシングのプロセスを高速化していかにリアルタイムへ近づけるかという研究も必要となる。
- ◆ インセンティブコストには、ローカルなミニマムをグローバルなミニマムに近づけるためのコストと、社会的な市場になるためのコストを考えることができる。コストを上手に選ぶと、エージェントの利己的な制御が公共のコストを最小化する。これが市場に参加するインセンティブになるし、合理性を与えるコストになる。また、小売的かつ戦略的な参加者にも、真実を報告するほうがベストだということを保証することができる。

再生可能エネルギー源導入に伴う課題

再生可能エネルギーは、比較的小規模の多様多数の分散型電源により供給されるため、集中管理型制御が困難であり、分散型需給制御が必然である。

- 集中管理型制御システムから分散制御システムへ
- 電源の変動、特に、短周期の変動、確率的変動の増加

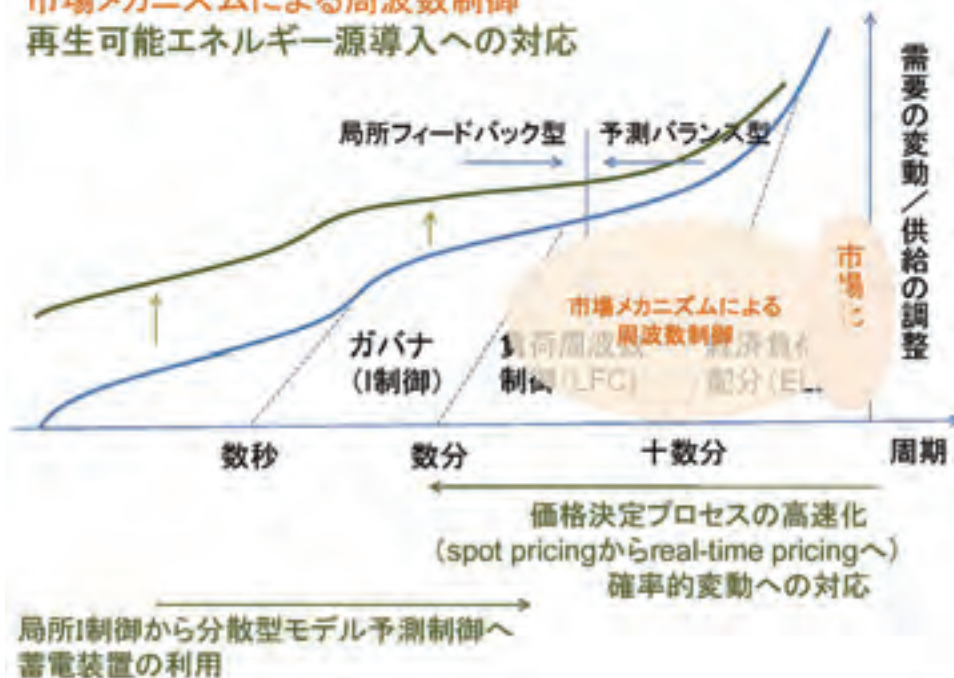
統合メカニズムにおける価格決定(プライシング)インターバルの短縮が必要

⇒ スポットプライシングからリアルタイムプライシングへ

発電機の供給力安定化制御の性能向上が必要

⇒ ガバナーからモデル予測型制御へ、蓄電装置の利用

市場メカニズムによる周波数制御 再生可能エネルギー源導入への対応



4. 総合討論

経済産業省において、スマートグリッドに関連する多くのプロジェクトが既に存在するが、ハードウェア関連では、基礎から開発までプロジェクトが存在しているのに対し、システム分野だけは、基礎～応用研究のフェイズのプロジェクトが欠け、アンバランスな状態にある（図4）。原因の一端として、目に見えない科学技術の典型であるシステム科学技術は、成果イメージを説明しにくいことが考えられる。

そこで総合討論では、事前アンケート結果および講演内容を踏まえ、①理論および基盤研究の必要性、②プロジェクトの成果として何がもたらされるか、③実データの必要性、の3つに論点をしぼり、議論を行った。



図4 平成23年度科学技術重要施策アクション・プランより引用

4. 1 システム分野の理論および基盤研究の必要性

- ◆ 制御関係の国際学会の動向をみると、制御理論やその周辺のかかなり多くの研究者らはスマートグリッド関連の課題に取り組み始めており、関心が非常に高まっている。プロジェクトを立ち上げ、総力を挙げて取りかかる時期としては、非常によいタイミングではないか。メーカーには数多くのファンディングもあり既にインセンティブがかかっているが、アカデミアにも必要（石井）。
- ◆ スマートグリッドが実現していくまでの間には、デバイスの性能があがったり、人工衛星のデータ精度がよくなったり、プライシングなどの制度が変わったり、時間軸のなかで環境条件がいろいろと変わる。そのなかで何年も続くメンテナンスまでを含めたシス

テムを構築していくには、システムの考え方やシステム科学技術がなくては、国際的に競争力をもったシステム作りを打ち出すことは難しい（大森）。

- ◆ 経済産業省は実用的な観点からアプローチしているので、次の産業の発展につながるような基礎的な部分、学術的な保証や理論武装の部分をアカデミアの方で弾込めをしておくことが非常に大事である（林）。
- ◆ 経済産業省では、NEDO プロ等を含めて開発の出口に近いところを中心にやるという面がある。文部科学省の基礎研究の最終的な成果とお互い連携できればと考えている。（原）
- ◆ 多くのステークホルダが存在する電力システムを、公平かつ効率的に運用するための技術開発については、理論および理論に裏打ちされた技術開発が必要である（塚本：事前アンケートより）。
- ◆ 理論的限界が明確に示せる。
- ◆ 問題が定式化されていれば、システム規模や実装環境が変わっても対応でき、国際競争力につながる。
- ◆ 電力ネットワーク以外の様々なシステムに成果を横展開できる。

4. 2 プロジェクトの成果として何がもたらされるか

- ◆ 欧米の ICT 企業が仕掛けてきたスマートグリッドという新しい考え方に対し、日本全体が焦り、メーカーも競って開発を進めている。しかし利害関係もあるので、うまく連携はできていない部分がある。今経済産業省の方で走っている様々なプロジェクトで個別のコンポーネント開発や個別の技術開発を行っているが、それらの成果をうまく集結し、日本が国際競争力をもって海外展開していくために、学が主体となってプラットフォームを作ることが非常に重要である（飯野）。
- ◆ 個別の要素技術をつくるプレーヤーは多様であり、全体のシステムにするときにそれらを束ねる指揮者のような役割をどこかのメーカーがやることは難しい。中立的なプラットフォームの枠組みを学が中心となって作ることを求められているのは感じる（林）。
- ◆ 典型的なスマートグリッドの実証事業としては、次世代エネルギー社会システム実証事業であり、他にも宮古島や柏キャンパスなど幾つか著名なものがあるが、産業界が主導している。さらに、エネルギーマネジメントシステムのようなプラットフォームが主役になっているケースは私の知る限りではない。できている要素を組み合わせ、動作確認をして、ある種のデータをとるという実証段階がほぼ全部ではないか（藤田）。
- ◆ アメリカは、NIST 等でシステムの標準化や全体のシステム設計をどんどんやっており、日本にはそこが弱いと思う。分散型のエネルギー管理といったものは今誰もやってくれておらず、誰かがやらないと間に合わない。システムの部分の基礎をこのプロジェクトで固め、そこから積み上げて今どんどん開発が進められている蓄電池やインバータ等のコンポーネントと合わせれば、完成すると信じたい（飯野）。
- ◆ 再生可能エネルギーのシステムをつくり上げるというところが一番大事で、そのために分散的な処理でやっていけるようなシステムをつくる必要がある。分散のメリットはいろいろあるが、スケーラビリティもその一つ。5 年後の一つのゴールとしては、ある程

度スケーラビリティ²が確保された形での基本的な枠組みを作るあたりを目標にすればよいのではないかと考える。マルチエージェントシステムなど、そのために必要な技術はかなりできつつある（杉江）。

- ◆ ハードの開発においては、具体的な研究開発の目標を定量的に立てられるが、システムの場合は異なるアプローチがよいと考える。新しいシステム技術を入れることにより、どれだけ CO₂ 排出量や消費エネルギー量を減らせるか、その差分を評価するアプローチがよいのではないかと（林）。

4. 3 実データの重要性

- ◆ アカデミアの研究成果として出てくる数式や論理をもとに、それで実際に何ができ、どんな成果があがるのかという具体的な検証を実データに基づいて行う必要性が非常に高いことは共通認識である。しかし、我が国では、そのために利用可能な実データが極めて入手しにくい状況にある（藤田）。
- ◆ 企業はもちろん、NEDO の実証事業で取られている実データも依頼してみたが無理であった。契約を結んだ上で一部提供してくれる企業もあるが、極めてまれである（内田）。
- ◆ 企業が持つデータのうちには、見る人が見れば年間売上までわかってしまう場合もあり、超機密情報であったりする。社会性とのバランスが必要（滑川）。
- ◆ NEDO 集中連系型太陽光発電システム成果普及事業の太田市の実証試験地区のデータに関しては、たしかオープンになっている。そういうデータはなるべくシミュレータに入れて使いたい（林）。
- ◆ 面的な広がりやシミュレーションするためのデータはさらに入手が難しく、課題である。学のような中立的なところが実データを取り、モデル開発に利用できるデータベースを作って世界に公開する役割を果たすことが大事ではないかと（林）。
- ◆ ベンチマークプログラムを作り、実データが何かしらの形で提供されれば、多くの研究者が同じシステムに対していろいろなアプローチを考えられ、競いあうことによって新しいものがどんどん生み出される。理論としてもすぐに進んでいくのではないかと。データを入手しうる限られた少人数ではなく、いろいろなアイデアを持っている人が参入できるようにしておくことが新しいシステムをつくることにつながっていくのではないかと（三平）。
- ◆ 太陽光発電機や蓄電池が電力ネットワークにつながった時、電圧に悪影響を与えないように制御できているかどうかという検証は必ず必要である。あるモデルをベンチマーク化して、シミュレータを用いて、面的な制御もちゃんと確認した上で、個別の制御とか協調をやる必要がある（林）。
- ◆ システム設計をする視点からコンポーネントの仕様を決めていければ、非常に可制御性のよいシステムを設計することができるようになる。そういう意味でも、ベンチマークをやることによって、非常に制御しやすいシステムを提案することができ、5 年後ぐらいには本当に使えるものがでてくるのではないかと（三平）。

² 小規模なものからリソース（特にハードウェア）の追加によって大規模なものへと透過的に規模拡張できる拡張能力

5. まとめ

「現在の集中型エネルギーシステム（地域独占の電力会社による大規模電源が電力供給の大宗を担うシステム）の改良ではなく、分散型の新たなエネルギーシステムを目指す」ことが、革新的エネルギー・環境戦略等で議論されている。本ワークショップでは、太陽光等の再生可能エネルギーの大量導入において、現状の集中型エネルギーシステムの問題点と分散協調型にする必要性、予測の重要性、そのために必要な研究課題について、講演と総合討論を通じて議論を深め、整理した。

ポイント1 「分散」「協調」の必要性

分散型のエネルギー需給管理運用システムにする意義は、主に3つある。一つ目は、制御対象が種類・数ともに増えるなかで情報をやり取りし、全体を最適制御するためには、マネジメントを分散化しなくては、情報処理能力が追い付かない点である。二つ目に、分散構造は新しい要素を柔軟に追加することが容易であるために、段階的な導入を可能にする点である。また、新規コンポーネントの登場や技術革新があった際も制御プログラムを更新することで対応でき、普及後の運用面においても有利なアーキテクチャである。三つ目は、災害等によって部分的に障害が発生しても、被害を最小限度に抑える能力を持つ点である。

システムが分散して存在する場合、それぞれのサブシステムを最適にしても、全体として最適にはならない。各需要家が太陽光発電を最大限に出力しようとするすると、配電システムの電圧が異常値をきたして、ある一部の需要家は売電できなくなる事態などが生じる。各サブシステムを協調し合わせて制御することにより、全体としての最適を担保する分散協調型のシステムが必要である。

ポイント2 「予測」の重要性

現在は電力需要の変化に対し、供給側が調整することによって、需給バランスを取っている。しかし次世代電力ネットワークにおいては、供給側と需要側の双方がダイナミックに動き、時には需要側が供給側に入れ替わることも生じるなかで、細かく需給バランスをとりながら最適化を図らねばならない。そのためには、時々刻々得られる情報をもとにした詳細な地域気象予測から、再生可能エネルギーの発電予測や需要予測を行い、モデル予測制御と組み合わせて、精緻な分散協調モデル予測型のエネルギー需給管理および運用を行う必要がある。また、再生可能エネルギーが電力市場に参加できるようにするためにも、予測が非常に重要である。

ポイント1、2より、分散協調モデル予測制御型エネルギー需給管理運用システムの実現へむけた研究開発課題を進める必要性がある。

ポイント3 市場メカニズム研究の必要性

需要や時期に応じて価格を変動させることによって、より柔軟かつ低コストで電力の需要バランスの調整しうる方法として、デマンドレスポンスが期待されている。価格弾性化によって需要の適正化（ピークカット）、ピーク供給力確保のための過剰設備の抑制が可能になり、

また、再生可能エネルギーの市場をつくることは、その普及促進にもつながる。再生可能エネルギー源を社会システムの中に取り入れていくためには、エネルギーという物理的なシステムのダイナミクスだけではなく、生活スタイルを含めた社会経済システムに関するダイナミクスをも考慮したシステムを構築しなくてはならない。

需要者と供給者が各々の事情（天候や価値観など）によって刻々と変化するなかで、どのようなような価格決定のメカニズムで、リアルタイムに需給バランスをとるかに関しての理論的な研究が必要である。理論に裏付けされた市場デザインは、エネルギーの社会的な公共性を維持するためにも重要である。

ポイント4 システム研究の必要性

新しいエネルギーシステムには、再生可能エネルギー源、燃料電池、蓄電池や蓄熱設備、コジェネレーション、ヒートポンプ、電気自動車など、制御対象の種類と数が爆発的に増え、システムの複雑性と不確かさが増す。

「異なる目的を持った異種の要素」、「多種の結合」、「多様な不確かさ」などの、システムとしての課題の解決なくて、ダイナミカル（動的）なエネルギーシステムを、安定に、かつ最適（高パフォーマンス・低コスト）に、構築・運用することはできない。

再生可能エネルギー源やコジェネ、蓄電池、ヒートポンプ、移動する負荷／電池である EV、電力・情報の双方向のやりとりを可能にするスマートメータなど、次世代電力ネットワークにかかわる様々なコンポーネント開発が着々と進んでいる。また、多くの実証研究開発で、前記コンポーネントを組み合わせる実験や、電力使用制御方式の開発がおこなわれ、市民も参加するエリア単位の実証事業も行われている。

しかし、これらのコンポーネントをどのようなシステムアーキテクチャでつなげて制御・管理し、地域や日本社会全体で、システムの段階的普及も含めて、効率性、ロバスト性の最適化をどのように図るかは、未解決の重要な課題である。このような、社会システム設計およびその理論的基盤に関して日本は遅れをとっており、早急に着手しなくてはならない状況にある。

ポイント5 基礎研究の必要性和アカデミアに期待される役割

電力ネットワーク分野に関連する個別の要素技術は非常に多いが、国際競争力を持つ製品として海外展開していくためには、これら全体をシステムというセットで売り込まなくてはならない。ハードウェアの実体よりも、むしろそれを動かしているプラットフォームシステムのほうが付加価値や利益率が高く、支配力は強い。

しかし、多数のプレーヤーが存在するなかで、公平かつ効率的に運用するためのシステム技術開発を行う役割を特定のメーカーが担うことは現実的には難しい。アカデミアが主体となり、理論に裏打ちされた中立的なプラットフォームを作ることが業界からも期待されている。

理論武装をきちんとおこなうことにより、システム規模や実装環境が変わっても対応でき、あるシステムで達成可能な理論的限界も明確に示すことができる。また、その理論的な成果は、電力ネットワーク以外の別のシステムにも展開することが可能である。

具体的な研究開発課題

①分散エネルギーシステムの安定性、最適性のための理論および基盤技術開発に関する研究

分散して存在する供給側および需要側のサブシステム間でエネルギーと情報の両方を双方向にやりとりし、互いに協調し合うことによって、全体システムを最適化するアルゴリズムに関する研究。電力品質（電圧・周波数）、CO₂排出量、発電量、コスト、システムの安定性や外乱に対する頑強性など、ある目標値に対し、システムの分析・評価を可能にする。

- ◆ 電力ネットワークトポロジー制御
- ◆ 外乱を考慮した情報構造制約付き分散協調型制御
- ◆ 反復勾配法を用いた分散制御
- ◆ 課題③より得られる高度な予測シミュレーションや、 H_{∞} フィルタ理論などの最新の予測推定理論を組み込んだモデル予測制御
- ◆ ハイブリッド予測制御
- ◆ PVによる発電量とEV走行の変動を考えた動的最適化（確率最適制御）

②発電側・需要者側それぞれの利己的意思決定をエネルギーネットワーク全体の社会的利益につなげる理論および統合メカニズムの研究

刻々と変化する需要者と供給者各々の利己的な決定・制御を全体の最適化につなげるためのメカニズム研究。

- ◆ ゲーム理論、オークション理論、確率最適制御理論、戦略的供給関数平衡モデル、メカニズム設計理論等を取り入れた動的な電力価格決定メカニズム研究
- ◆ 電力価格決定プロセス高速化に関する研究
- ◆ AMI（Advanced Metering Infrastructure）を利用した需要誘導・抑制技術の研究

③衛星データを用いた地域気象予測、地理情報、学習・モデル修正等の融合により、精度の高い需要予測と再生可能エネルギー発電予測を可能にする研究

- ◆ 人工衛星、気象予報、地球環境モデルを組み合わせ、日射量や地表風ベクトル、地表温度などの地球環境パラメータ短時間予報準リアルタイムシステム
 - 高精度準リアルタイム衛星データ解析の開発
 - 地上モニタリングシステム開発
 - 地上および衛星観測データをシミュレーションと組み合わせるデータ同化技術
- ◆ 自然エネルギーの時空間変動も考慮して再生可能エネルギー発電機の立地について分析可能な土地利用モデル構築³
- ◆ 過去の需要データの分析および季節、気温や曜日等から精度の高い需要予測を行う電力需要モデル研究
- ◆ 地域環境パラメータ予測と地域の地理情報（地形、再生可能エネルギー発電機器情報、人口・産業分布等）との統合的解析を通じて、地域規模での再生可能エネルギー発電量予測を可能にする研究
- ◆ AMI（Advanced Metering Infrastructure）を利用した需要および発電予測システム

³ インタビューより追加

の開発

④ 計算機シミュレーションや模擬シミュレータの開発およびそれを用いた上記理論やシステム技術の開発・評価研究

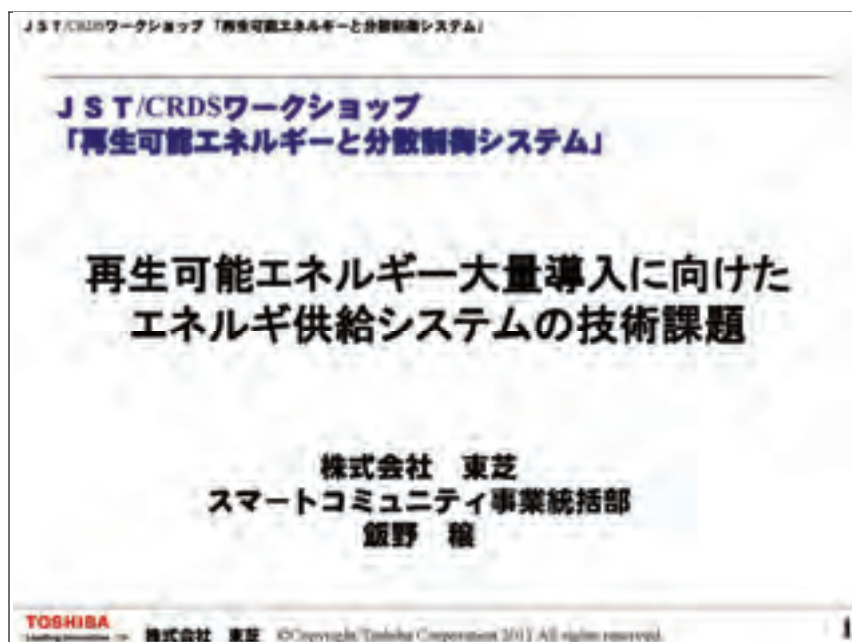
- ◆ 小規模の実験装置を併合したハイブリッドシミュレータの開発と実証実験
- ◆ 並列分散型計算機を用いた電力ネットワーク制御の高精度シミュレータの開発
- ◆ 計算機シミュレーションおよび模擬シミュレータを用いた①～③の分析・評価研究

国内外の研究動向

- ◆ IEEE の Transaction に、2010 年より新たに ”Smart Grid, IEEE Transactions on” が追加されたのに象徴されるように、国内外で、スマートグリッドに関する学会発表数や論文数、特集号、学会での特別セッションなどが増加している。
- ◆ アメリカは、NIST 等でシステムの標準化や全体のシステム設計をどんどんやっており、日本にはそこが弱い。
- ◆ アメリカの電中研と言われる EPRI のような研究所では、90 年代からマイクログリッドの研究をしており、独立型の電源システムが研究されている。理論的には研究されて、あるいは一部、国プロなどで実証試験もあったが、経済性という意味で時期尚早であると言われている。
- ◆ 気象・気候予測研究では、日本はアメリカ、ヨーロッパと肩を並べる高いレベルにある。特に、日射量測定・予測に関しては、日本にアドバンテージがある。気象・気候予測は、HPC が必要であるため、計算インフラが整備できているという意味でも日本に強みがある。

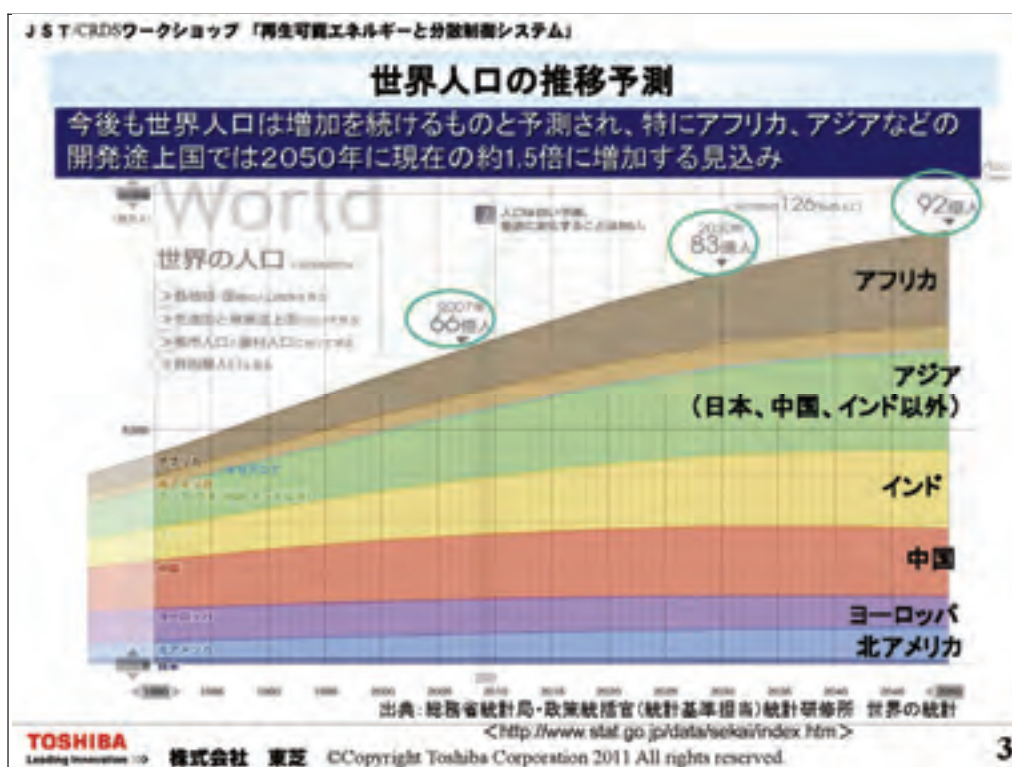
6. ワークショップ講演記録

6. 1 飯野穰先生 ご講演記録



私は産業界の立場から、今日のテーマである再生可能エネルギー、分散制御といったキーワードに対して、今どういうニーズがあるかという材料を提供させていただきまして、この後の先生方のご発表につながればと考えております。

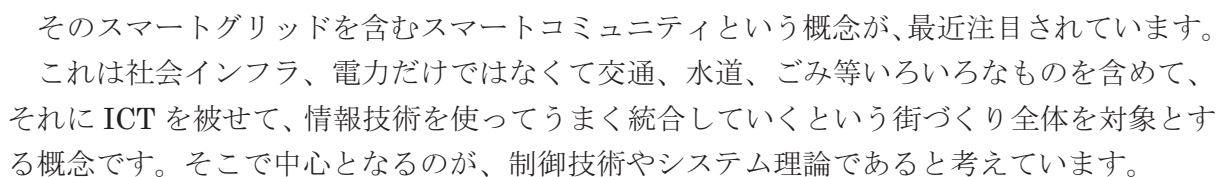
まず第一部として、現状の電力系統インフラがどうなっており、そこに再生可能エネルギーが大量に入ってきたらどういう課題が生じるか、そういったご紹介をいたします。

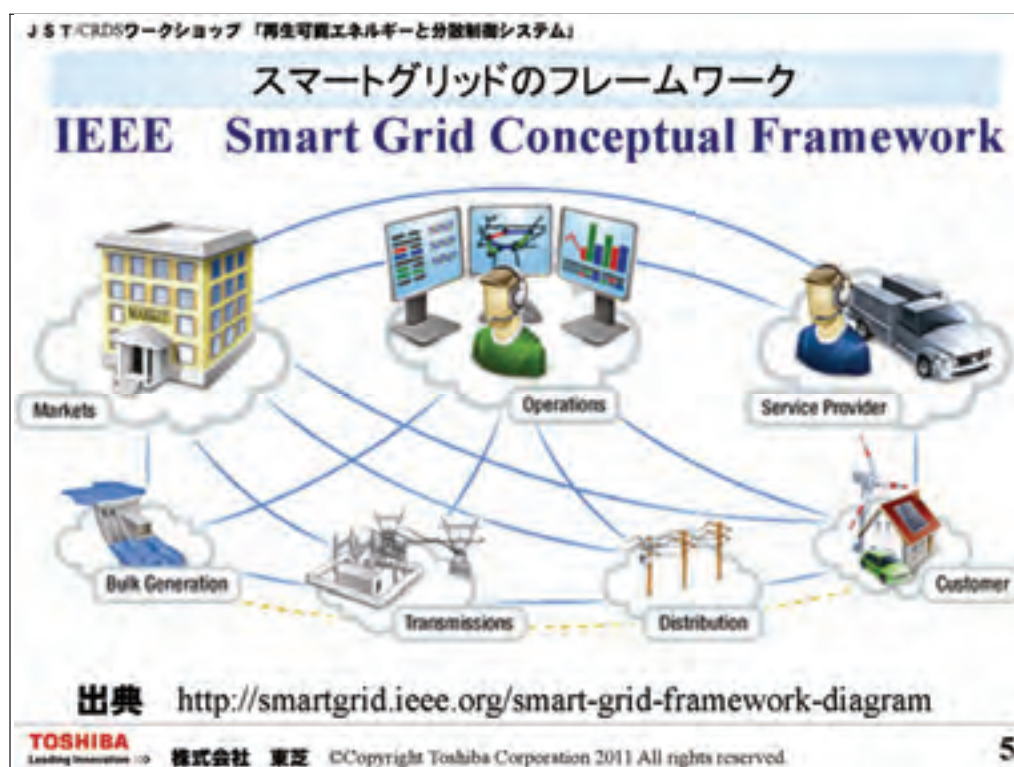


まず、世界人口の動向ですが、全体の人口がどんどん増え、特にアフリカやアジアでは、2050年には今の1.5倍の人口になる、こういった人口動態が問題視されております。

当然それに伴い、エネルギー消費量も増え、CO₂排出量も増えます。現状のままいきますと、CO₂排出による地球温暖化で、2050年には6℃以上の気温上昇が懸念されるというベースラインのシナリオが描かれています。これに対し、CO₂の固定化や原子力への置換云々の対策が考えられており、何とか気温上昇を2℃程度に抑えたいという検討がなされております。

様々な対策がありますが、二酸化炭素の固定化などの対策もやはり限界があります。そういう中で、再生可能エネルギーとそれをうまく使うためのスマートグリッドが注目されています。



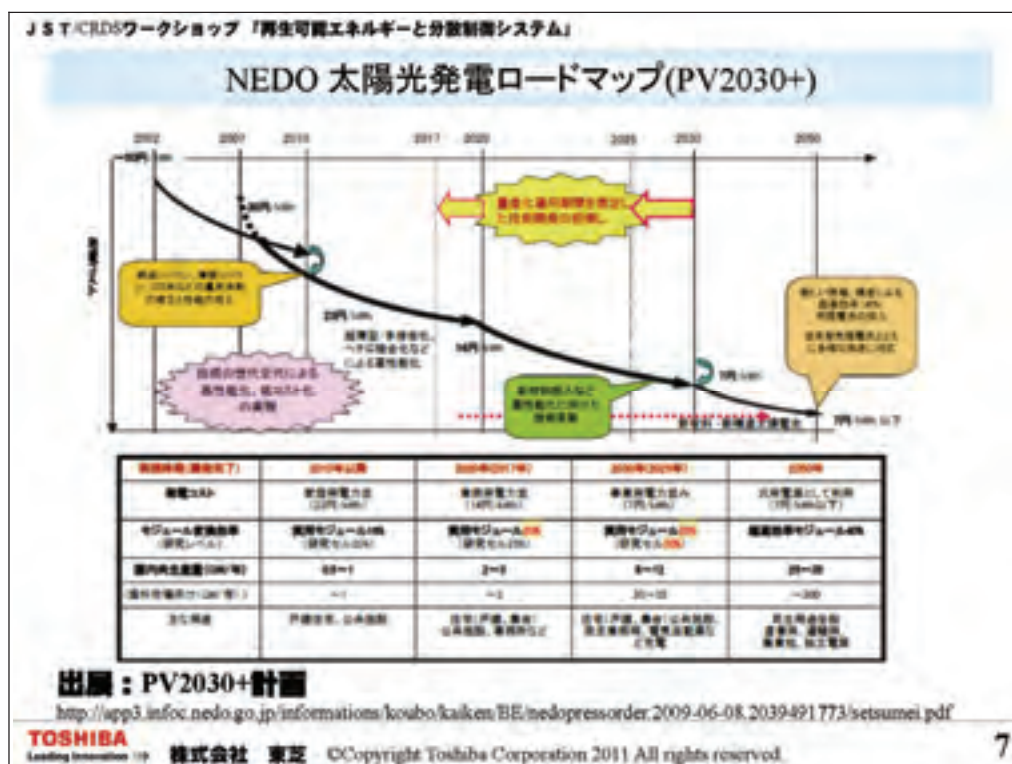


スマートコミュニティにはいろいろなタイプがありまして、アメリカでは供給信頼度強化型、日本あるいは欧州では再生可能エネルギー大量導入型、あるいは新興国では急成長型とかゼロベース都市型とか、そういったいろいろなタイプがあります。

例えばアメリカの場合、IEEE にこういった絵が載ってまして、スマートグリッドのフレームワークというのは大型電源、送配電、需要家、さらに市場とオペレーションとサービスプロバイダ、こういった構成要素で定義されております。



一方、日本ですが、今までの日本の電力系統というのは発電所から電力系統、配電系統、需要家と一方向的な流れでありました。ところが、ここに分散電源、例えば太陽光発電、PVが増えるとか、今後、移動する負荷／電池である EV（電気自動車）が増えると逆方向の電力の流れも出てきて、電力系統の管理上、非常にややこしいことになります。



例えば太陽光の導入計画ですが、NEDO のロードマップを見ますと、2030 年までに今の電力料金とほぼ同等の料金まで下げるために普及させたいと。政府が掲げている目標は、2020 年に 2,800 万キロワット、こういった大量導入の目標が、今、掲げられております。

JSI CRDSワークショップ「再生可能エネルギーと分散制御システム」

3.11のエネルギー政策への影響

国家戦略室
「新成長戦略実現会議」
平成23年7月29日
エネルギー・環境会議決定案

2. 戦略の視座
【日本のエネルギー戦略の定直し】

(2) 基本理念2: 新たなエネルギーシステム実現に向けた三原則

分散型の旧システム → **分散型の新システム**

原則1: 分散型のエネルギーシステムの実現を目指す。

- 新たな技術開発に基づき革新的なエネルギーシステムを目指す。
- 現在の分散型エネルギーシステム(地域独自の電力会社による大規模電源が電力供給の中心を担うシステム)の改良ではなく、分散型の新たなエネルギーシステムを目指す。
- 分散型エネルギーシステムへの転換が、エネルギー・環境社会への貢献投資を喚起し、新しきビジネスモデルを構築する、経済成長の基となる。エネルギーシステムの分散型への転換を、日本の経済社会構造そのものを分散型に転換する基盤とし、我が国域上・域間の安全や地域社会の維持・発展につなげる。

原則2: 課題解決先進国としての国際的な貢献を目指す。

- 技術と政策に即行した解決手法を実現し、課題解決先進国として世界に貢献する。
- 内外の知見を我が国に結集し、世界に先んじて新たなエネルギーシステムの構築を実現する。

原則3: 分散型エネルギーシステム実現に向け複眼的アプローチで臨む。

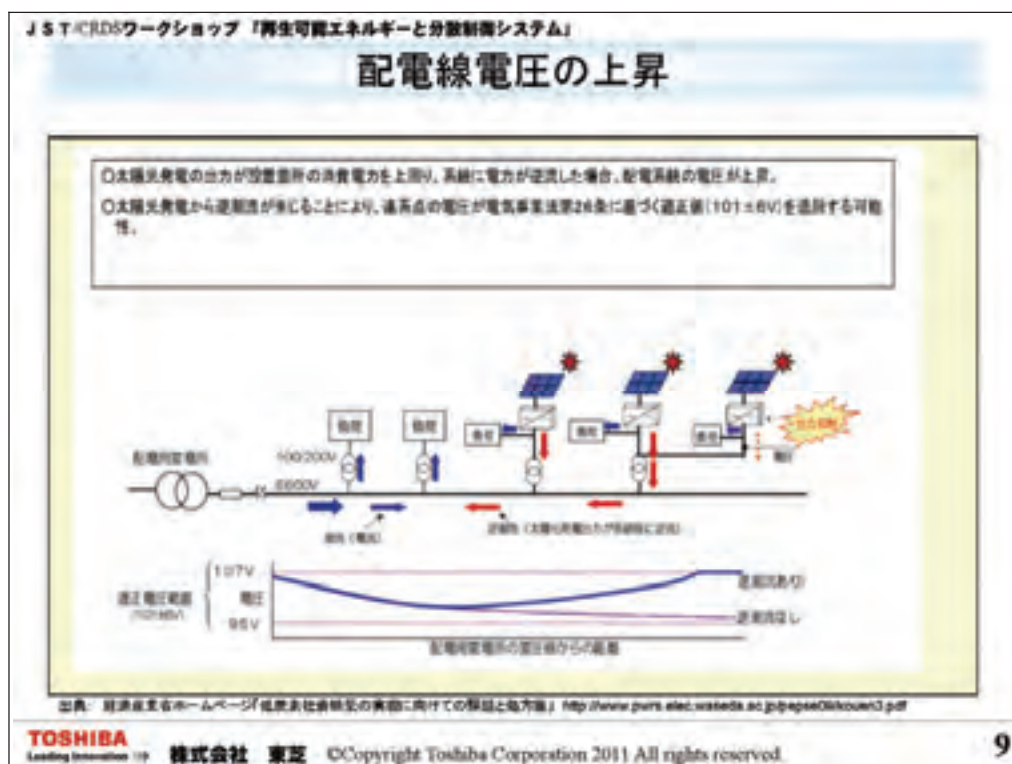
- 当面のエネルギー供給安定策を推進すると同時に、未来を志向した新たなエネルギーシステム実現の中長期的戦略を構築する。当面の対策と中長期的戦略は相互補完的なものとする。
- 当面の対策は、中長期的な方向性を視野に入れ、エネルギー構造の転換を先行実施する内容とすると同時に、中長期的に効果を発揮する施策であっても、早期に着手し具現化する。

出典: http://sv1.npu.go.jp/policy/policy09/pdf/20110729/siryo2_3.pdf

TOSHIBA
Leading Innovation 株式会社 東芝 ©Copyright Toshiba Corporation 2011 All rights reserved.

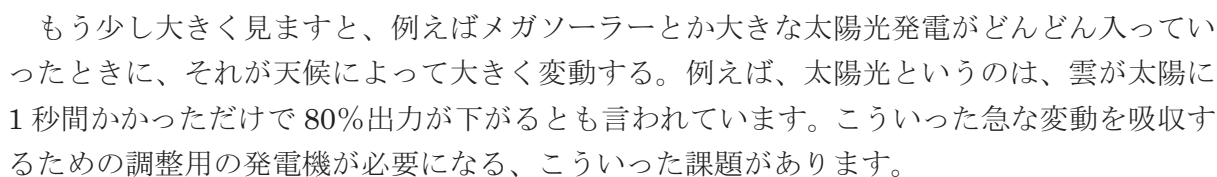
8

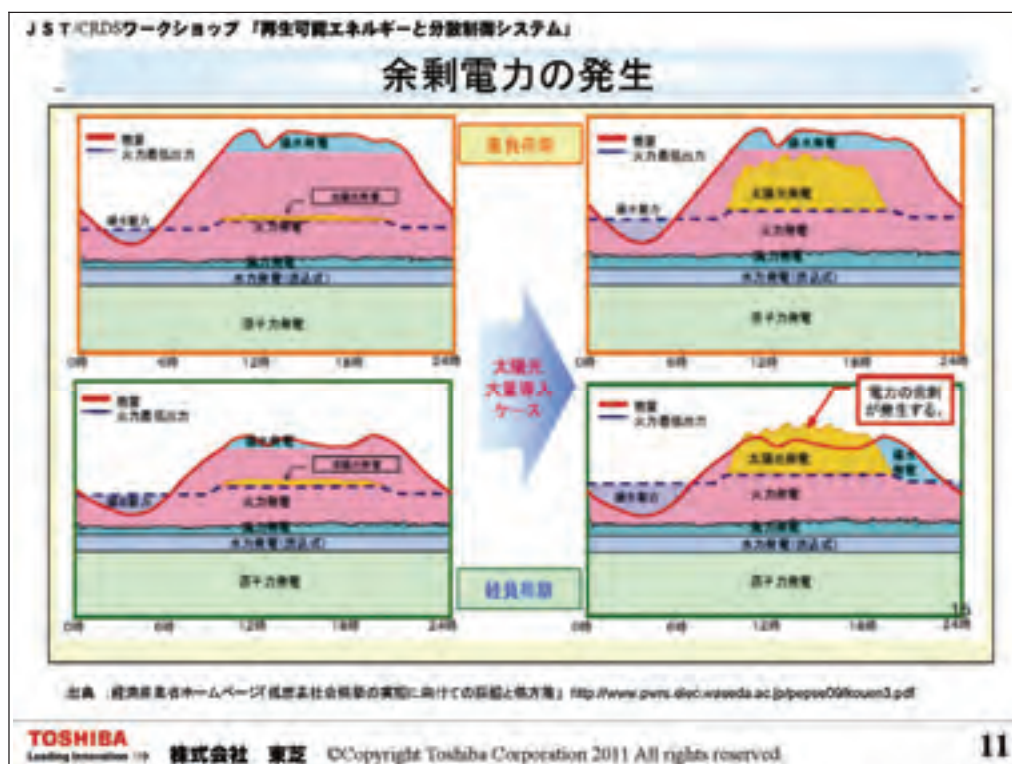
さらに、3.11以降、国家戦略室の新成長戦略を見ますと、今までなかったエネルギーのセキュリティ、経済性、環境への適合に加えて安心・安全というキーワードが入っています。そこでもやはり「分散型エネルギー」というキーワードがしっかりと書かれています。こういった分散型エネルギー、そのための分散制御技術といったものがいよいよ必要になってきていると思われます。



ここからは、太陽光発電がどんな問題を持っているかを簡単にご紹介します。

これは住宅用の太陽光発電が1つの配電系統にぶら下がっている絵でございますが、電気が余剰のときに、逆潮流というのを発生します。その逆潮流によって配電線の電圧が上がってしまうという電圧異常の問題がありまして、その結果、一部の住宅では、せっかく発電の機会がありながら、電圧がある規定値以上になってしまうために逆潮流できない、いわゆる発電の機会損失を発生してしまい、経済損失にもつながり得るという問題があります。



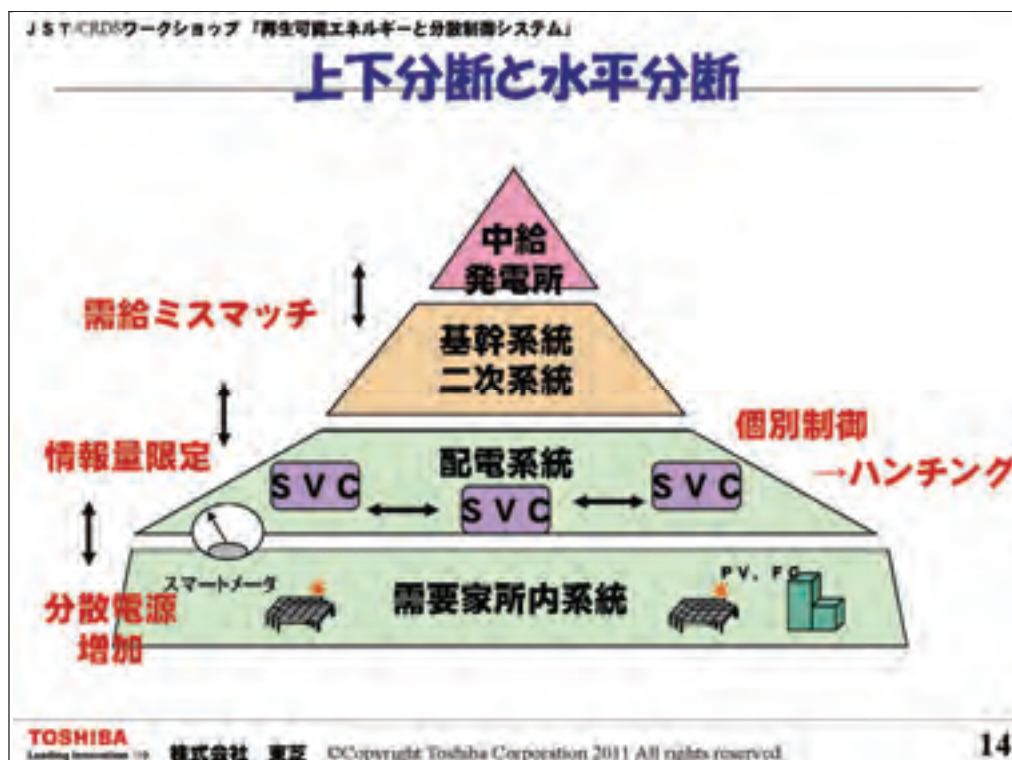
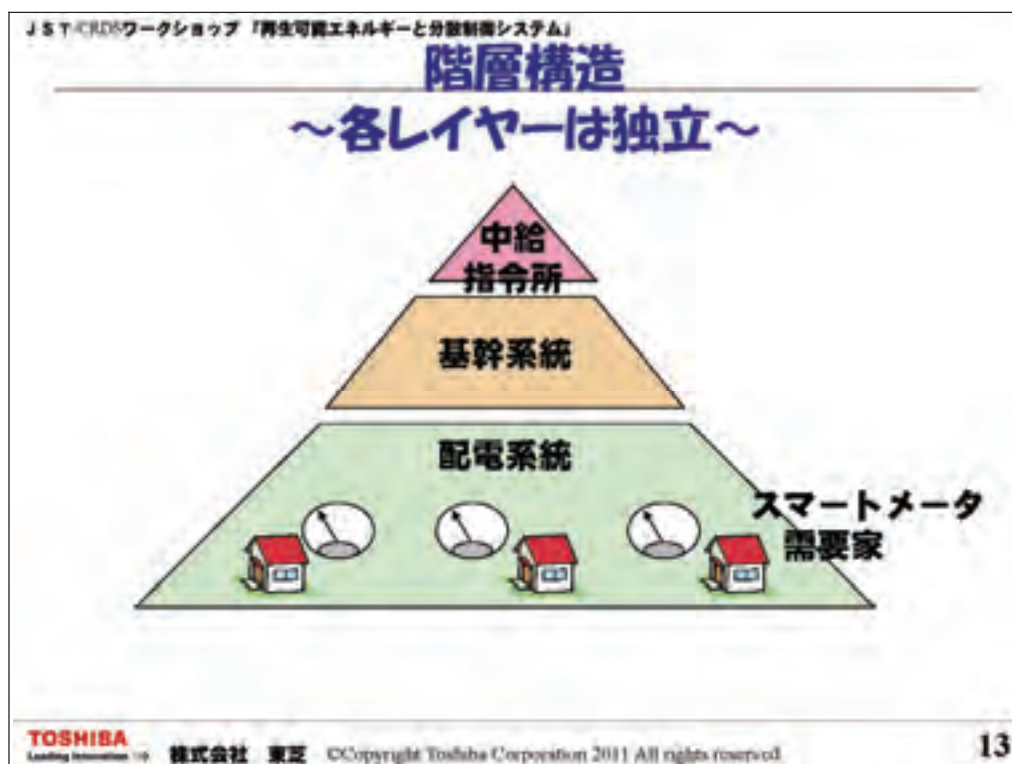


さらに、余剰電力が大量に発生すると、いよいよその系統全体のバランスがとれなくなる、いわゆる周波数の問題が出てきて、その余剰電力に対して最後は太陽光発電システムを切り離さないといけない。発電機会の損失といったことが出てきます。

余剰電力対策として、系統に大量の蓄電池を置いて、そこで変動を吸収しようということが議論されています。ただし、この蓄電池は多大な設備投資、一説によると何兆円という投資になるそうです。これを何とかシステム技術で安く、賢く解決したい、このあたりに一つシステム理論の活躍の場があるのではないかと思います。



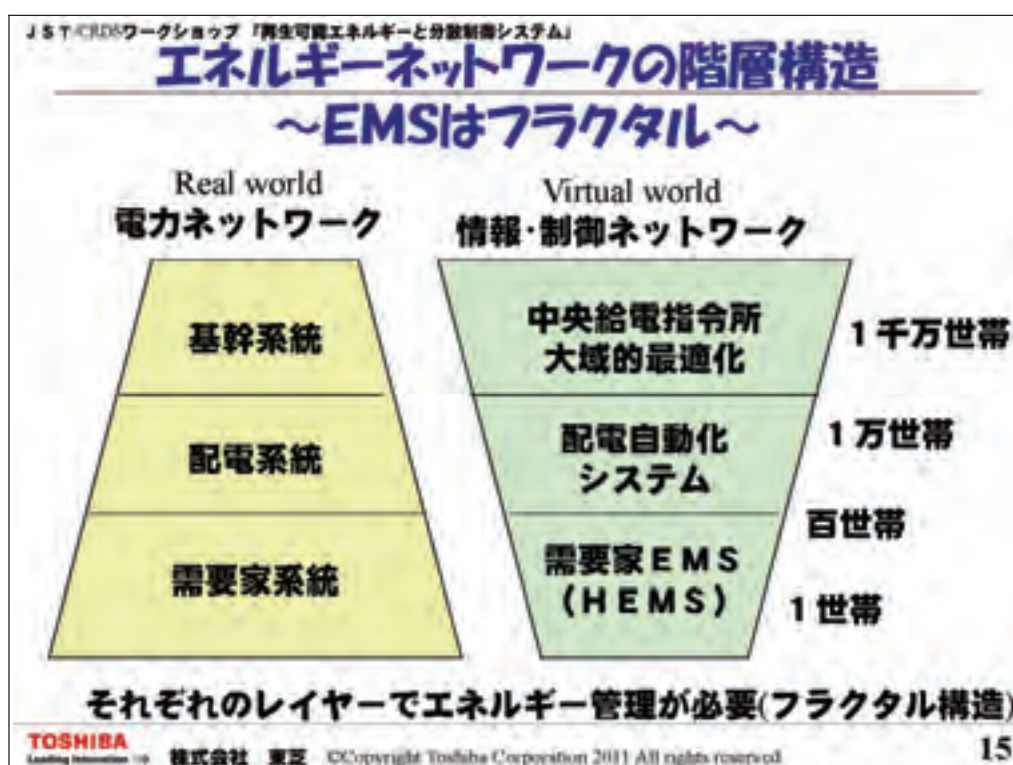
第二部では、電力系統に関して、情報やシステムの考察を加えてみたいと思います。



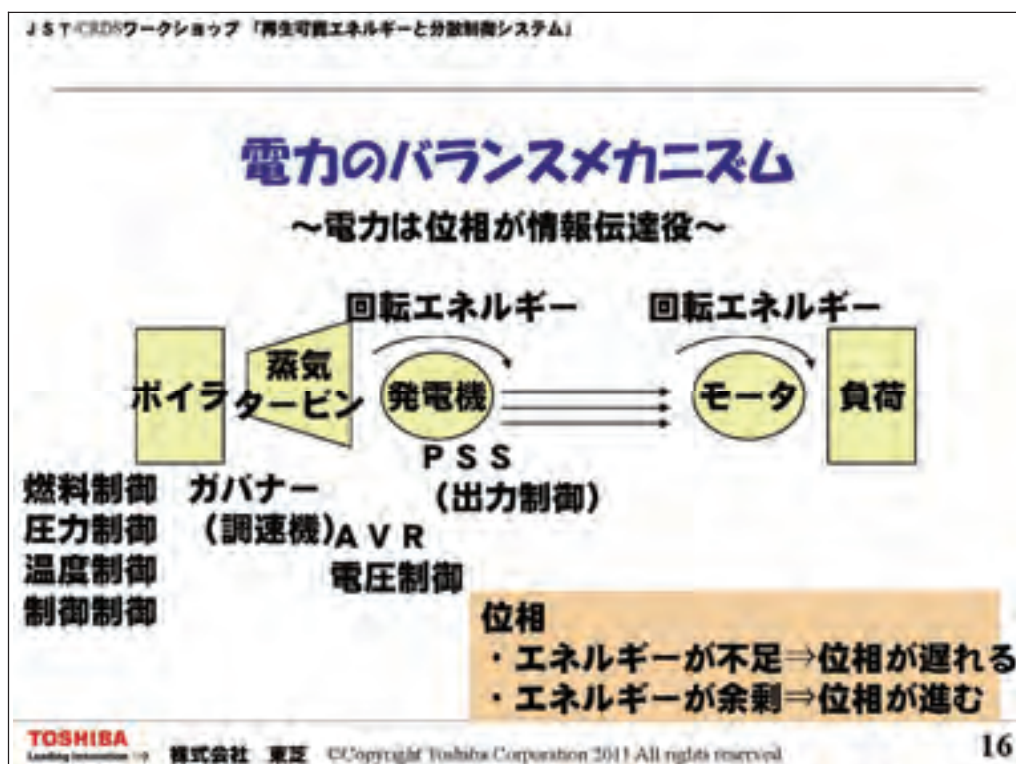
日本の電力系統は階層構造によく例えられます。中央給電指令所が全体を見ており、その下に基幹系統、配電系統、各需要家と層になっています。

各需要家個々を上が見ているわけではありませんので、例えば各家に入ってきた太陽光発電といった分散電源がどう動いているかという情報が十分上に伝わりません。その結果、需

給のミスマッチが発生する。あるいは配電系統の中に複数のコントローラがあるのですが、それがお互いに連系していないためにハンチングを起こしてしまうというように、上下方向も水平方向も情報が分断されているのが現状です。

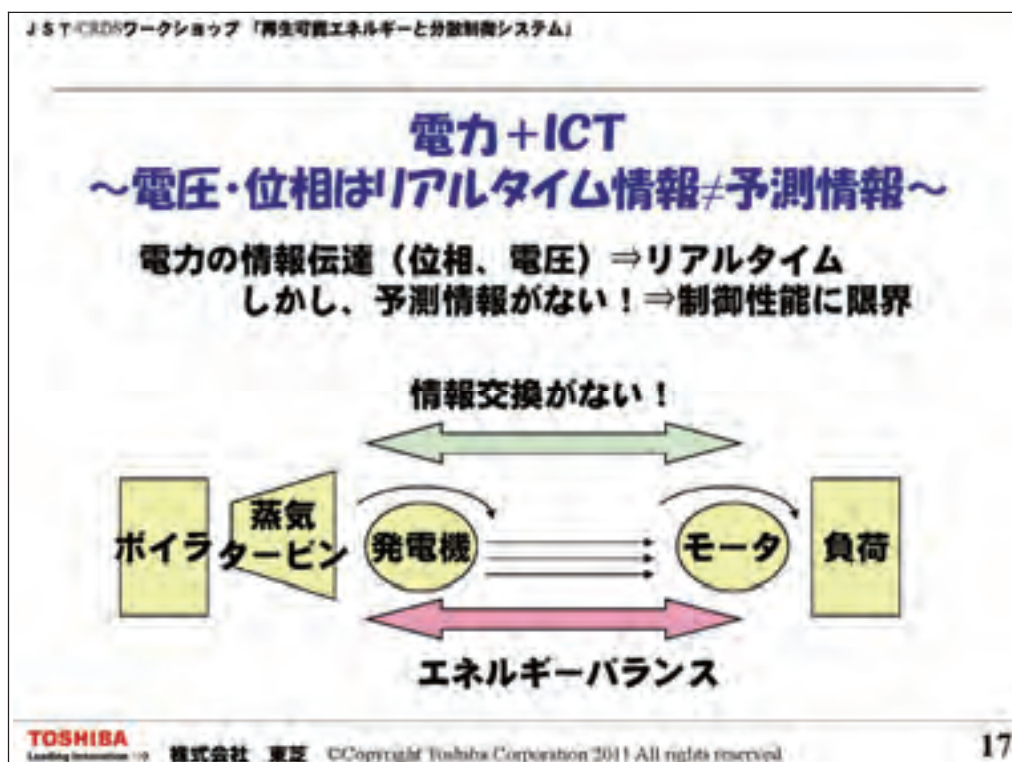


また、エネルギーマネジメントシステムとして、配電系統、基幹系統、需要家系統というのは、ある意味、非常に似た構造がフラクタル状にあるのが特徴です。このフラクタル構造を何とか最適に動かす方法がないのか、このあたりも課題と考えられます。

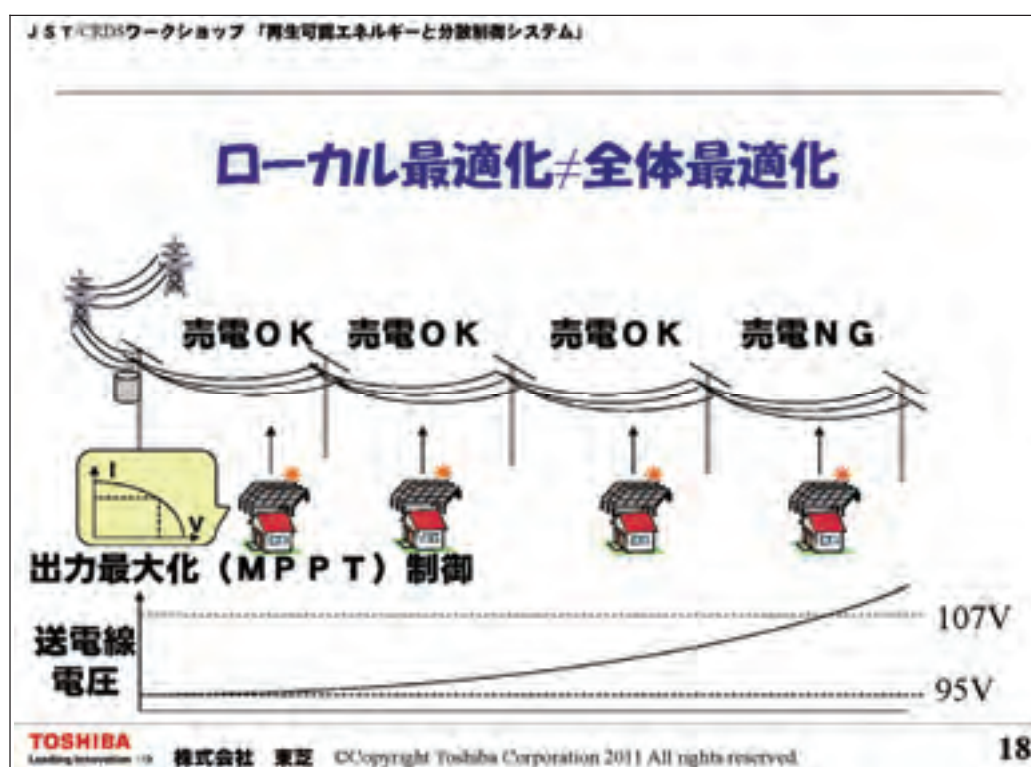


それから、電力のバランスメカニズムということで、現状どうやって制御されているのかをご紹介します。

基本的には、発電機側が回転エネルギーを電気エネルギーに変えて、負荷側にモーターがあるとしたら電気エネルギーを回転エネルギーに変える。このときに、例えば負荷が重くてエネルギーが不足すると回転数が下がってくるので位相が遅れる。逆に、エネルギーが余ると回転数が上がって位相が進む。この位相情報でバランスがとれていることになります。



これは、いわゆる物理系のエネルギーバランスのメカニズムですが、一方で、情報系のつながりが今のところないわけですね。位相あるいは電圧もあるのですが、結局こういった情報伝達はリアルタイムのものでして、そこに予測情報というものはありません。したがって、制御性能に限界が出てくる。ここに電力+ICT という情報技術をかぶせることによって、もっと制御性能を上げられる、パフォーマンスを上げられる可能性があるわけです。

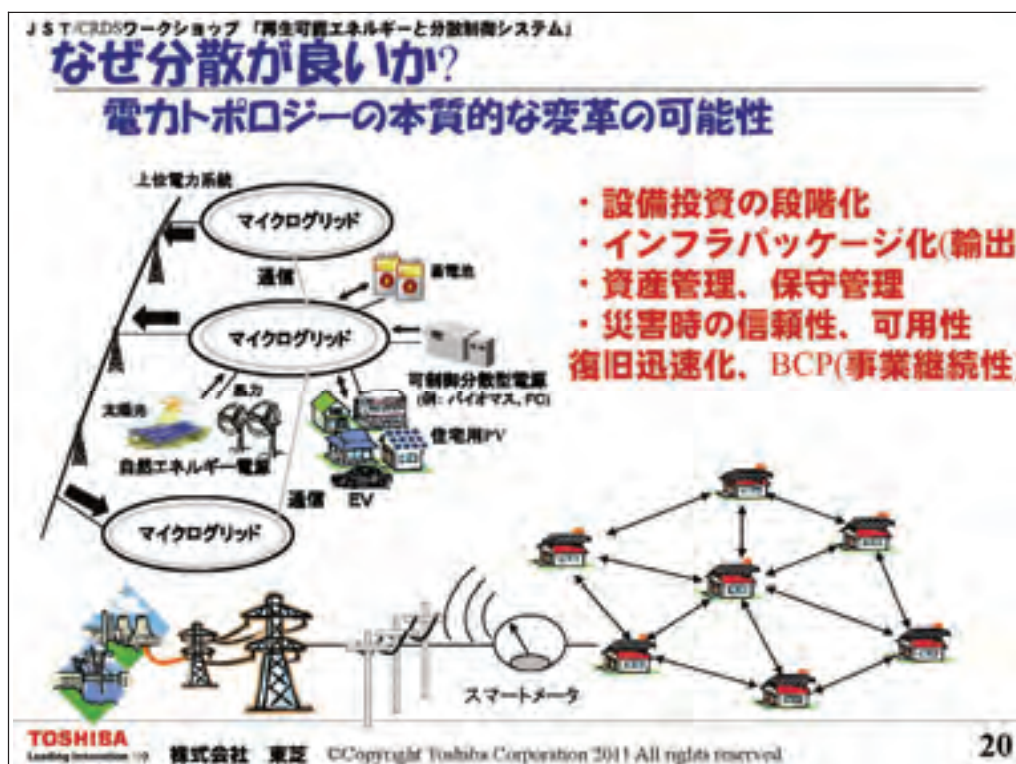


次の例は、必ずしもローカル最適化が全体最適化ではないという例です。

これも太陽光の例ですが、一軒一軒の家には太陽光発電とパワーコンディショナーがあって、とにかく出力を最大化しようとローカルで最適化しております。そのために目いっぱい売電するわけですね。その結果、先ほど申しましたように配電系統の電圧が異常値を来して、ある一部の需要家は売電できなくなってしまう、いわゆる機会損失を発生してしまう。これを何とかみんなで協調して全体としての出力を最大化できないか、そんな問題もあります。



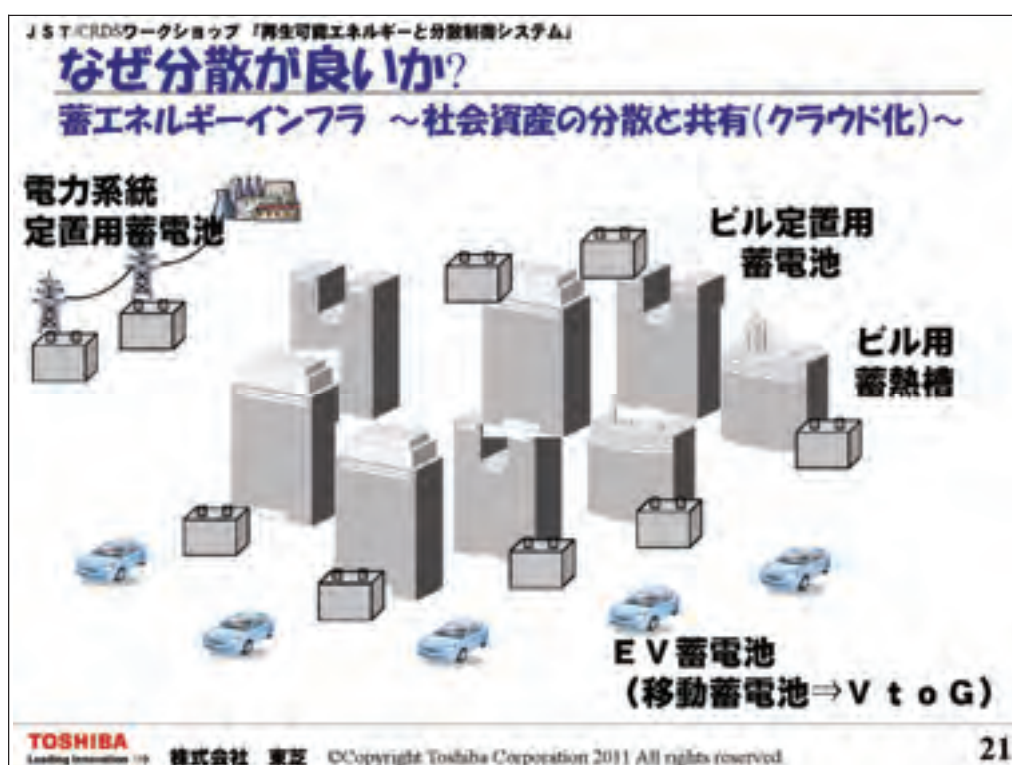
ここまでにお話した様々な課題を踏まえ、最後の第三部では、今回のテーマである分散制御システム、市場原理、それから ICT を使った予測やシミュレーション、こういったところへの期待を述べたいと思います。



まず「分散」というキーワードですが、なぜ今、分散が必要なのでしょう。一つの可能性として、電力トポロジーを本質的に変革できないかという可能性を考えてみたいと思います。

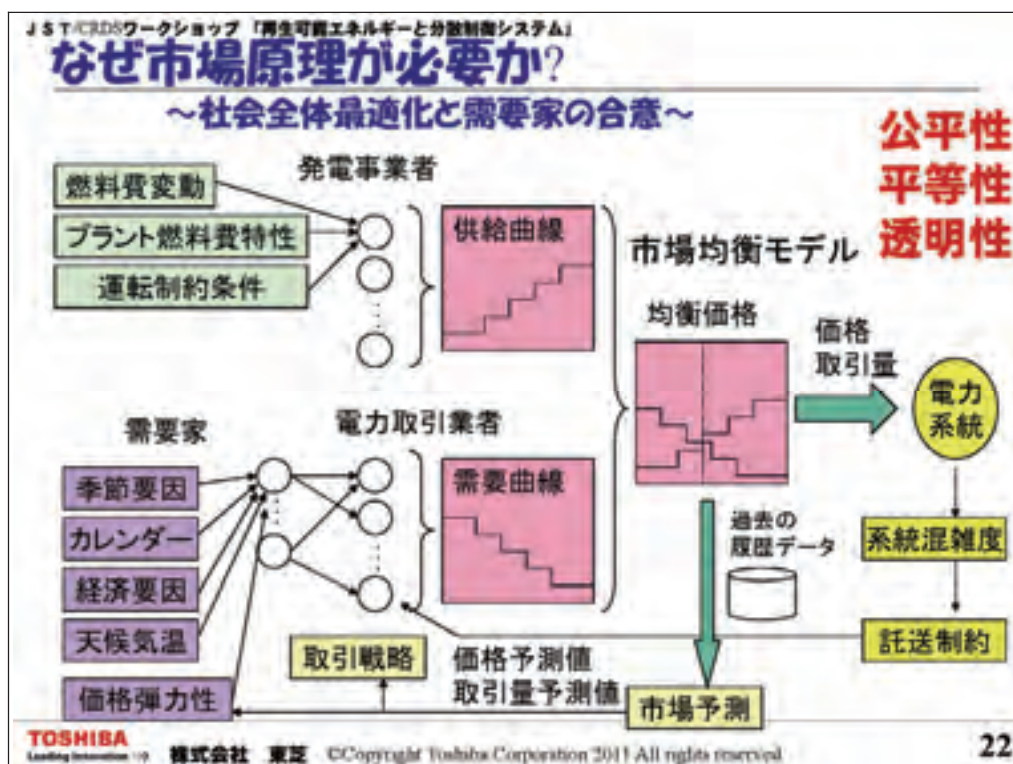
大きな設備はそれだけ全体が最適ですが、一方で、分散化することによって設備投資を段階化できる、あるいはインフラをパッケージ化することによって我が国のこういった技術を輸出しやすくなる、また資産管理、保守管理上も都合がいい、さらには災害時の信頼性とか可用性、あるいは復旧の迅速化、事業継続性という意味でも、やはり分散化することによって機能の一部を生き残らせるといった考え方があり得る。

その一例として、例えば電力系統をこのようなマイクログリッドという仕組みで分散化する、あるいはこれから需要家にスマートメータが普及してきて、これが智能化するとしたら、お互いに情報系で通信しながら横連携ができるとか、こういった分散制御が考えられます。



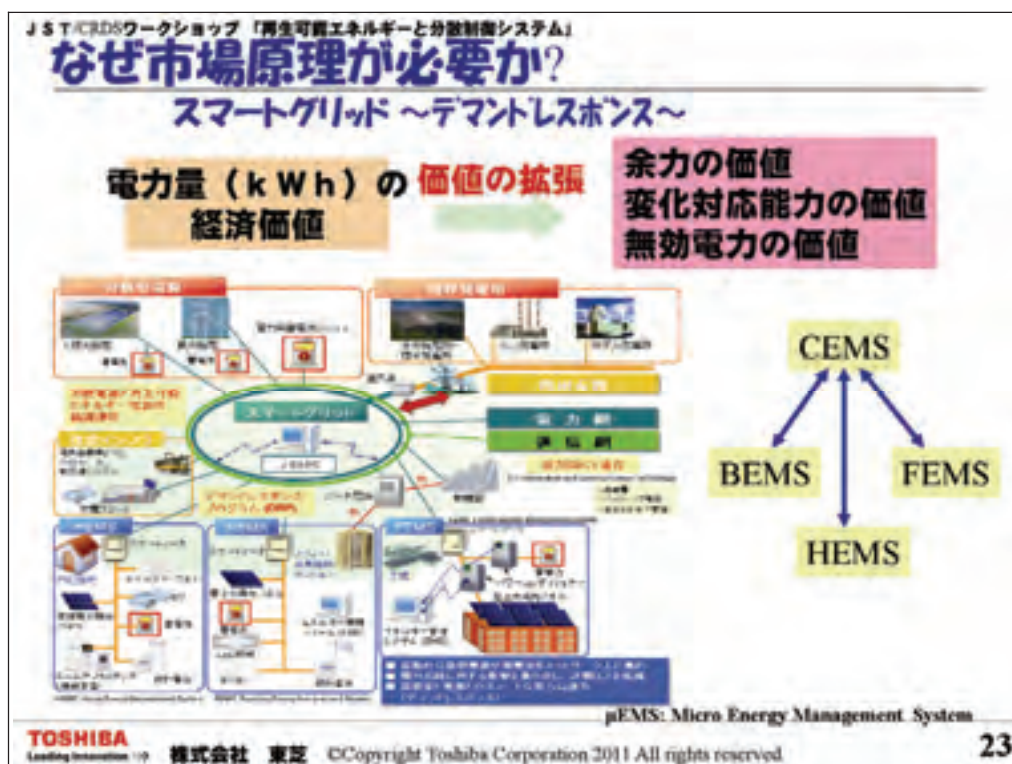
もう一つの視点ですが、逆に、分散している社会資産を共有するクラウドという概念があります。

クラウドというのは、今、クラウドコンピューティング、計算機のリソースを共有してみんなで使うという概念がありますが、同じような概念で、蓄電池を共有しようという話があります。今後、電気自動車が普及していくとたくさんの電気自動車、さらにそのリニューアブル電池がビルとか需要家で使われることになります。これは需要家の持ち物ですが、これを少しずつ集めて社会全体で共有すれば、バーチャルで巨大な電池ができるわけです。そのバーチャル電池で先ほどの太陽光の変動を吸収できないか、という話もあります。これが、なぜ分散がいいかという一つのヒントになるのではないかと思います。



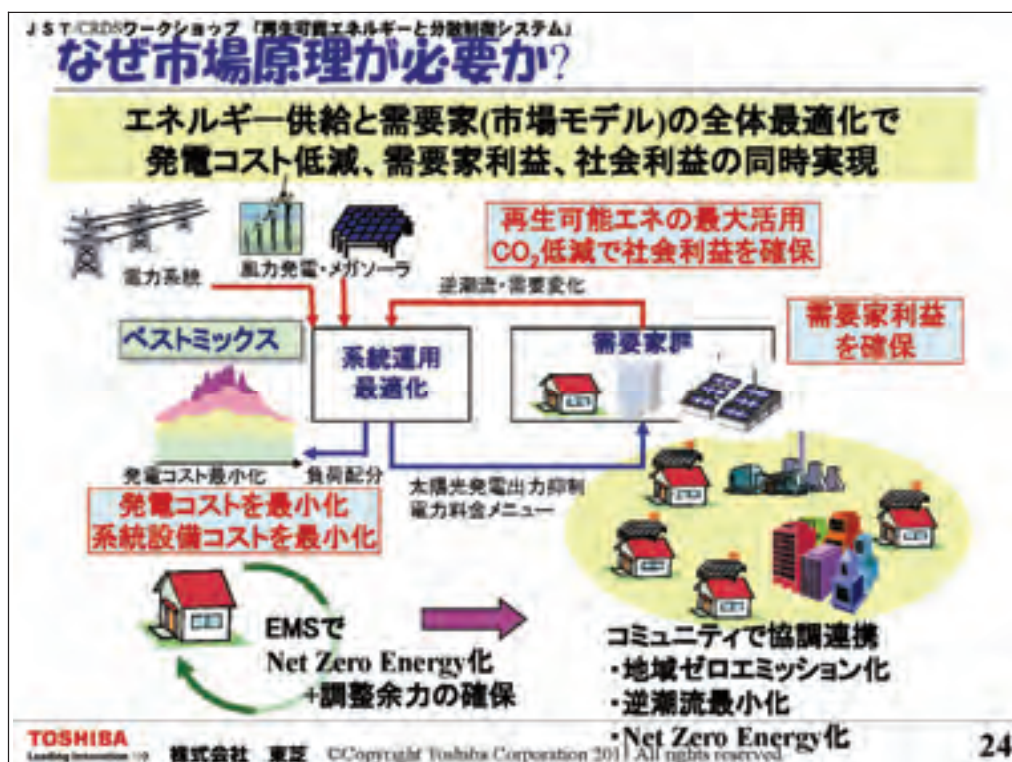
次は、市場原理です。

なぜエネルギーで市場原理かといいますと、これは市場メカニズムで需用と供給のバランスをとろうという考え方で、公平性とか平等性、透明性という意味では、ある意味、最適な仕組みであると思っています。こういった仕組みは、既に欧米では電力自由化で、電力取引等で行われておりますが、一方で、スマートグリッドではさらにその先の価値の創造というものが考えられております。

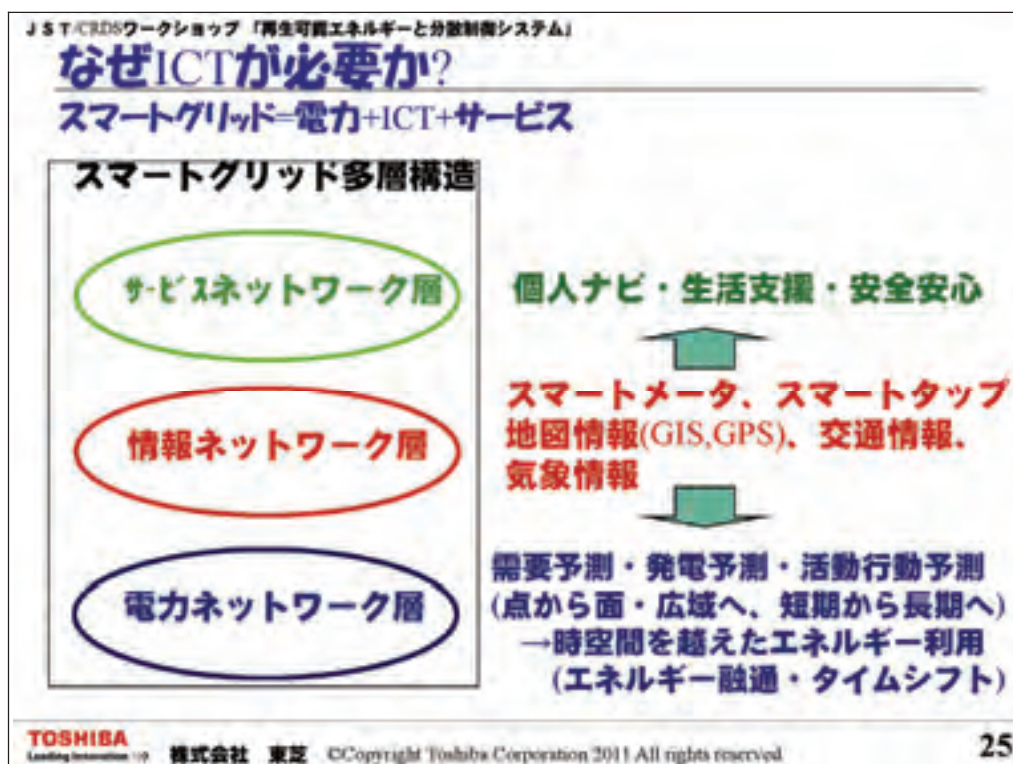


スマートグリッドはインターオペラビリティといいまして、発電側と需要家側が双方向に通信してコミュニケーションする。そこで何をやるかという、デマンドレスポンス、要するに「今、発電がちょっと足りないので需要家側に我慢してほしい」といったように、お互いに調整することが目指されております。

そこには単なる kWh (電力量) の経済価値だけではなくて、電力の余力の価値とか変化への対応能力の価値とか、もっと具体的には無効電力の価値とか、いろいろな新しい価値が含まれております。これを需要家側から引き出して全体最適化を目指すのがスマートグリッドの一つの可能性です。



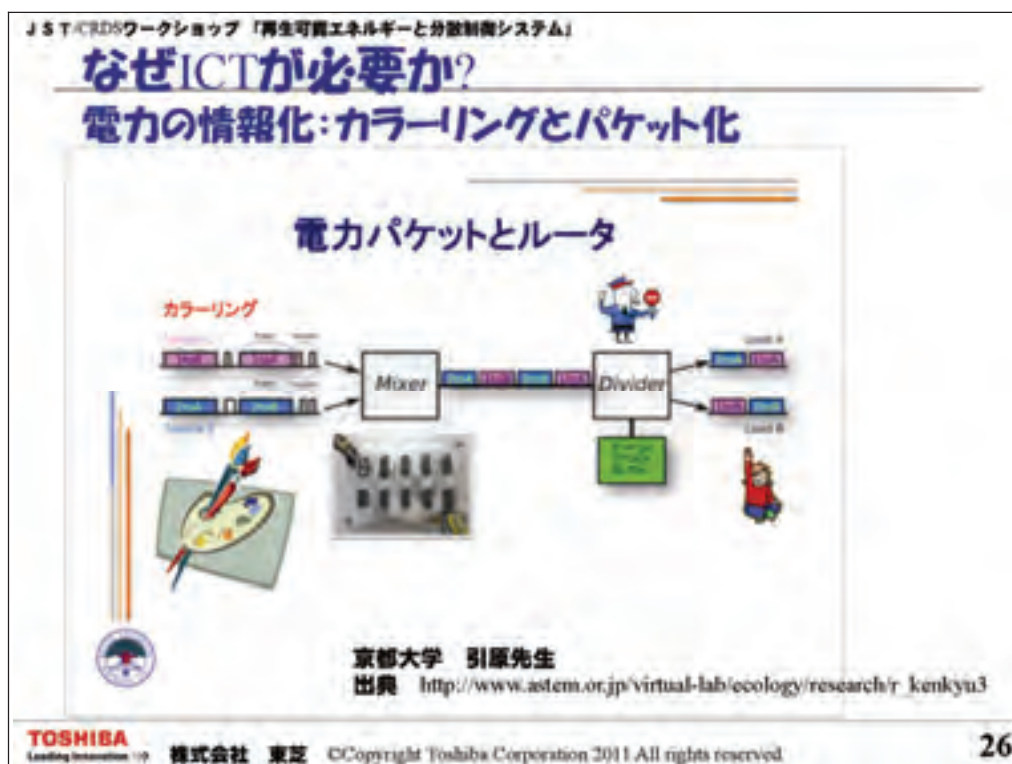
そうやって市場原理を持ち込むことによって、市場原理に基づいて需要家を柔軟にコントロールすることができるようになる。需要家をコントロールできると、今まで発電側だけで頑張っていた最適化を需要家も巻き込んだ全体最適化に持ち込むことができる。新しい電源のベストミックスという考え方が出てくるわけですね。これによって発電コストが下がるし、需要家側も利益が得られるし、結果的にCO₂が減って社会全体の利益にもつながるといったように、3者の利益の同時実現ができる可能性があります。



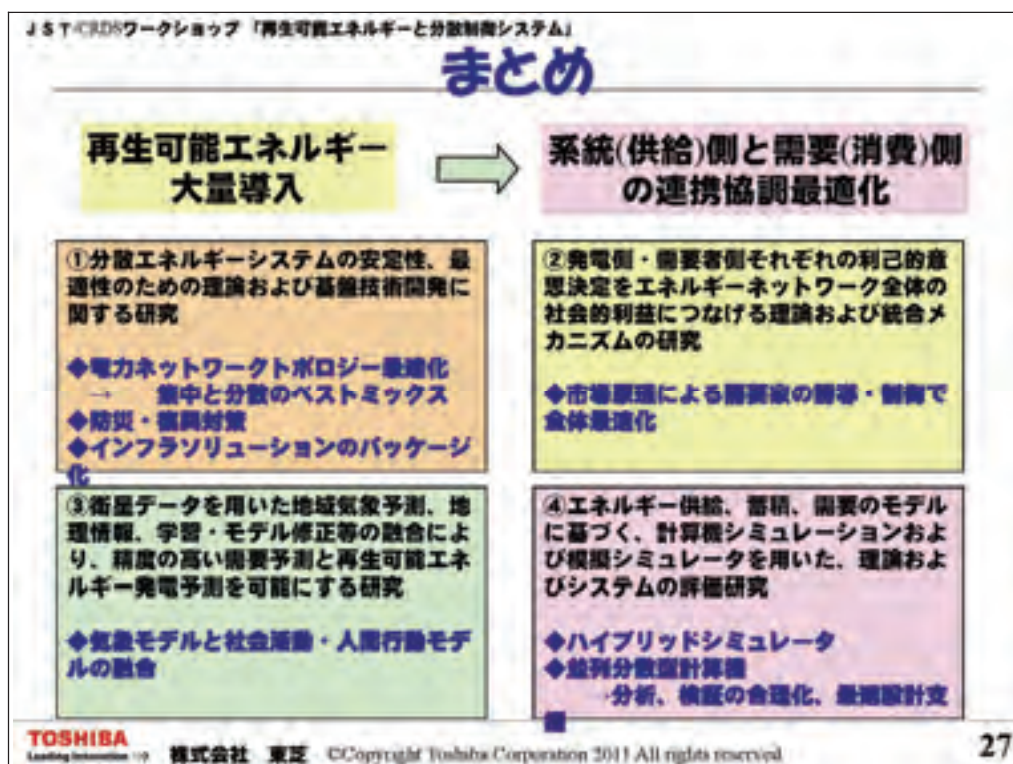
ここまでの市場原理で、最後に、ICT。

スマートグリッドというのは、ある意味、従来の電力ネットワークの上に ICT を被せる、さらにそこにサービスという付加価値を被せる、こういった構造ではないかと考えられます。

この情報のところですが、具体的にはスマートメータやスマートタップ、いわゆるコンセントから情報がとれる仕組みとか、さらには地図情報とか衛星情報とか気象情報とか、場合によっては交通とか、いろいろな情報が世の中から集められる。これを生活支援みたいな付加価値側のサービスにも役立てるし、あるいは電力ネットワークの制御側にも役立てる。具体的には、例えば需要予測をより高精度化して、さらに点から面、広域への需要予測に拡大する、あるいは短期から長期への需要予測に拡大することによって、より精度の高いエネルギー制御ができる。結果的に、よく言われます時空間を超えたエネルギー利用、エネルギーの融通とかタイムシフトをより最適に行うことができるようになる、こういった価値があり得ます。



ICTをどう電力に被せるかというのは、今、いろいろな研究がなされています。そのごく一例ですが、例えば、これは通信屋さんのほうで考えられているカラーリングとパケット化という概念で、電力に仮想的に色をつけよう、仮想的にパケット化しよう、という研究もあるくらいです。このように、電力と情報というのはもっと研究することがたくさんありそうだと考えられます。



以上、いろいろな課題、可能性を産業界の立場で考察してまいりましたが、今日のワークショップの4つの課題である分散、市場原理、例えばICTの1つである需要予測、さらにシミュレータ、こういったところに新たな課題とか可能性があるのではないかと期待できます。

具体的には、分散で電力ネットワークトポロジーの最適化とか、防災、それからパッケージ化といった概念、それから市場原理による全体最適化、気象モデルによる需用予測の面的広域情報の活用、それからシミュレータでマクロからミクロまで、あるいはフラクタルな現象を分析、検証できる仕組みづくり、こういった課題解決の可能性があるのでないかということ、私の発表を終わりたいと思います。

＜質疑応答＞

○中島

バッテリーのインフラ整備には何兆円もかかるとおっしゃいましたが、それを市場原理のインセンティブに結びつけるような方法はあるのでしょうか。例えば、小さな会社を興すとか、自分の家で EV を導入するとか、もっと大きな蓄電池を導入することによって夜間も売電するなどですね。もしそういった可能性を考えた場合、逆潮流現象というのは大体何%ぐらいから問題になるのか、教えていただければと思います。

○飯野

今、20%ぐらいまで太陽光を導入したいという目標がありますね。今のインフラのままでは、2015 年頃まで 1,000 万キロワット程度、つまり数%~10%程度の太陽光が導入された段階から、逆潮流などのいろいろな問題が出てきて、最終的に 20%になるとときには相当問題になるだろうという説があります。

今は、再生可能エネルギー、太陽光だけではなく風力も含めても、まだ 3%程度です。ただ、容量に対して 3%といっても、例えば夜間に需要が下がっている時に、強風になれば相対的に大きくなってしまいますし、太陽光も、ゴールデンウィークのように比較的家に人がいて、工場は休み、天気は非常に良いがそれほど暑くないのでエアコンがあまり稼働していない、そんな状況では余剰が出てしまいます。そういった条件によってかなり現象が変わってくると思います。

○安岡

都市では、新しい家や新しいビルが建ったり壊されたりして、BEMS にしても HEMS にしても、日々変わるわけですね。ですから制御系のシステム構造が日々変わっていくことを考えなければいけないと思いますが、分散制御システムの場合、どうコントロールしていくのでしょうか。

○飯野

分散制御に対する非常に本質的なご質問だと思います。

分散と言っても、ただバラバラにやるという意味ではなくて、システム間に協調とかプラグ・アンド・プレーとかリコンフィギュレーション(再構築)とか、いろいろな概念があります。例えば計算機の場合、N 台の計算機でやっていて N+1 台目が入ったとき、それを自動認識して N+1 台の最適な計算機システムが構成される、柔軟性とか自己組織化などの機能が当然要求されます。同じように、電力の世界でも、そういうものをシステム理論に基づいて何らか実現するべきではないかと思います。

○藤田

スライド 25 にある「電力トポロジーの本質的な変革の可能性」という点に関する質問です。

現在のトポロジーに対し、これからの研究で期待できる新しいトポロジーがどのようなものなのか、違いをもう少し具体的に教えていただけないでしょうか。

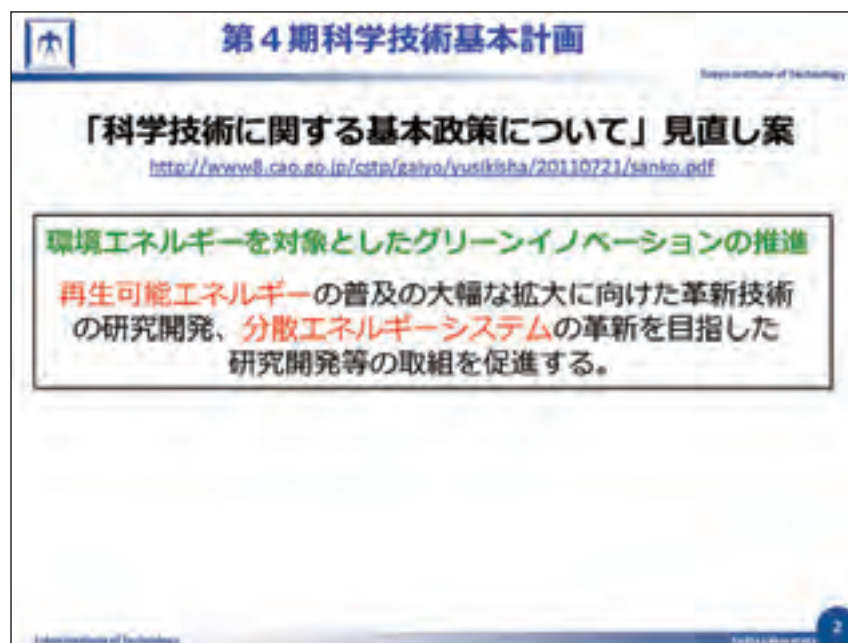
○飯野

現状の電力系統では、発電、送電、配電、需要家と電力の流れが一方向で、それがどんどん枝分かれしていくツリー状の構造であることが一般的です。これは日本だけではないと思います。

その状況に対して、例えばアメリカの EPRI (Electric Power Research Institute — 日本という電中研のような位置付けの研究所) では、90 年代からマイクログリッドの研究を行っています。1 点だけで商用系統と連系しておいて、比較的狭いエリアで電力系統を独立化し、その中は電力品質や信頼性を保ちながら電力供給をする。その中に太陽光や自家発電機などいろいろな分散電源が含まれている、そういった独立型の電源システムが研究され始めております。

このようなマイクログリッドは、2000 年以降、理論的研究や、一部、国プロなどで実証試験もありましたが、まだ経済性という意味で時期尚早であろうという結論になっております。ただ、3.11 以降、もしこういったものがあれば、例えば全体が落ちても部分的に生き残れる。生き残れば、隣の地区を立ち上げるときに予備電力を融通して迅速に復旧できるのではないか。そういった、独立系統にすることによって生き残る、事業継続性 (BCP) を確保できるという期待が高まっているのではないかと思います。あくまでも期待の段階で、具体的に我が国の系統をどうするという話まで至っていませんが、システム論的な面からこういうシステムを定量的に評価できるように準備しておく必要があると考えています。

6. 2 藤田政之先生 ご講演記録



今日は「再生可能エネルギーとモデル予測制御」という演題でお話しさせていただきますが、後半で、分散制御システムについても少し触れさせていただきたいと思います。

現在策定されております第4期科学技術基本計画では、ライフイノベーションとともに環境エネルギーを対象としたグリーンイノベーションの推進が大きな柱となっています。ここに示しているような再生可能エネルギーの普及や分散エネルギーシステムの革新に関する文言が複数箇所、入っていると伺っております。

そこで、前半は、再生可能エネルギーに着目してお話をさせていただきたいと思います。



再生可能エネルギー

Tokyo Institute of Technology

課題① 社会システム：再生可能エネルギー特別措置法, FIT

課題② コスト・出力量

・ものづくり技術による解決



太陽光発電パネル

<http://www.kyocera.co.jp/>



風力発電機

<http://www.vtr.co.jp/>



蓄電池

<http://www.daiwabo.co.jp/>

・組み合わせによる実証事業

Tokyo Institute of Technology
Institute Laboratory
3

再生可能エネルギーには、大きな期待があるとともに、幾つも問題点があるというのが現状での議論かと思います。

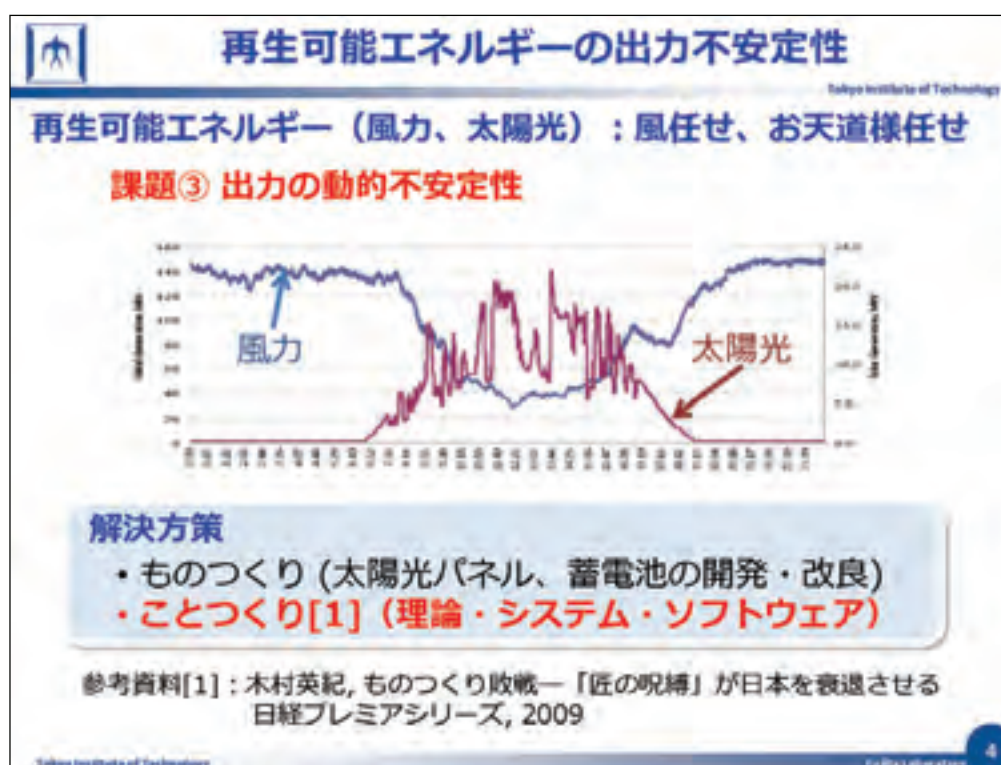
一つには、インフラストラクチャーを入れかえることにもなりますので、社会システムとしての大変革ということがあるかと思います。科学技術者とかエンジニアとかいう存在を超えて、例えばフィード・イン・タリフと呼ばれている固定価格の買い取り制度なども典型ですが、経済学者や社会学者、あるいは政治家等も加わった大きな議論が必要な課題があると思います。

それから、コストですとか出力量—この出力量というのは、こういうエネルギーで作り得るエネルギーで果たして必要とされている分を賄えるかという総量の問題も含めてですが、こういう課題もあると思います。これに関しては、我が国では非常に強いと見なせますものづくり技術によって相当程度解決を図れるのではないかと思いますし、また図っていただきたいと、私、個人的には思っております。

例えば太陽光発電ですが、私がおります東工大でも活発に研究がされておりました、この夏にオープンした新しい図書館には、最新型の太陽光発電をたくさん貼りつけて、大学としての姿勢も出しております。このように、ものづくりの発展による進展というのはあると思います。

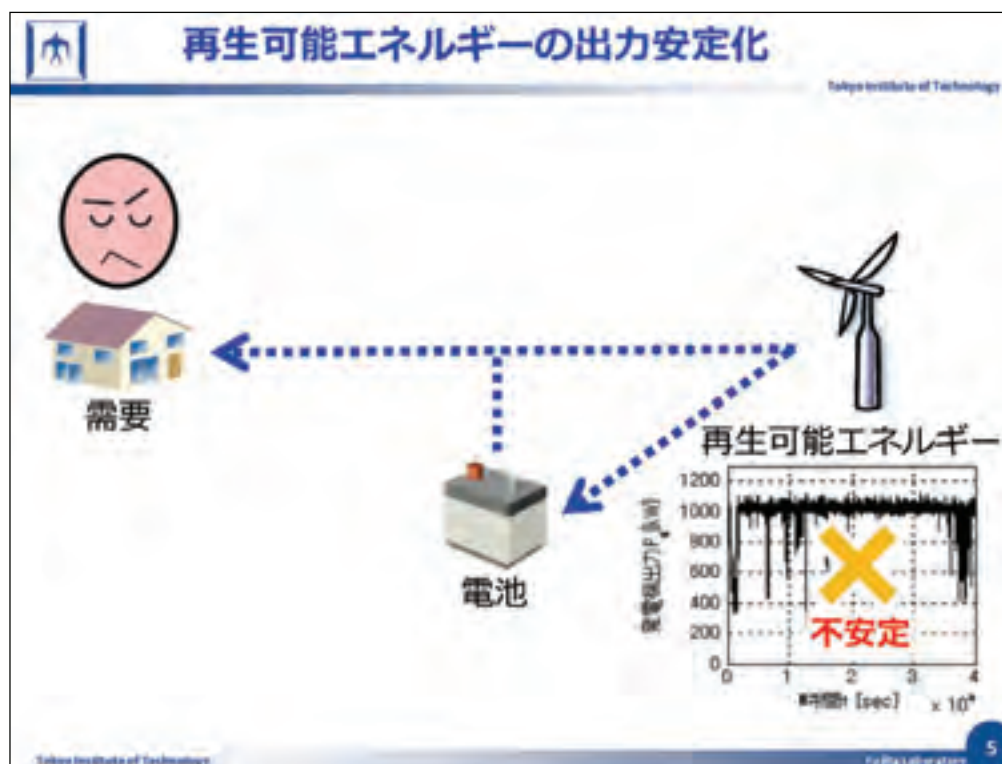
また、太陽光発電や風力発電は、二次電池や蓄電池と組み合わせてセットで使うべきだという議論も、二次電池社会システム研究会に代表される研究組織にて既に始まっております、こういうものづくりの革新も大事だと思っております。

さらに、これらを組み合わせたさまざまなタイプの実証事業も、こういう課題に向かっていくものだと思っております。



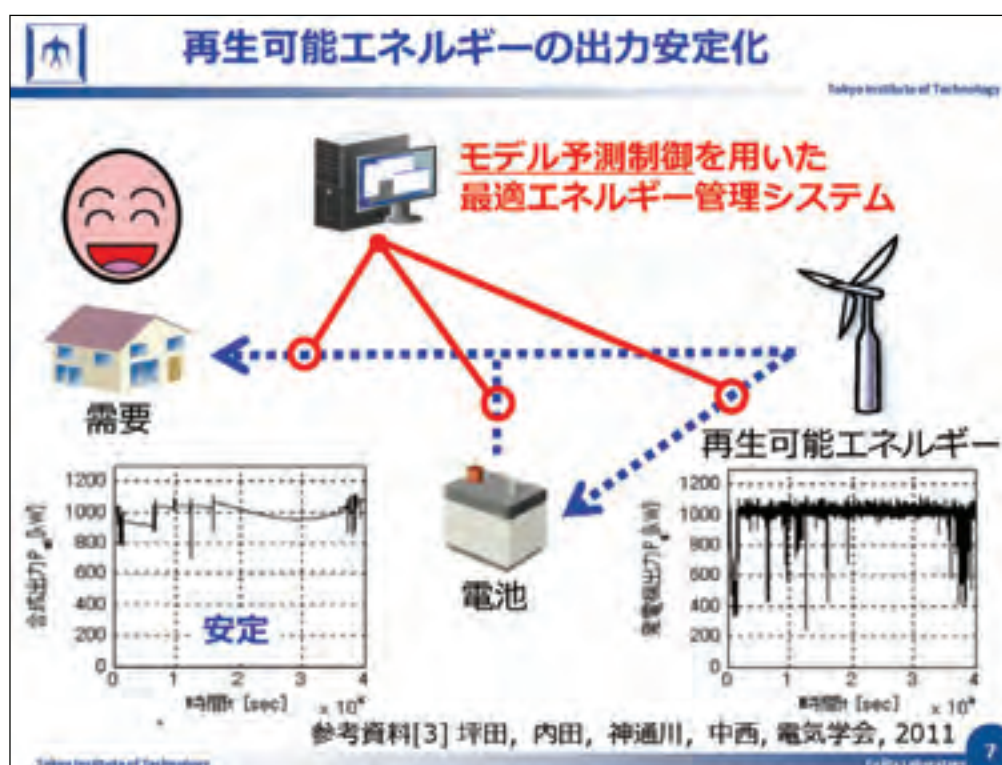
それに対して、風力や太陽光というのはまさしく風任せ、お天道様任せでありますので、これはあるデータですが、風力発電は、もちろん風が吹かなければ発電いたしませんし、太陽光も発電できるのはお日様が照っているときだけになりますので、技術的には、出力の動的な不安定性が大変重要視されているところだと思います。

この問題に対する解決策は、もちろんものづくりの観点で、より性能のよい太陽光パネルを開発するとか蓄電池を開発するということもあるとは思いますが、それだけではありません。今日のオーガナイザの木村英紀先生も書いていらっしゃるように、もの・ことの「こと」のほうですね。ことづくりのほうのシステム科学技術を統合化することによって問題解決に進んでいくほうが、適した道ではないかと考えております。



例えば、ここでは風力発電の絵をかかせていただいております。これは半日ぐらいの風力発電の実験データですが、風力発電のものを需用側とか系統側に組み入れようとしても、発電出力が激しく振動しておりまして、そのままではとても組み入れられないことは自明でございます。

この不安定な出力は、二次電池、蓄電池を入れてものづくりの技術だけではなく、やはりシステム制御をつけ加えなければ、うまくいかないのではないかと考えています。



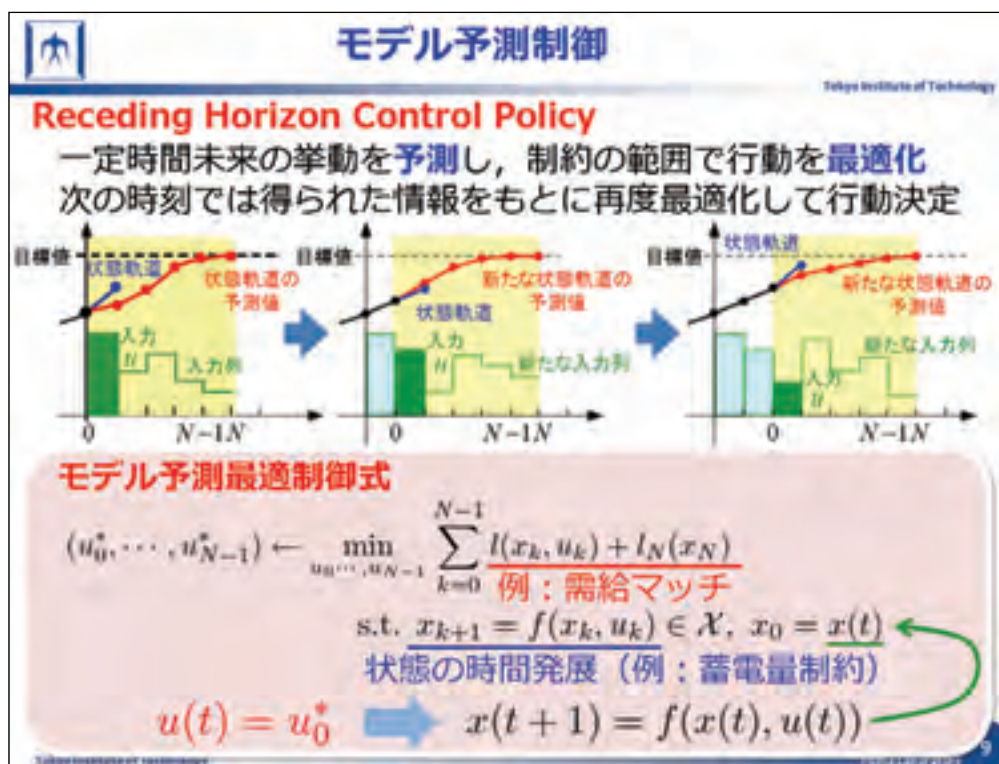
最後にご講演されます早稲田大学の内田先生が、企業との共同研究で既の実証研究をされています。非常に出力変動がある再生可能エネルギーと蓄電池の間に、モデル予測制御という強力なシステム制御の技術を用いたエネルギーのマネジメントシステムを構築するものですね。このマネジメントシステムを通すことによって、需用側へ非常に安定した電力を送ることができるようになります。

このように、ものづくりと併せて、ことづくりのシステム化をやっていくことにより、本当の意味でのスマート化ができるのではないかと思います。



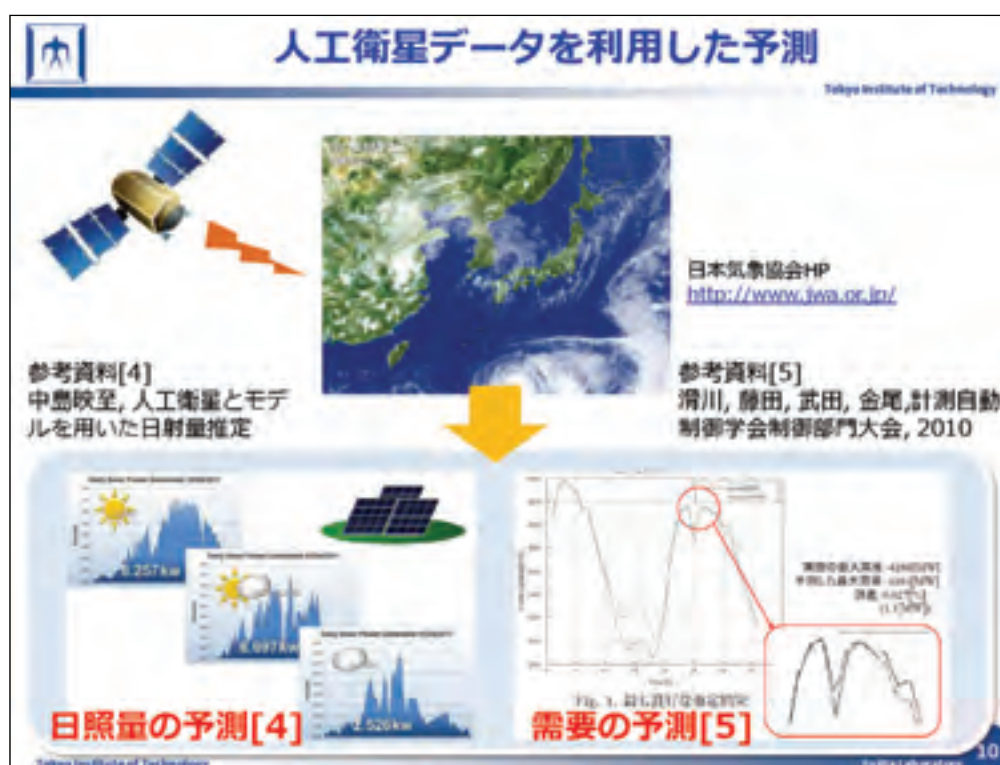
モデル予測制御、英語では **Receding Horizon Control Policy** と呼ばれますが、この手法は、一定時間未来の挙動を予測して、与えられている制約の範囲内で今からとるアクションを最適化していく。次の時刻に進んだら、また同じように得られた情報をもとに再度アクションを最適化して進めていく。言葉では、よくこのように説明されます。

これは車の運転でアナロジーを説明すると比較的理解いただきやすいと思います。ドライバーは少し先まで見とおせますので、その情報をもとに運転というアクションを行います。車が少し進みますと、道が右にカーブしているという次の段階に必要な予測情報が入りますので、その情報に基づいてまた最適なアクションを行います。このように時々刻々予測情報を得て、それに基づいて最適な意思決定をして、時刻が進んだらまた更新された予測情報が来て、それに基づいて新たに最適な意思決定をするということを、繰り返し行うやり方がモデル予測制御です。前のスライドで紹介した風力発電のシステム化技術も、このモデル予測制御を使っているわけです。



モデル予測制御を、数式を用いてもう少し説明いたします。

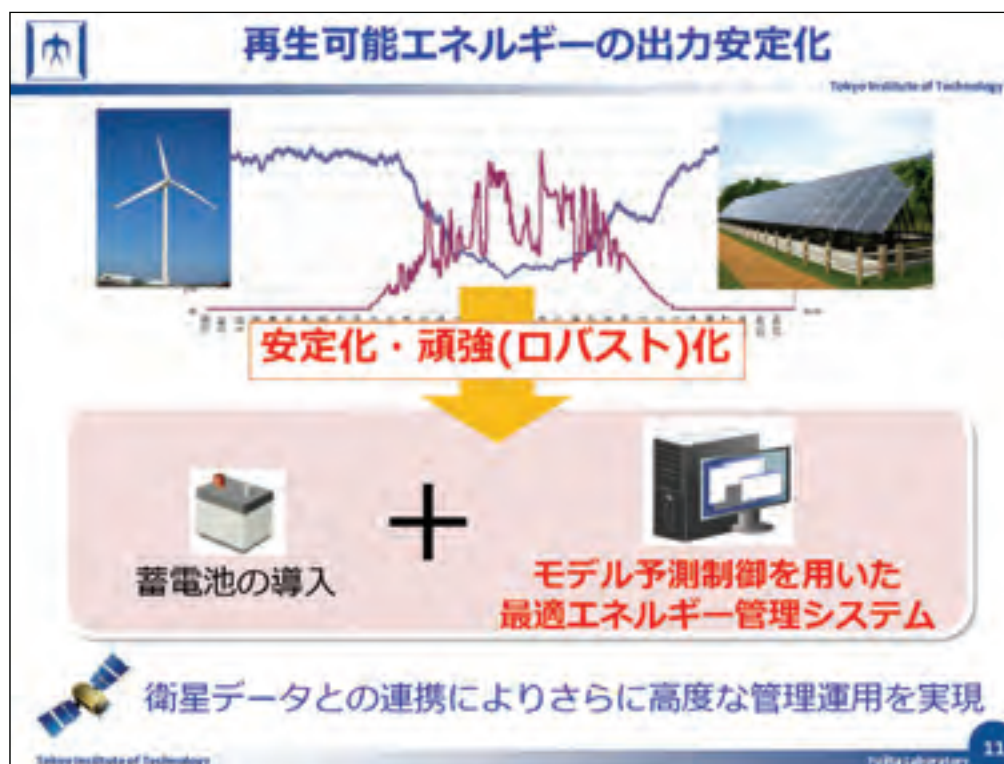
まず、動きがあるシステムのモデルは、微分方程式で書かれます。今、0の時点にいますとしますと、ここから数学的モデルに基づきまして未来の情報をできる限り正確に予測します。予測した状況で何かを最適にしたいという考え方、つまり評価関数を最適にするようなアクション、緑で示す制御入力を決め、そのアクションを実際に行います。そうすると、次の瞬間にはここが今の時刻となり、時刻が進むことになり、またここで同じこと、その時点での予測、制御入力の決定、アクションを行う。このように、時々刻々得られる予測情報を更新してよくしていきながら、先々の行動を数学的に最適化して続けていくという方法がモデル予測制御です。



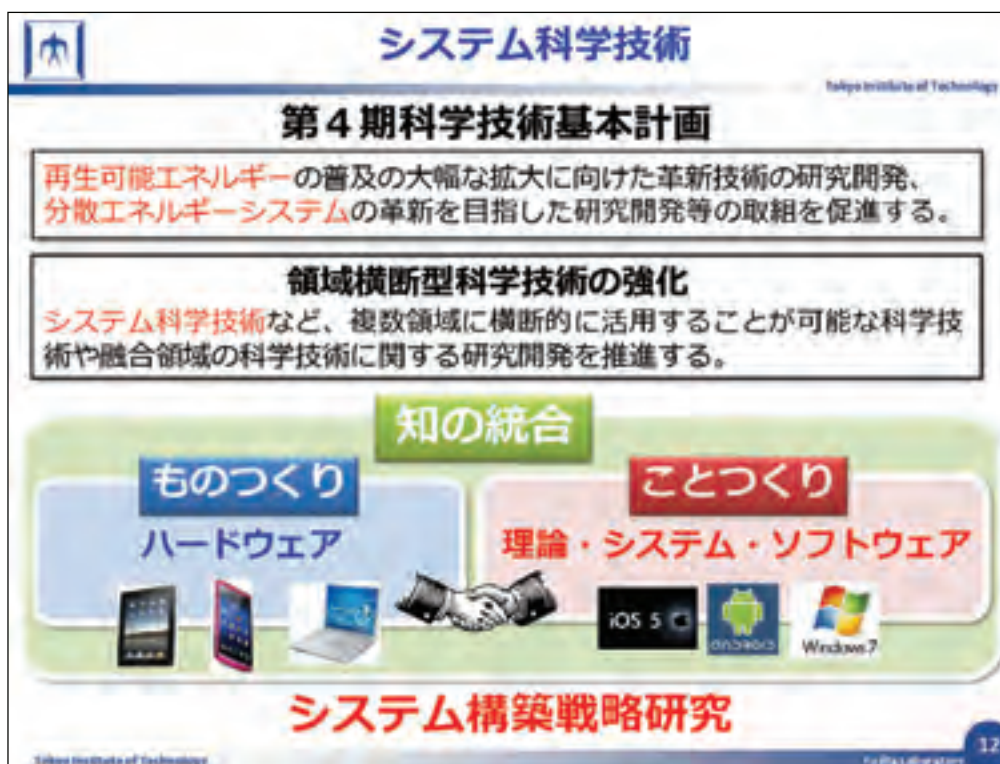
次にご講演される東京大学の中島先生は、衛星データを利用して地域ごとに日照量等を予測・推定できる技術を研究中と伺っております。そうしますと、ある場所における再生可能エネルギーがどれぐらいなのかより精度高く予測できることになり、それをモデル予測制御の枠組みの中に組み入れることは容易かと思えます。

それから、中島先生の後にご講演されます慶應大学の滑川先生は、最新の H_∞ フィルター理論、これは非常にすばらしい予測推定の理論の一角ですが、これを用いて需要予測の精度を非常に高くするというところをある電力会社さんと共同研究されています。

こういった予測情報をモデル予測制御の中に組み入れていきますと、さらに高度なエネルギーマネジメントシステムの構築ができることが期待できます。



太陽光発電などには、ものづくりの観点の進歩とともに、もともと持っている幾つかの課題があります。それは二次電池、蓄電池の導入や、モデル予測制御を用いたエネルギーのマネジメントシステムの構築によって、不安定性が懸念されている出力を安定化する、あるいはいろいろな状況変化が起きてもロバストであるというふうに対処していくことが可能ですし、衛星データとの連携により、さらに高度化できると考えております。



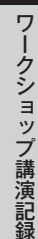
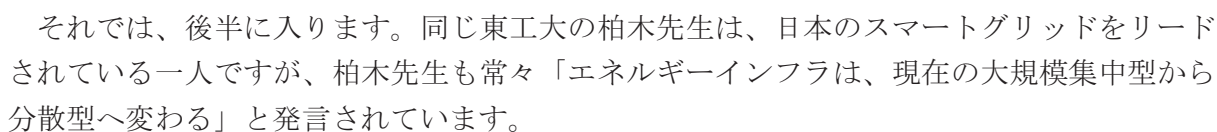
後半に入る前に、1つスライドを挿入させていただきました。

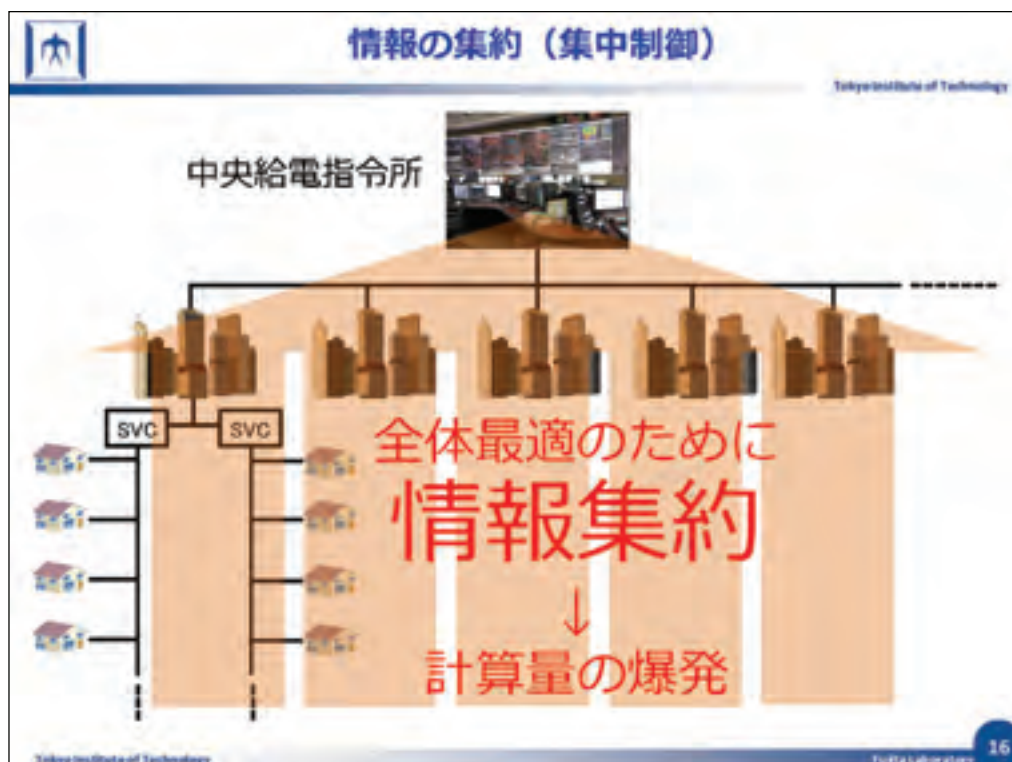
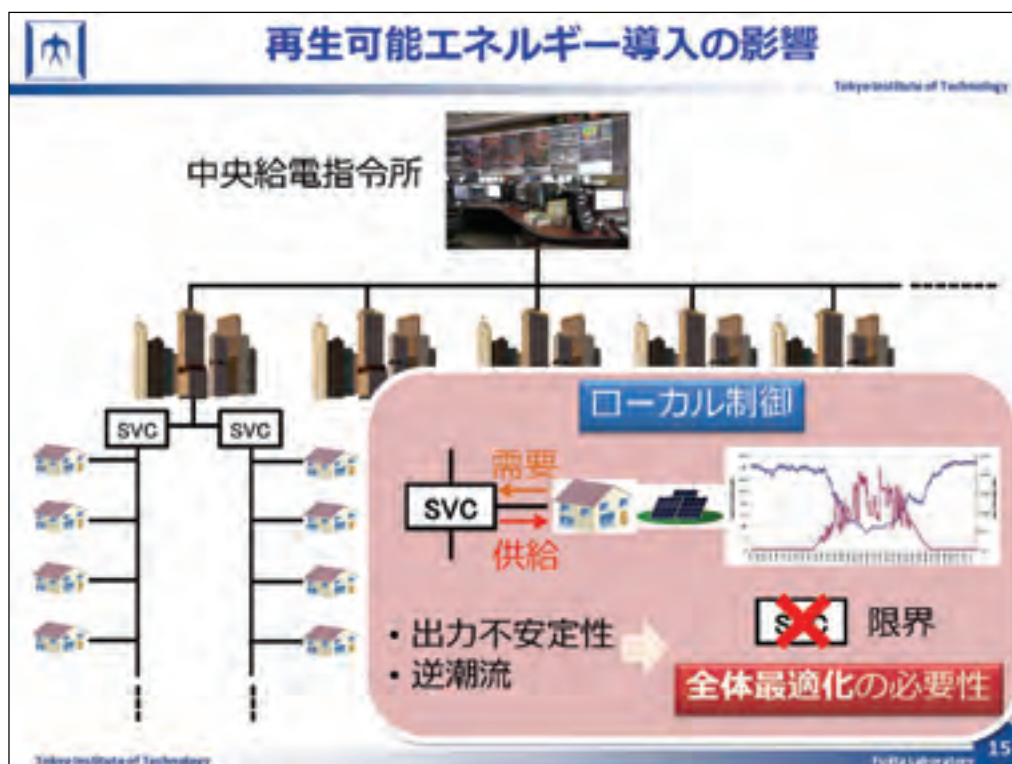
第4期科学技術基本計画の見直しの中で、再生可能エネルギーや分散エネルギーシステムといったものが大きく打ち出されたというのは冒頭にお話ししたとおりですが、もう一つ大事な点は、領域横断型の科学技術の強化もうたわれているという点です。特に新しい点は、システム科学技術などに関する研究開発を推進するということが明文化、明示化されている状況です。

ものづくりに対して、ことづくりの例え話をするのは大変難しいのですが、私なりの解釈で説明いたしますと、例えば、最近市場を賑わしていますスマートフォンですとか iPad がございます。iPad は電子部品のかなりの割合が日本製品だというデータを拝見したことがあります。ただ、あいにく利益率は余り高くないという現実もあるそうです。ところが、スマートフォンというのはハードウェアの実体よりも、むしろそれを動かしている Android—これは商標ですが—という名前のついているプラットフォーム OS の支配力のほうが強いですし、実際、付加価値や利益率も高い。こういうことが1つ、ものづくりとことづくりの比喩になるのではないかと考えております。

iPhone や iPad は、iOS というのがそれに対応するプラットフォームになりますので、私たちも、エネルギーをマネジメントするためのそういうプラットフォームをつくっていかねばならないのではないかと考えています。

また別の解釈ですが、文化庁が指定している文化財には絵画や彫刻のような有形のものはもちろんありますが、そうではなくて、形がない文化財というものも全く同等・同質であるはずだと思っていて、我が国の科学技術の場でも、有形の科学技術とこういうタイプにアナロジーがとれるような理論・システム・ソフトウェアも我が国で研究を推進していくといいのではないかと考えています。

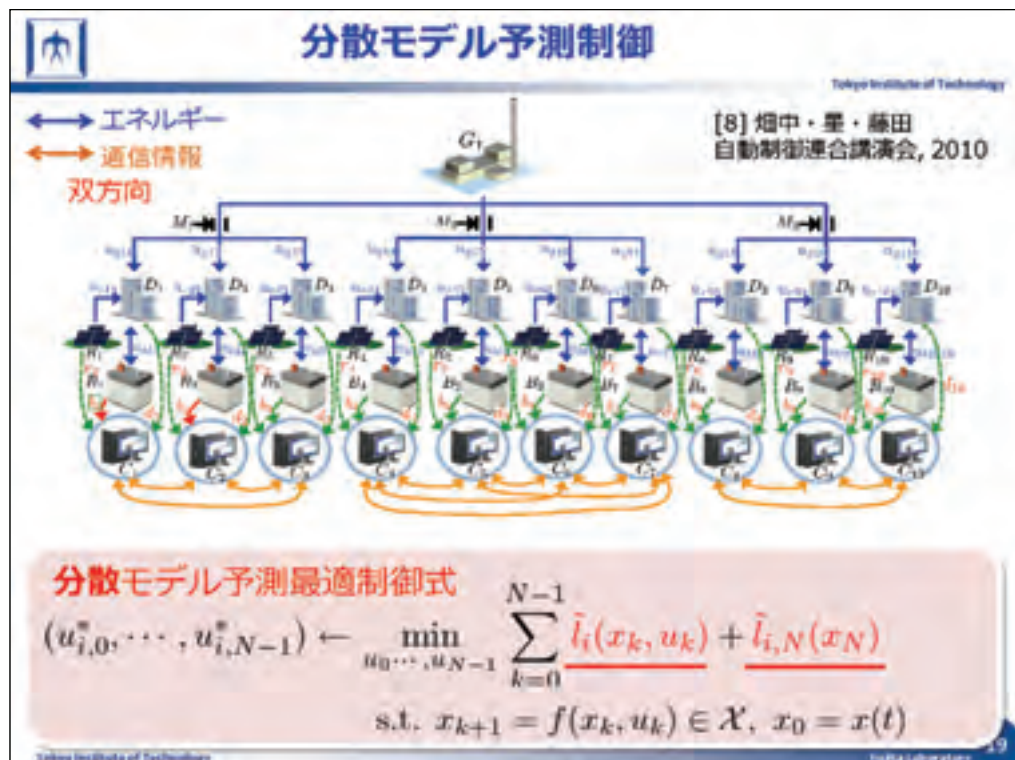
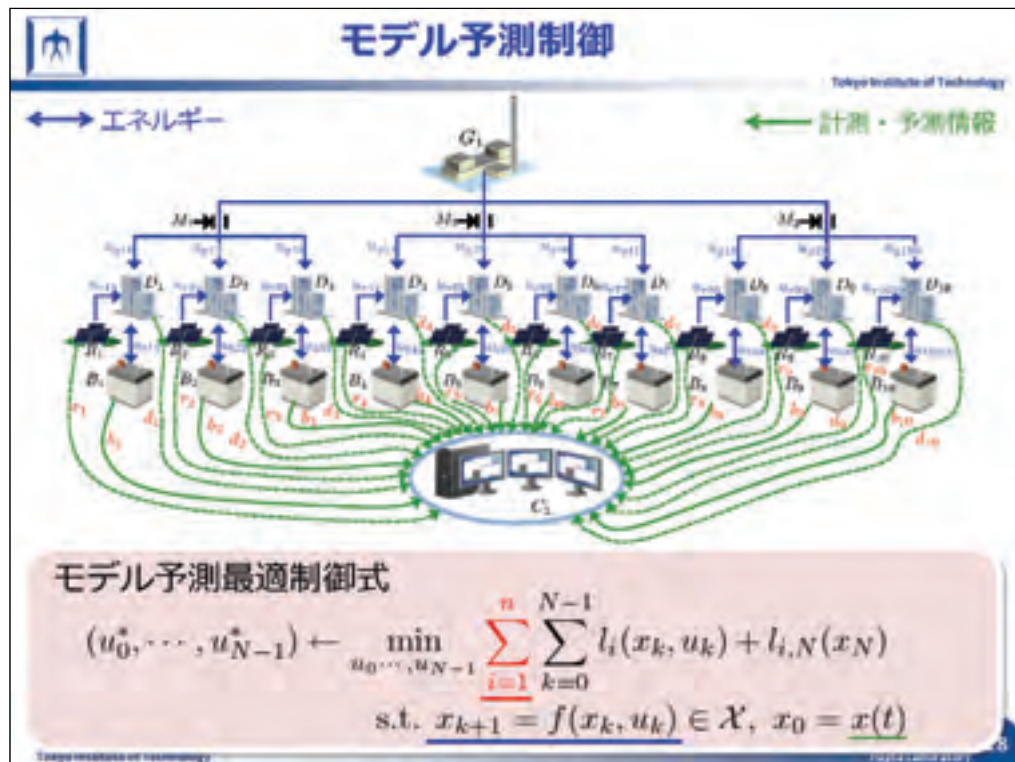






スライド 14～17 は、先ほど飯野さんがお話しされたとおりなのでスキップいたします。

現在のエネルギーシステムは、ピラミッド型、ツリー型で、こういう中へ再生可能エネルギーを入れても、逆潮流等々の問題で実はいまうまくいかなることが想定されている。ツリー型のまま上へ情報を集約しようとするとう処理の爆発が起きてしまうので、もともと再生可能エネルギーの導入はしたくないというのがある時期までの電力ネットワークトポロジーなのだと思います。ですから、集中から分散への必要性は、私も大いに賛同しているわけです。



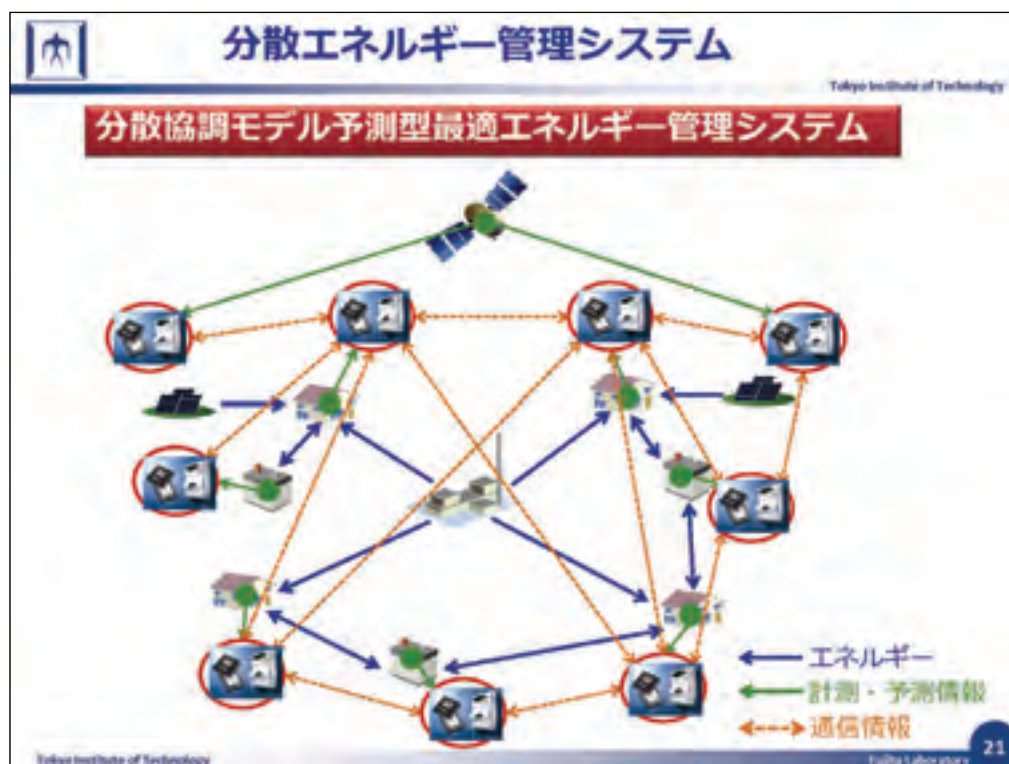
前半でお話したモデル予測制御についても同じで、すべての情報を1つのエネルギーマネジメントセンターに集中させようとしても、情報の爆発が起きると思います。ですので、これを分散型にする必要があります。エネルギーも情報もネットワーク型に双方向でつながるようにして、このモデル予測制御を進めていく必要があります。



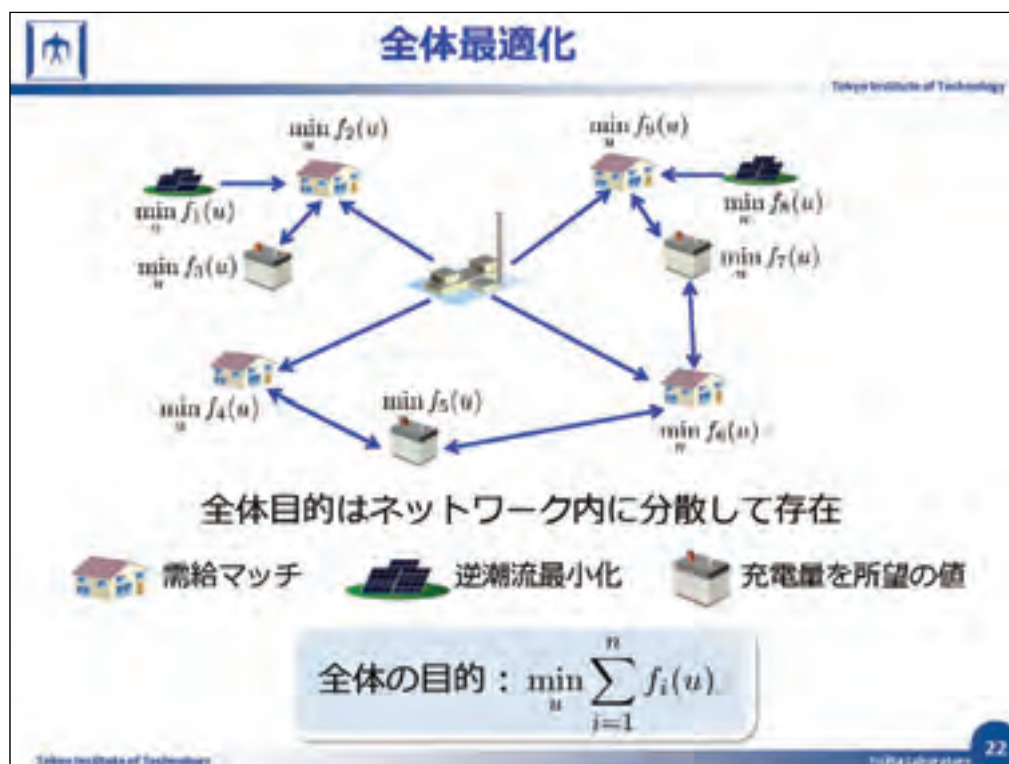
その具体的なイメージですが、例えば、ここに需要家があるとして、それに対してリニューアブルエネルギーがついていて、バッテリーがあるとします。また、人工衛星からはさらに高度化するための情報が来るとします。これに対していろいろな所にエネルギーマネジメントしてくれるシステムを、先ほどの Android プラットフォームのようなイメージで行ってくれるエージェント、スマートメータが存在するといったします。

スマートメータといっても、ただの検針器のようなものではなく、中に高性能のプロセッサが入って高度なシステム制御ができるものというイメージでお考えください。

このように状況で全体が双方向に通信し合うという構造を、ここで考えている分散協調型のシステムとしてお話ししたいと思います。



私がこの分散協調型のポイントだと思っていますのは、例えば、ここのスマートシステムは幾つかとつながっていますが、決してすべてとつながっているわけではありません。ですから、情報は局所的にしか持っていません。ただ、すべては何らかの形で、ある構造でつながっています。そして局所、局所で今からご紹介するある考え方をして、ある処理をするんですが、実はその処理をすると全体が最適化される、そういうアルゴリズムがシステムの考え方の中ででき上がりつつあるということをお話ししたいと思います。



この方法が素晴らしいと私が思いますのは、こういう分散協調型、ただバラバラにあるというのではなくて、協調し合って分散にあるということです。先ほどの飯野様のお話のように、プラグインといってここに何か1つ足すとか、あるいは何か1つ外すとか、いろいろなことが起きた場合でも非常に柔軟に受け入れられます。いわゆるフォールトトレランスという観点でも大変強力な基本アーキテクチャだと思うわけです。

分散協調モデル予測最適制御式

$$u_{i,k+1} = \nabla f_i + \frac{1}{n_i} \sum_{j \in N_i} u_{j,k}$$

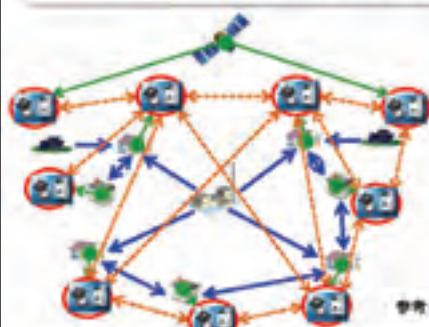
□-カル最適化

通信相手との協調

ローカルな利益追求を協調により抑制

→ (ローカルにもかかわらず)全体最適化

$$u(t) = u_0^* \Rightarrow x(t+1) = f(x(t), u(t))$$



サンプリング周期：6[min] (=0.1[h])

予測区間：2[h] (=20[step])

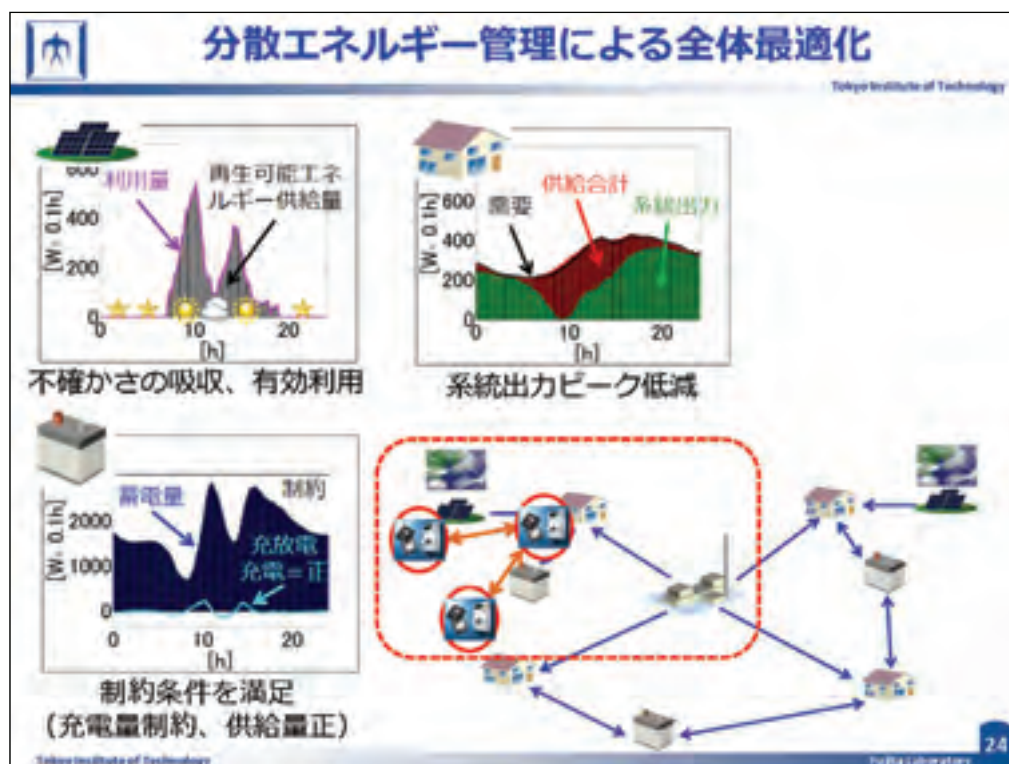
 最大充電量：3.5[kWh]

 需要：0 - 6 [kWh]

 発電量 : 0 - 5[kWh]

参考：大塚ガスIP http://www.osakagass.co.jp/normal/area/pc_2001/3121296_4332.html
パナソニックIP <http://www.panasonic.jp/idea/pages/ty.html>

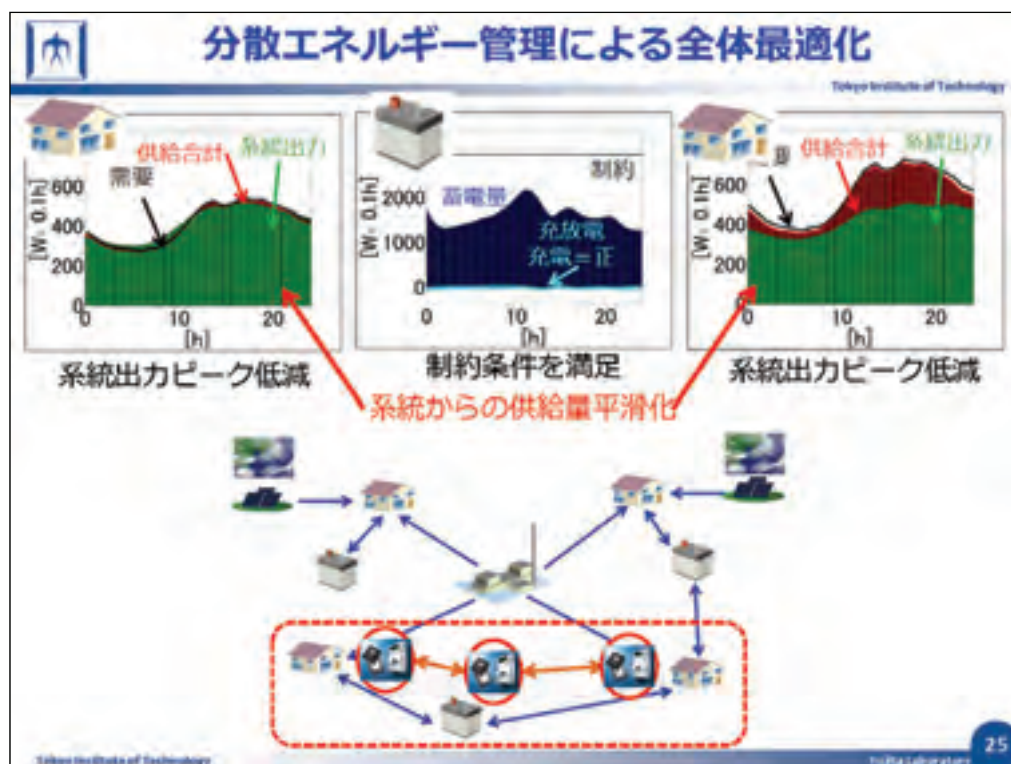
この最適化の手法をモデル予測制御の中に組み入れますと、先ほどの分散協調のアーキテクチャでモデル予測制御を行って、全体の最適化が達成できるということが示せるわけでございます。



それをあるシナリオでやってみたのが、こちらの図です。

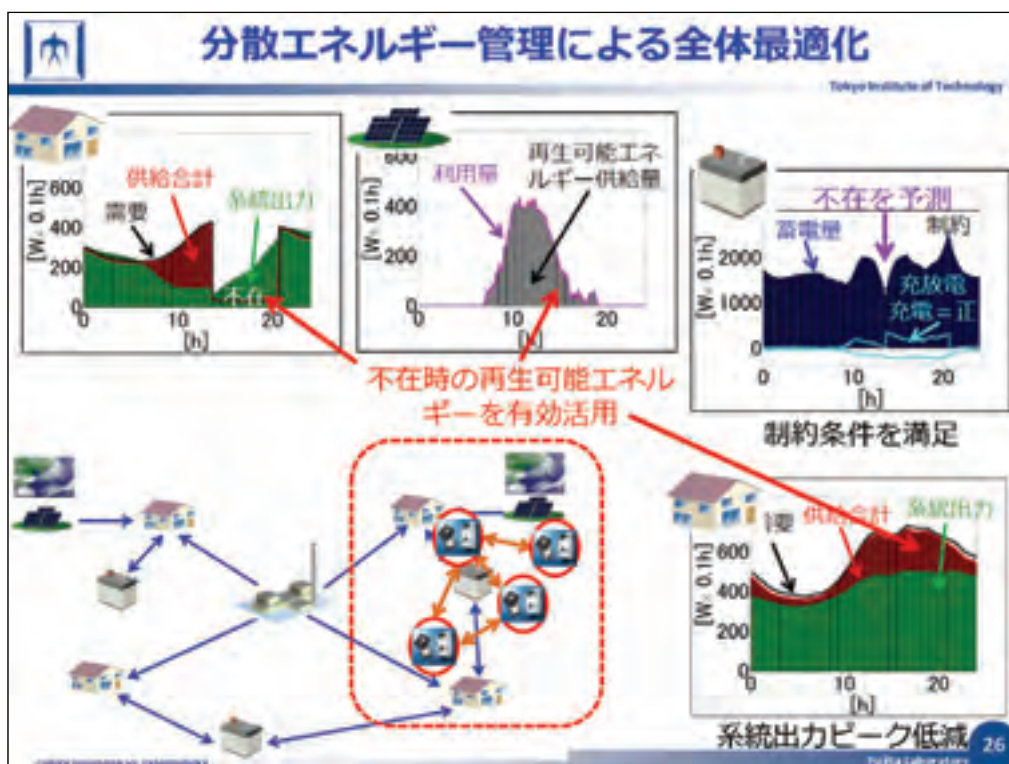
まず、左上の図をごらんください。

この家のグラフがこちら、リニューアブルエナジーのところがこちら、バッテリーのところがこちらです。需要家のところの黒い線が需要のラインで、赤い線が供給の合計で、需要と供給がマッチしていることがわかりいただけると思います。この需要と供給のマッチは、実はこの緑の部分はメガインフラの系統から補われていて、残りの部分は太陽光とバッテリーのペアからもらってきています。太陽光は決して安定はしておらず、晴れているときはたくさん発電しますが曇りになると発電は減って、また晴れてくると増えますが、情報は今、予測されながら動いていますので、バッテリーから適宜最適に補われるように振る舞っているわけです。これは計算機実験の結果です。



今度は上の図をごらんください。

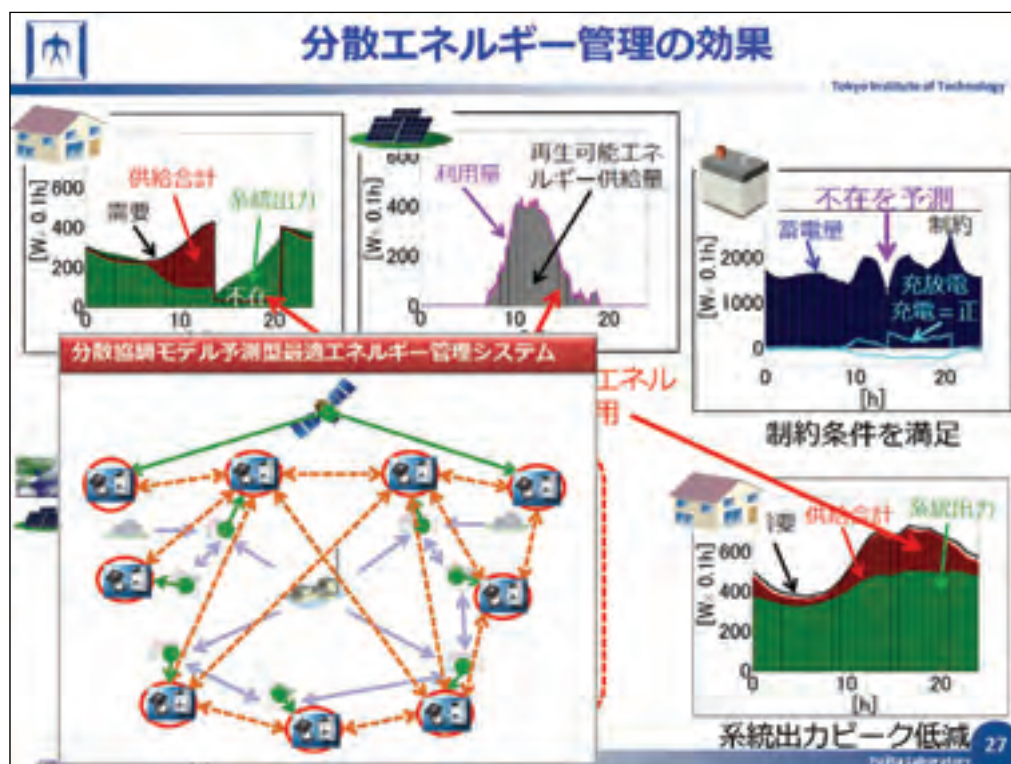
左に需要家、右に需要家があつて、真ん中にバッテリーがありますが、実は左の需要家より右の需要家のほうが今、はるかに需要が高いんですね。ところが、この高い分に対して系統からは同じだけ平滑化してもらって、より補わなければいけない部分をインテリジェントな、スマートなバッテリーが保証するという形のものが、先ほどの更新式から自動的に出てまいります。



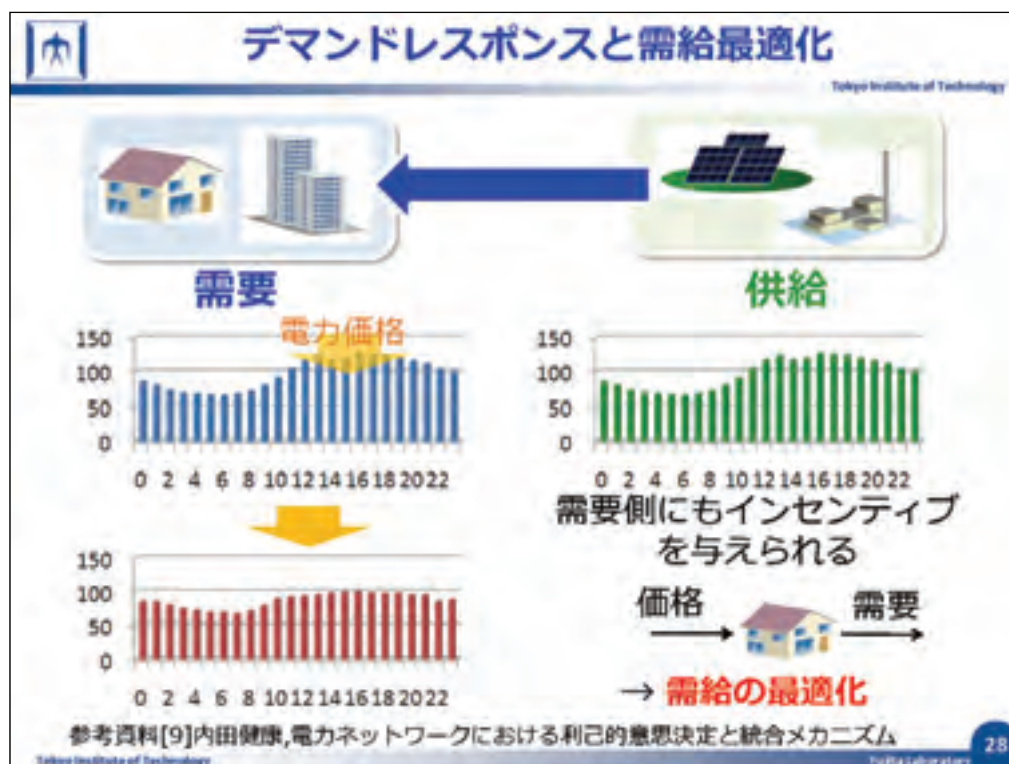
さらに、この上の図をごらんください。

ここの需要家は先ほどと同じ、被っていますが、実はこの需要家はこのバッテリーとつながっているだけではなくて、このバッテリー、そして、その先にはこのリニューアブルエナジーがあります。ですので、ここで補わなければいけない量はここだけから補給されているのではなくて、こちらからも非常にスマートに供給されています。

また、おもしろいことに、こちらの需要家は午後から外出する、午後の時間帯は家にいないので電力は使わないという情報が既にわかっています。ここに系統の緑があるのはシミュレーションのミスですので、無視してください。そうすると、このネットワークとしては、ここにはもう午後はあげなくてよいことがわかっていますので、より需要が欲しいほうへ最適資源配置をすることができているという基本方程式が、何枚か前にお示したものです。



こういうことができるのが分散協調モデル予測型の最適なエネルギーマネジメントシステムの基本構造で、これがシステム屋の理論的な、基盤技術的な結果としてできつつあると言えます。



ここまでの話では、需要はある程度決まって与えられるものとして扱っていましたが、需要にもインセンティブを与えて動かすことができます。需給の最適化も後ほどの内田先生らのご講演の中で触れていただけますが、さらにトータルとしての分散協調の最適化ができるものと考えております。



まとめ

環境エネルギーを対象としたグリーンイノベーションの推進

再生可能エネルギーの普及の大幅な拡大に向けた革新技術の研究開発、分散エネルギーシステムの革新を目指した研究開発等の取組を促進する。

モデル予測制御によって
再生可能エネルギーの出力安定化が可能

分散モデル予測制御によって
分散エネルギーシステムの全体最適化が可能

分散協調モデル予測型
最適エネルギー管理システム

➡



次世代先進グリッド実験模擬装置ANSWER

<http://www.eb.waseda.ac.jp/havashi/>

Tokyo Institute of Technology
Toshiba Laboratory 29

このように、再生可能エネルギーや分散エネルギーシステムの革新や普及に関しては、モデル予測制御による出力の安定化、分散協調型による全体の最適化が十分可能なレベルにあると私は思っております。

私どもはアカデミアにおりますので、こういうものはまだ論文形式のものでございますけれども、もちろん、これはエネルギーマネジメントシステムという形で先ほどの Android OS や iOS のような形で具現化して、後ほどお話いただきます早稲田大学の林先生が先進型のグリッドをお持ちですので、この装置の中にどんどん検証して、インプリメントをして、改善をして、よいものをつくっていくという具体的な方向ができ得ると考えております。



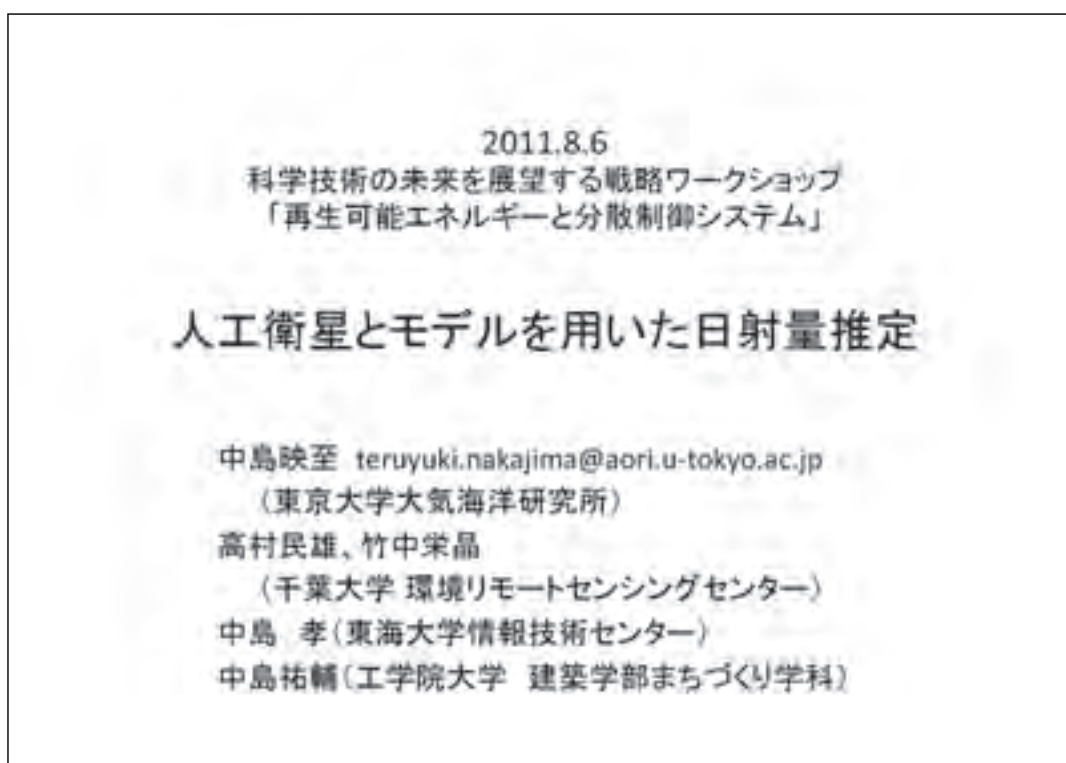
「スマートグリッド」という言葉は、ごく普通の啓蒙書等では「情報通信技術による制御による最適化」というふうな説明でよく書かれています。ところが、不思議なことに、スマートグリッドに関連するプロジェクトの中に、制御の専門家が入っているものがほとんどない。今日ここにお集まりいただいた先生方はまさしく日本の制御の専門家の方々ですが、どなたも入っていらっしゃいませんね。「スマートグリッドは ICT による電力網の制御だ」と言いながら、制御の専門家が入っていないというのが現在の我が国のプロジェクトの実態ではないかと思います。

このプロジェクトでは、ぜひ専門家による制御の本格的なプロジェクトを行うべきではないかと考えております。それによって日本製のスマートグリッドの基本設計図をつくっていくことが我々に課されているミッションではないかと認識しております。

<質疑応答>

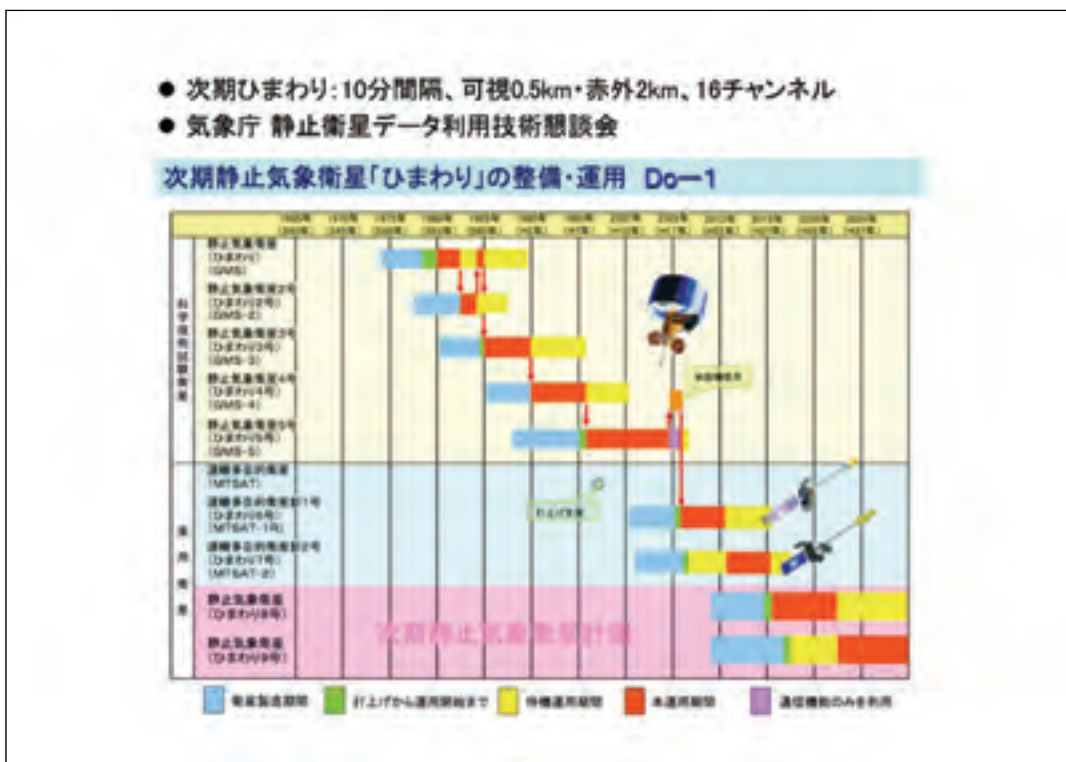
なし

6. 3 中島映至先生 ご講演記録



私は全く電力とは関係なく、普通の気象屋であり地球惑星科学の研究者ですが、本日は、こういった日射の問題とか再生可能エネルギーの問題にはどうしても欠くことのできない地球システムの話をしていただきます。

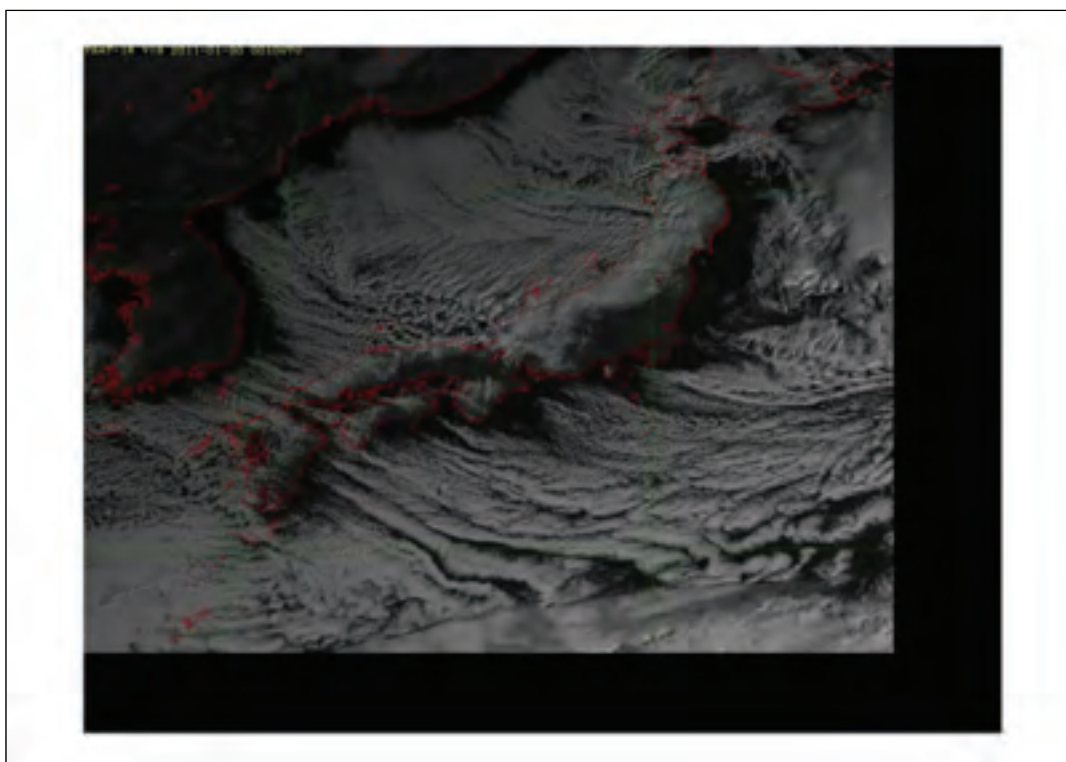
著者に3人も同姓がありますが、たまたま研究の同志を集めたらこうなってしまっただけでして、全く血縁関係はありません。



地球を観測する目を供給するものとして、静止衛星ひまわりがあります。これは 1975 年から開始して、今もずっと続いています。2014 年と 2016 年に 8 号、9 号と打ち上げられる予定です。

現在、気象庁の中に静止衛星データ利用技術懇談会というものがあまして、私がチェアをやっていますが、この中で静止衛星をどう利用するかという検討をしております。ここでのコミュニティのインプットというのは、多分これから非常に重要になってくると思います。

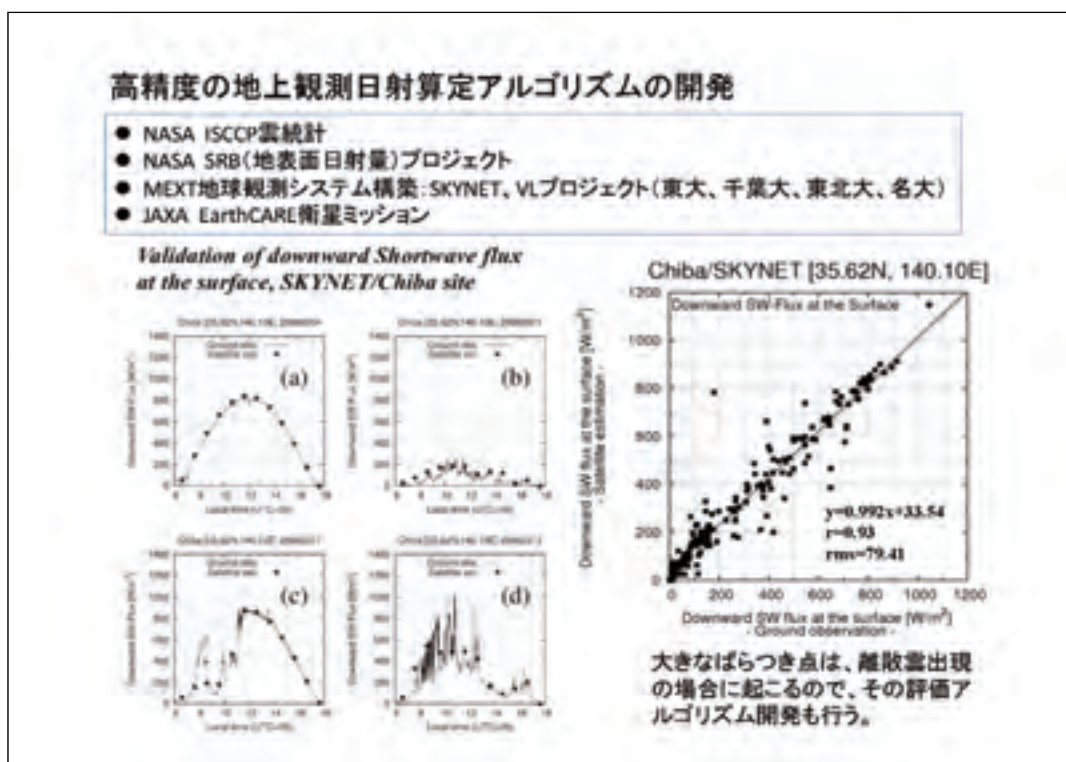
この新しいシステムでは、10 分間隔でデータがおとりてきて皆さんに使っていただける。それから、今まで 4 キロだったものが 0.5 キロまで上がってくる。可視は 1 キロですが赤外は 2 キロ、大体半分ずつになって、チャンネル数も 16 チャンネルあるということで、雲の情報だとか大気汚染の情報が出てきますので、それを日射量に変換するためには非常によい情報になっているということでもあります。



これは、今のひまわりから 10 分間隔で出てくる非常に高分解なものです。雲の流れが綺麗にわかります。次世代では、このようなデータを常時利用できるようになってくるわけです。

一つ一つの雲の下の発電量は、当然雲に影響されるわけですが、雲を風ベクトルで追いかければ、ある程度のナウキャストイングができる。衛星の分解能が上がって時間間隔も上がってくれば、非常によい使える情報になってきますから、これを利用しない手はない。

ところが、雲自体が、太陽からエネルギーを受けた海から発生した水蒸気でできているわけで、ものすごいエネルギーを使っているわけですね。こういったものを人間が利用しようとする場合には、地球環境のパラメータを電力量に変換する必要がありますから、地球科学的なツールがどうしても必要になります。



地上の日射量はどれぐらい変動するかですが、(d)が、雲があつたり雲がなかったりした場合で、大体 300 ワットから多いときは 1,000 ワットぐらいまでふらつきます。完全に曇天になると、200 ワット以下で(b)のようになります。完全晴天になると(a)のように、きれいなカーブになる。

興味深いのは、このカーブよりこっちのほうがエネルギーが多い場合があることです。雲の側面を使って太陽光が反射すると、そこでの発電量がある。ですから、このシステムは非常に複雑で、地球物理学的なアプローチ、いわゆる高精度の地上日射観測、3 点アルゴリズムがどうしても必要になる。

NASA 等では、雲統計を出すプロジェクトや地表面の日射量を出すプロジェクトがあります。日本では、地球観測システムの構築ということで、文部科学省で SKYNET やバーチャルラボラトリープロジェクトで 4 つの大学の地球物理関係が集まって研究しております。JAXA もこれから日射量を推定するための地球観測衛星を上げる予定になっています。このスライドはその研究の一例です。

右下のグラフは、横軸に地上観測の日射量データ、縦軸が人工衛星から得られる情報から推定したものです。大体 1,000 ワットからゼロになるわけですがけれども、この大きなばらつき点は、先ほど言いましたように、雲の側面で反射したりする場合に起こるもので、200 ワットぐらいは違ってしまいます。こういった情報をナウキャストできるようになれば、エネルギー利用という観点からすれば大きな進歩になるわけです。

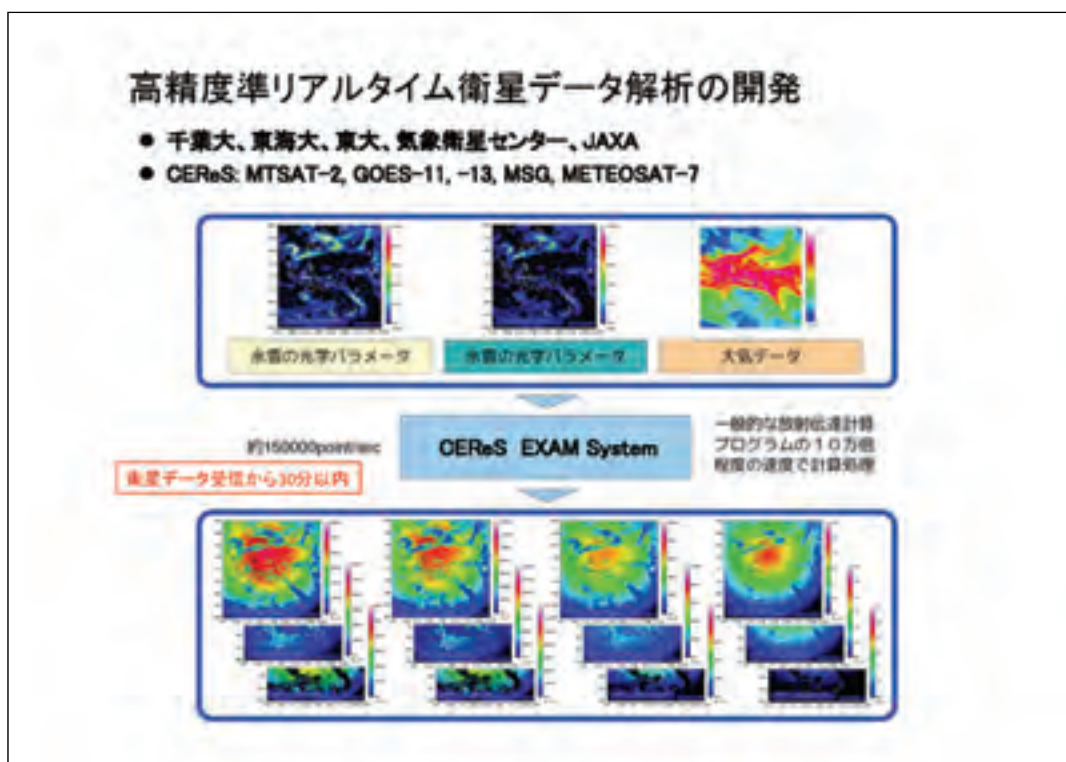


やはり餅は餅屋で、我々のような地球科学者が支援するシステムが、工学部の先生方と一緒にやっていく必要があるのではないかと。この例は今、東大で開発している、日本の次世代の、高分解能の大気モデルと化学モデルをつなげた NICAM-Chem というものですが、こういったものを導入するとかですね。この地球科学型支援システムには、当然気象衛星のデータも入りますし、気象庁の気象予測知も入ってきます。

気象庁のデータというのは、晴れている、曇っている、最高・最低気温、これを数日先まで予測しており、今の精度では 8 割ぐらいは当たります。ですが、天気ではなく、日射量や風、これからは多分地表面の温度も大事になってきますし、こういったものを推定するには、我々が提案するような新しいシステムが必要です。

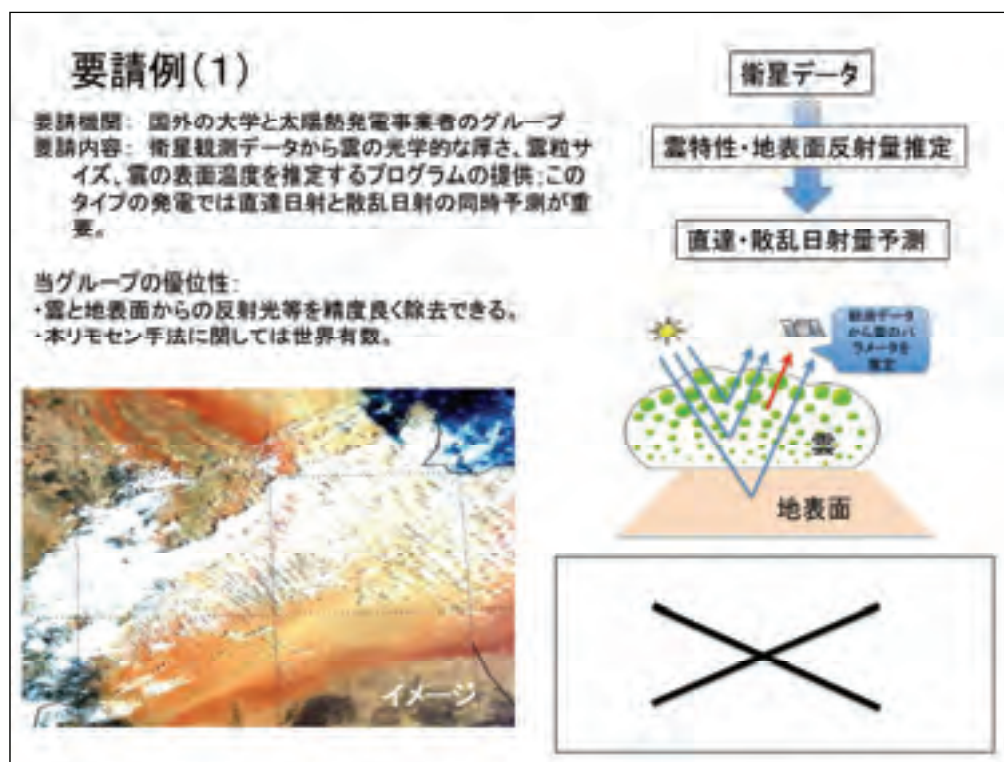
予測とあわせて、エネルギー利用のコントロールをするわけですが、そこからのモニタリングシステムも大切なのでこの辺は工学部の先生方と一緒に考えたい。例えば、スマートグリッドのデータを集めてくれば、どの地域で雲量が減っているか、それが時間的にこちらへ伝達してくるのがわかるわけですね。スマートグリッドシステムをモニタリングシステムとしても使うことができるわけです。

もう一つは、分解能が 1 キロなのか 10 キロなのか 100 キロなのか、それを教えていただかなければいけない。気象庁の仕事は日本全体への気象予報値の提供ですが、多分、ビジネスとして興せるのは、こういった領域ごとの予報でしょう。おそらくいろいろな気象会社とか、新しく興るような産業でやれることですので、気象庁との連携で言っても新しいことができるということです。



餅は餅屋と言いましたが、我々、例えばこういった日射量の推定はもう 15~16 年やっていて、それなりのスキルを持っています。今、一つの例として日射の話を取り上げると、例えば雲がどれだけ厚いかとか、これは散乱断面積といいます、そういうものを出さなくてはいけないとか、上に氷の雲があったらそれがどれぐらいの厚さであるか、他にも風の情報とかいろいろな情報があって、こいつを推定した上でさらに日射量を計算します。

これを今の計算機でやれば、普通だったらほとんど「明日になったら結果が出る」ということになってしまいますが、今、千葉大で開発しているシステムは、こいつを 10 万倍ぐらいに早める。ニューラルを使ったような新しい方法を使ってやるとか。だから、この辺のテクノロジーには、やはり地球物理学的な専門知識も非常に重要だということでもあります。



* 報告書に収録に当たり、一部画像を削除

こういうことに目をつけまして、世界的にも、ビジネスから大学へのコンタクトがあります。

この要請例は、東海大の中島 孝先生のほうにコンタクトがあったものです。アメリカか中東の砂漠に設置されたミラーで、太陽光を集めて熱発電をするというシステムです。これは既にビジネス化しています。

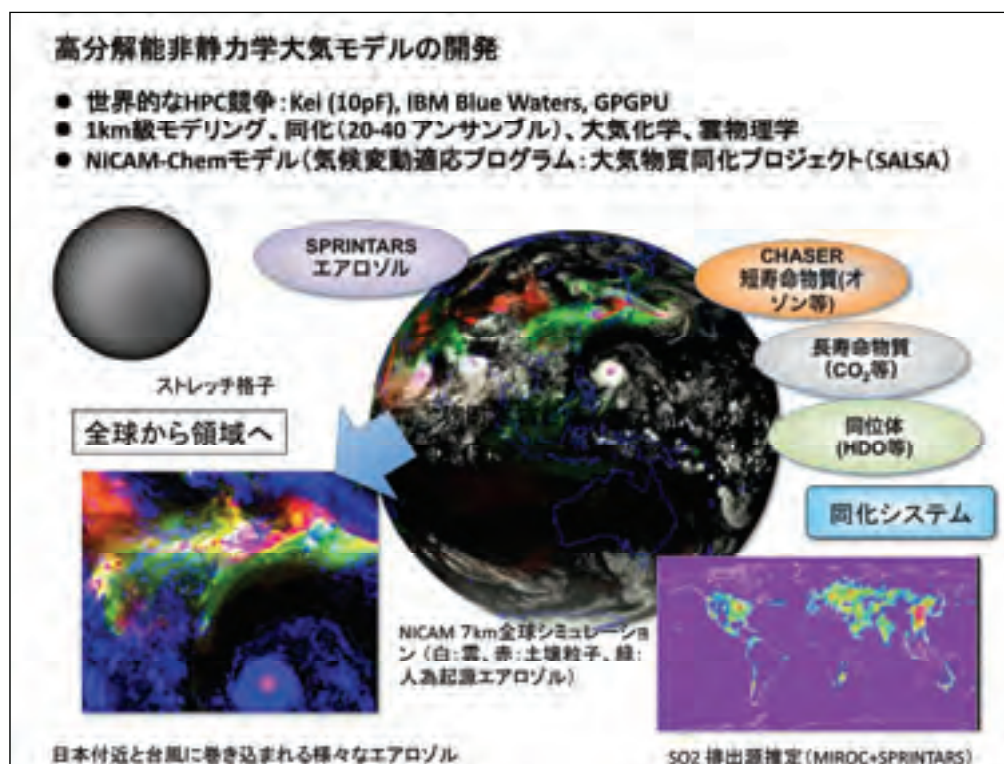
この図は衛星写真でこれが雲です。雲がさしかかると、下の日射量が減りしかも散乱光が増えますので、全く違うジオメトリーで集光しなくてはなりません。雲の情報を詳細に把握するのは人工衛星を利用し、雲粒のサイズや表面温度などはリモートセンシングで予測して、地表面の情報に変換する。こういったことは NASA でももう 20 年ぐらいやっていますので、たまっている知識はぜひとも使っていただくのがいいかと思います。



もう一つの要請例はインドの気象局との共同研究です。空の明るさを完全に自動観測して、そこから雲量や大気汚染物質の量を推定します。インド気象局が観測機を買って観測ネットワークをつくったわけですが、データ解析は日本初のシステムで、今、共同研究を行っています。

というのも、単純に観測すればいいだけではなく、地上の観測ネットワークから雲とエアロゾルの特性をリモートセンシングして、そこからもう一回放射伝達方程式を解いて日射量に変換しなくてはなりません。さらに、写真は筑波の気象研究所にある観測機の写真ですが、どの装置が何ワットの日射エネルギーに対応するか、こうしてきちんと検定しなければいけない。こういったすべてのノウハウがシステムとして動いている。

日本はアメリカ、ヨーロッパと肩を並べています。そういった高いレベルにありますので、これを利用することによって、インフラの国際発信もできると考えています。



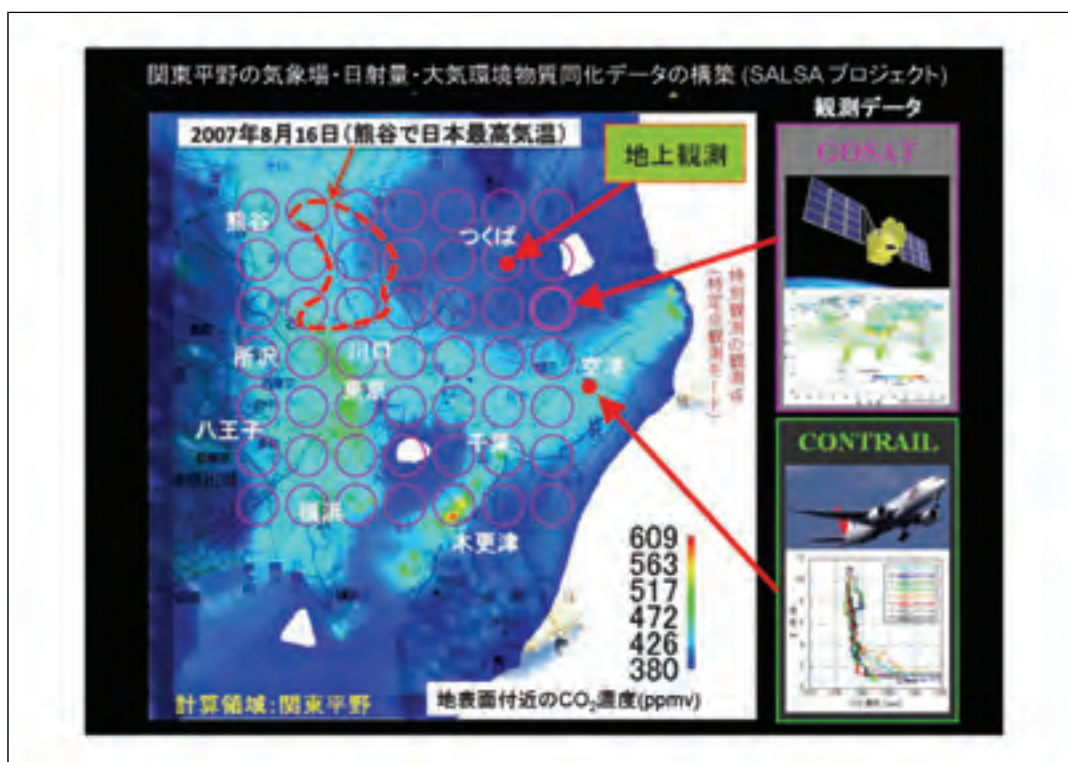
もう一つ重要なのは、今、ハイパフォーマンスコンピューティングの使い方が世界的な競争になっていることです。

例えば、地球シミュレータや神戸の 10 ペタフロップスの京コンピュータを使えば、これは我々のチャンピオンデータですが、3.5km メッシュで全地球を覆い、台風の発生等も予測できます。こちらは先ほども触れました東大と JAMSTEC が開発している NICAM-Chem モデルですが、赤道のぼこぼこした雲の一個一個もシミュレーションできます。この赤い色は土壌粒子、中国の内部から発生する黄砂が日本まで飛んでくる様子が見えています。3.5km メッシュですから、日本付近で拡大して、台風が起こって、その下の海塩粒子を巻き上げたりしているのもシミュレーションできるわけです。

幾ら発電するかは直達日射量と散乱日射量の比率で決まるわけですが、それをどういうふうにうまくジオメトリで組み込むかは、こういったモデリングの観点からもどんどん進歩しています。

これを衛星と組み合わせることが重要で、新しいハイパフォーマンスコンピュータの使い方になる。これは世界的に競争になっていますが、IBM の Blue Water よりも京のほうが早くできた分、今は我々のほうが若干先をいっているような感じがします。

今、この力学モデルに大気汚染のガスモデルや粒子モデル、それから長寿命の二酸化炭素等を組み込んでいます。そうすることによって、エネルギーの利用という観点と地球環境を理解するという観点とをドッキングできるのではないかと最近思っているところでして、エネルギーの分野の方でもこういった知識が必要でしたら、それをつなげるモデルになりえるのかなと思います。



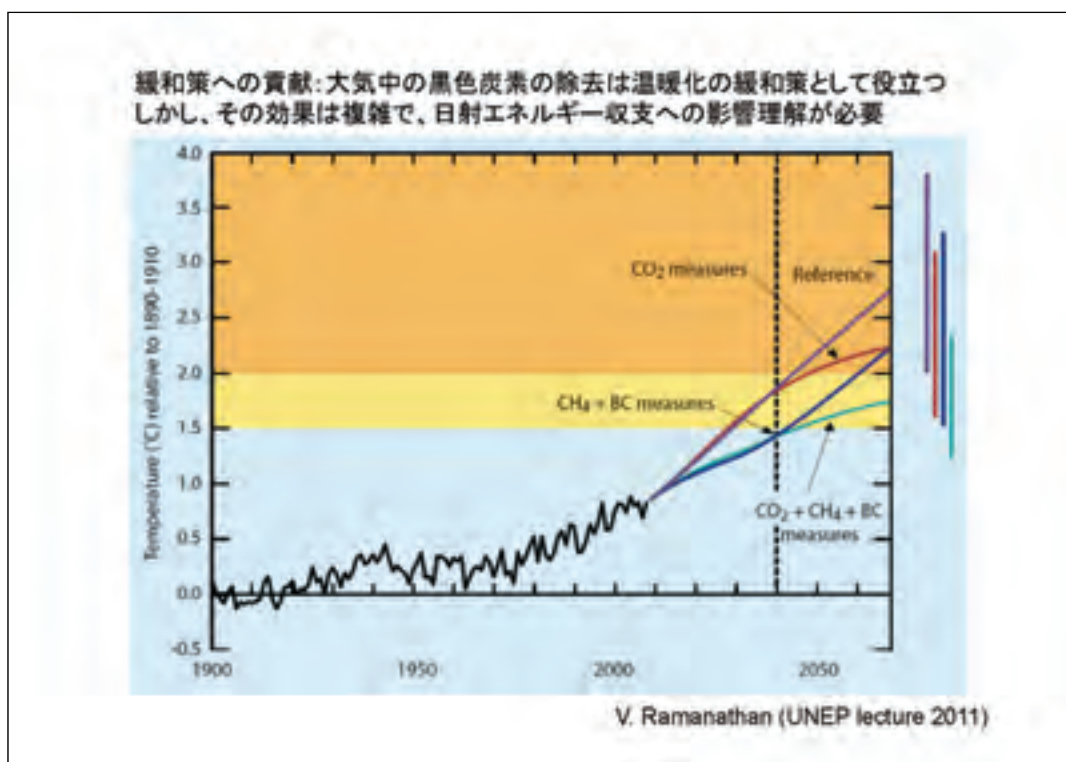
その一つの例が、これです。

これは地表面の CO_2 の濃度をコンピュータシミュレーションした結果です。これが関東平野で、産総研の1キロメートルのモデルで計算した結果です。ここに火力発電所があるのですが、関東平野のスケールでも、明らかに二酸化炭素の多い所が見えるんですね。道路からたくさん CO_2 が排出していることもわかる。

紫の丸印は、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT) が観測しているフットプリント、これぐらいのサイズで CO_2 観測ができるというマップですが、地上観測と衛星観測の両方を使って、 CO_2 あるいは大気汚染物質が排出されている所を把握できます。

重要なのは、同化データです。同化というのは、こういうプログラムを衛星と一致するように何度も走らせて、風の方角だとか、ここからどれだけの強さで出ているか、放射性物質がどう出ているか、そうやって現場の観測と合わせる。これをやるために40回ぐらい同じプログラムを走らせますから、やはり大きなコンピュータが必要です。ですから、次世代になったときには、計算インフラが整備できている日本に強みがあると思います。

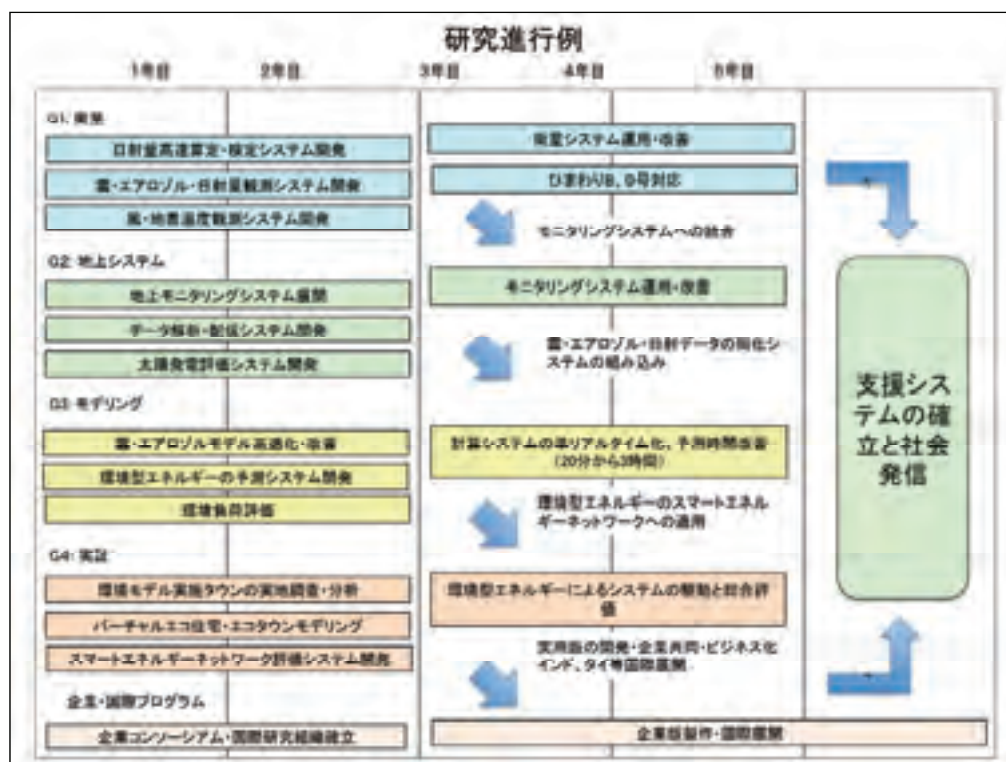
そういうことで、これがもし電力消費で、例えば「再生可能エネルギーでこれだけ発電したら、こういった部分が消えていくよ」ということが見えれば、それは市民に対する新しいインフォメーションの提供になり、インセンティブにつながるということで、先ほど言いました環境とエネルギーをつなぐという意味で、こういった新しいツールが利用できないかということでもあります。



これをグローバルに見れば、そういった二酸化炭素の放出等が地球を温めています。

これは横軸が年数で、何度上がったかというグラフですが、今、問題になっているのは、どんなに頑張っても二酸化炭素の削減は非常に難しくて、この線に沿って行ってしまうよという感じですよね。

ですが、ここを少し下げるために大気汚染物質を減らせば、例えば、特に真っ黒なブラックカーボン—黒色炭素を減らすと、それによって地球は全球平均で 0.5°C ぐらい冷えます。そうすると、これだけでも 20 年ぐらい時間を稼げるので、それを利用してこちらの再生可能エネルギーを立ち上げていただくこともできるので、今、言った環境の問題とエネルギー問題、これはミティゲーションの問題になりますが、その両方を組み合わせるといった新しいストーリーを考えていければいいかなと思います。



一つの研究進行例としては、例えば日射量を速く計算する方法とか、雲とか大気汚染物質を速く計算するプログラム、あとは風ベクトルですね、どちら方向に雲が進んでいるかというのも開発している。あとはモニタリングシステム、それから太陽電池の評価システム、データ配信、こういったものを2年間ぐらいでつくる、大体このようなペースでできると思います。

それから、そいつをモデルと組み合わせるプロジェクト。重要なのはこういったものを国際発信していくというところで、さっきインドの例と中東の砂漠の例を出しましたが、こういう日本型モデルを使うとこれが発信できるので、こういったものをインフラというか、コンソーシアムとして立ち上げることができるのではないかと。それを次の2年でシステム化していくといった一つの研究例を考えてみましたが、こういったことで皆さんのお役に立てると思いますので、よろしくお願いいたします。

太陽光等、環境型エネルギーの最適利用に関する 地球科学型支援システムの提案

- 太陽光、風力、地表面温度等、環境から取り出すことのできるエネルギーの最適利用に役立つ最適支援システムを開発する。
- 新機軸として、人工衛星、気象予報、地球環境モデルを組み合わせた太陽エネルギー、風力、地表面温度の短時間予報準リアルタイムシステムの開発。雲、エアロゾル効果を含めた高精度の太陽エネルギーの最新算定アルゴリズムを導入する。
- 大学キャンパスや小規模コミュニティをつないだ実証システムの構築による、システムの検証。
- 地球温暖化、都市ヒートアイランド、全球大気汚染等、地球環境問題の軽減効果の評価とコベネフィット量評価。

まとめですが、太陽光とか風力、地表面温度等、環境から取り出すことのできるエネルギーの最適利用に役立つ最適支援システムを地球科学の面で支援していきたい、そういうことが可能ではないか。

新機軸としては、人工衛星、気象予報、地球環境モデルを組み合わせ、こういったものを短時間予報する。今のところどんなに速くても3時間、場合によっては1日かかりますが、それを30分ぐらいまで上げていくことは可能ではないかと思います。

そして、そういったものの実証としては、当面大学とか小さなコミュニティでやるのがいいのではないかと思います。

それから、いわゆる地球温暖化問題だとか都市ヒートアイランドとか大気汚染の問題の改善とこういったものをコベネフィット的につなげるといったことを、ぜひともこういったコミュニティで視野に入れていただくことも大事だと思います。

＜質疑応答＞

○木村

日射量の予測、風力の予測が再生エネルギーに非常に重要であることまでは非常によくわかりましたが、プラスαのコベネフィットという点をもう少しご説明いただけますか。再生可能エネルギーを使うと環境問題に何かマイナスが出るとか、あるいはプラスが出るとか、そのようなことがわかるということでしょうか。

○中島

例えば、ある日に太陽光でこれだけ発電したらCO₂の発生量が抑えられるというようなことが、CO₂マップで目に見えるようになれば、社会的なインセンティブを生み出す非常に重要なものになるということです。また、例えば、大気汚染量を減らすと直達日射量が増えて発電効率が上がるというような、直接のメリットもあります。コベネフィットというのはそういう意味です。

○木村

再生可能エネルギーを使った効果を目に見えるようにすることができるということですね。

○中島

大事なポイントではないかと思います。

それから、地表面温度予測も非常に重要ではないかと思います。例えば、穴を掘って地表面との温度差で発電したり、あるいはエアコンに利用するなどできるわけで、おそらく、地表面温度を予測することも重要ではないかと素人ながら考えています。

○安岡

中島先生が考えられているようなレベルの日射量の推定は、現在動いているひまわり6号・7号(MTSAT)もしくは次世代ひまわりで何とかかなりそうですか。

○中島

次世代ひまわりから、ほぼリアルタイムのデータがとれるのは非常によいのですが、モデル計算を多くしすぎると相当システムが重くなってしまうので、それをうまくなんとかする技術が必要になります。データが何分間隔で来るかで、考えていかなくてはなりません。予測のための部分で、ちょっとモデルを利用するというような、うまく組み合わせが必要で、そのところの開発項目が必要ですが、可能だと思います。

○安岡

同化の部分を強くして、予測モデルそのものの部分は少し弱めるイメージですか。衛星のデータを中心に使われるというのは、同化にインプットするのではなくて、衛星のデータそのものを使ってしまう。

○中島

はい。それに簡単な同化を加えるということでしょうか。

○太田

NICAM-Chem モデルというのは、どの程度の計算量でやっておられるのでしょうか。

○中島

このモデルを全球で走らせると、東大の大型を使っても 20 アンサンブル、20 回走らせて 1 個をフィットするのに 1 カ月ぐらいかかります。全球ではなく、2km 四方くらいの地域を取り出すとすると、1 日ぐらいで計算できます。あとはもう計算機のパワー次第です。

計算速度はテクノロジーの問題ですが、誰でもできる段階ではないということは間違いなくて、我々はカッティングエッジのところにあると思います。

○大塚

データ同化は、システム科学の立場から見ると推定技術ということで、非常に興味を持っています。今、テクノロジーの問題とおっしゃいましたが、アルゴリズムによって効率化が図れば非常にありがたい、そういうニーズも依然としてあると考えてよろしいのでしょうか。

○中島

ありますし、その道筋については何となく想像できます。ですから、それをやることを私はお勧めしたいと思いますし、将来性があると思います。地球物理学的にどこをどこまで正確に計算して、どこをはしょるかが天気予報の観点とは違うので、新たな研究をしていかないと改善できません。

○本間

日射量の予測ですが、予測精度も予測できたりするのでしょうか。ある状況では精度がよく、ある状況では精度が悪いなど。

○中島

今のところ、青空が見えていて雲がぼこぼこ浮かんでいる状況が一番難しく、予測にばらつきが生じます。それを改善するためには、例えば有限の雲をどう扱うかといったことを地球物理学的にやらなくてはなりません、そんなに難しい問題ではないかと思っています。

では、なぜ今までやってこなかったかといいますと、そういうニーズがなかったからなんです。3.11 以降、急にそういう引き合いがでてきて私たちもびっくりしています。やはり新しい再生可能エネルギーの利用の仕方という観点からすると、皆さんこういう問題を解決することは重要だと考えているのではないかと思います。

○安岡

MTSAT とひまわりはアジア地域をカバーしているわけですが、ほかの地域、ジェームス

系のセンサというのも、同じような時間分解能でデータをとれるようになってきているのでしょうか。

○中島

そうです。日本の MTSAT のセンサは、アメリカの GOES が基本型になっていますし、ヨーロッパのほうは進んでいまして、もう既にこういったラピッドスキャンが行われています。ひまわり 8・9 号があがれば、全球的なシステムがうまくいくと思います。

○安岡

質問の趣旨は、日本発の、こういう衛星観測データを使った予測までを含めたパッケージングでスマートグリッドみたいなシステムをつくったときに、それが世界的なスタンダードをとれるかどうかという意味で、日本の衛星を使わないとだめだとなるとアジア地域しか使えないということになってしまいますが、世界じゅうの衛星が使えるとすれば世界のスタンダードになり得るわけですね。

○中島

例えばモートセンシングアルゴリズムに関しては、何でイスラエルの会社から中島孝先生のところに話が来たかという、彼が世界のベストなのでそうなったということで、これは JAXA の投資でかなりやられている（スライド 6）。

もう一つは、先ほど言いました MTSAT、それから、これは今、使っているものですが、あと 2 つ GOES があって、これとこれはヨーロッパのものですが、これで地球をカバーしているので、ある意味ではすみ分けになっている。特にアジア・オセアニアの所は海がすごく多いので、気象的な観点からいくと欧米と違うスキルが要る。

そういう意味では JMA の研究は非常に大事で、そういったものは我々、直結して利用できるということで、やはりアジアでこういったものをつくることは、ワールドスタンダードの観点から言うと、その一角を成すものだと思います。

○井村

予測精度に関する話がありましたが、現状、予測されている時間というのは大体どのくらいを想定されていますでしょうか。

○中島

一番問題なのは、衛星からリアルタイムにデータを着信することができないことです。今は気象庁を通して利用していますが、次の日になってしまう。先ほど言った気象庁の静止衛星データ利用懇談会の中では「民生利用するために、なるべくそこを直結してください」という言い方をしていますが、そうなれば、3 時間ぐらいまではいくのではないかと思います。

○井村

非常に長い時間あるいは非常に精度の高い予測データが必要という点ですが、例えば電力安定化ということを考えたときに、実際のところどの程度の予測時間や予測精度が必要なの

か、現状ではまだわからないのではないかと思います。システム論の立場、制御のほうから、この程度の精度が必要であるということを理論的に提供できるのではないかと思います。

○中島

ローカルなシステムをどれくらいの広さで構築して、それらを全体としてどうやって制御するか、トポロジーによるでしょうね。極端な話、地球全部を繋げてしまえば、足して 0.5 になりますから安定化しますし。ぜひとも地球科学分野と一緒に議論していただいて、「こういうトポロジーだったらどうだろうか」ということになれば、検討できると思います。

○中島

また、同化システムというのは、同じ場に対して 20 回とか 40 回プログラムを走らせて次のステップのディシジョンをします。これをもう少しいい加減に、2~3 回やってまた次に行って、ちょっと外れてもまた次に行っていくというようなことを、制御の視点でシステムの中に組み込んでいただくのも非常に面白いと思います。地球科学モデルをノンリニアな一つのノードだと考えて扱えないかということですね。

6. 4 滑川徹先生 ご講演記録

再生可能エネルギーと分散協調制御

Distributed & Cooperative Control for Renewable Energy Network

滑川 徹
Toru Namerikawa

慶應義塾大学 理工学部 システムデザイン工学科

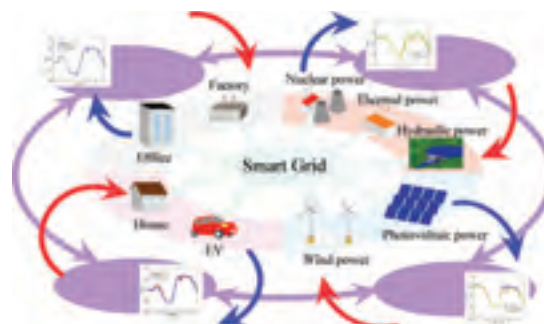
科学技術の未来を展望する戦略ワークショップ
再生可能エネルギーと分散制御システム



2011年8月6日(土) JST研究開発戦略センター

今日は「再生可能エネルギーと分散協調制御」についてお話しさせていただこうと考えております。なぜ分散なのか、分散がどう使われるかということに関しましては、既に飯野さんや藤田先生のご講演でも紹介されておりますので、それを補足するような形で、幾つかの事例を紹介させていただきたいと存じます。

分散型エネルギー需給管理システムの課題



システム構築の課題と社会的ニーズ

1. 予測誤差, 計測誤差, 推定誤差に対する**頑強性**
2. 故障・システム拡充／縮小に対する**安定性と頑強性**
災害や予期せぬ事故に対する**柔軟性**



Toru Namerikawa

Distributed and Cooperative Control for Renewable Energy Network

2

このスライドは私自身のイメージですが、再生可能エネルギーを含むようなスマートグリッドシステムがあって、それをいろいろなところで分散的に処理をする。そして全体としてそれが最適化を達成するというのは、先ほどの藤田先生のご講演にあったとおりです。

それに対しまして、本当に分散を使うためにはどのようなことが必要かということで考えて見ましたが、先ほどの中島先生のご講演にもありましたように、予測精度がどんどん高まってはいるものの、やはり予測、計測、そして推定の誤差をゼロにすることはできないので、我々システム、それから制御屋としては、今後、それを具体的に補償するようなフレームワークを考えていかなければいけないのではないかと思います。

それから、最初の飯野さんのお話にもありましたが、故障ですとか、今後さらにシステムが、 N コンのシステムが $N+1$ になるとか $N-1$ になるとか、そうした場合に全体のシステムの頑強性、安定性も考えていかなければいけませんし、さらに、3.11 のような予期せぬ災害等が考えられますので、それに対してよりフレキシブルに対応できるようなマネジメントシステムを考えていかなければならないと考えております。

安定かつ頑強な分散型需給管理システムを目指して



分散協調予測型 ロバストエネルギー管理システムの開発

達成目標

1. 計測や予測に誤差／ノイズが存在しても性能保証
2. 故障やシステム障害への柔軟な対応

目標に対する具体的なアプローチの事例紹介

1. 外乱を考慮した情報構造制約付き分散予測制御
[ICCAS 2011]
2. 反復勾配法を用いた分散制御
[CDC 2011]



Toru Namerikawa

Distributed and Cooperative Control for Renewable Energy Network

3

そこで、我々システム・制御屋としては、そのロバストなエネルギー管理システムを今後、分散制御のフレームワークの中で考えていかなければならないと思うわけでございます。そこで、長期なビジョンとしましては、こういった計測・予測誤差が存在しても性能を保証できるようなシステムをつくっていかなければいけませんし、故障やシステム障害、さらにシステムの拡張とか縮小に対してよりフレキシブルに対応できるようなシステム構築を考えていかなければいけないと思います。

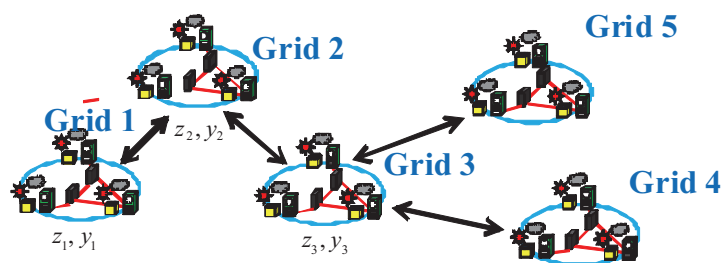
ただ、これは非常に高い目標でございますので、今日は時間も限られておりますので、それぞれに対してほんの一步までもいきませんが、0.5 歩ぐらいを進めるための具体的なアプローチの事例をここで紹介させていただいて、私の発表とさせていただきたいと存じます。

まずは、こういった外乱などを考慮した情報構造制約、つまり情報とかエネルギーの伝達を考えた分散予測制御と、そのフィードバックゲインを時々刻々と変化させて適合的に変えるようなものを使うことによって、より柔軟性とロバスト性を持つようなシステム、分散制御が構築できないかということで考えてみた結果について、ご報告させていただきます。

1. 外乱を考慮した情報構造制約付き分散予測制御



■ マイクログリッドが連結した大規模分散システム



$$x_i(t+1) = \sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(t) + B_i u_i(t) \quad x_i(t) : \text{状態} \quad u_i(t) : \text{制御入力}$$



$$x_i(t+1) = \sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(t) + B_i u_i(t) + \underbrace{F_i w_i(t)}_{w_i(t) : \text{ノイズ}}$$



Toru Namerikawa

Distributed and Cooperative Control for Renewable Energy Network

4

最初の問題設定ですが、ここではこの図に示しますように、マイクログリッドで5つぐらいの離島が結合しているようなイメージですが、その電力の振る舞いについては、何らかのこういった微分方程式で与えられて、それぞれが情報的に結合しているので、それがある総和を計算することで次の時刻の状態—例えば電力量ですとか周波数の情報等がこれに対応します—が決まります。それに対して、実際には計測とか予測の誤差がございますので、そういったものを扱わなければいけません。

大規模システムと通信遅れ

✕

- サブシステムごとに収集情報が時間的・空間的に異なる
- 1つ離れたサブシステムの情報を得るには1ステップ分遅れ

- 共分散拘束

$$\mathbf{E} u_i(t) w_j^T(t - \tau) = 0 \quad \text{if} \quad \tau \leq \text{dist}(i, j)$$

ただし $\tau \in \mathbb{Z}_+$ $\text{dist}(i, j)$: サブシステム i と j の距離

Toru Namerikawa

Distributed and Cooperative Control for Renewable Energy Network
5

さらに、システムが大規模になった場合、例えばこれはシステムを5つ結合していますが、それがさらにこの部分で結合するとか、システムがこうやって変わったり結合状態が変わったり、さらには、情報もしくはエネルギーが伝達するのにこういった時間の遅れがございしますので、ある距離の情報に伴って拘束の条件が変わってきます。

これは、非常に離れた所の状態はこちらまで影響を及ぼさないことをあらわしているわけですが、このような表現、問題設定ができるということで、ここでは先ほど藤田先生がご紹介されたモデル予測型の最適制御問題に対して、そういった誤差も考えて、何らかのコストを最小化するような問題設定をした結果について、簡単な数値実験の結果をご紹介いたします。

情報構造制約を有するシステムの予測制御



■ モデル予測型最適制御問題

計測／予測誤差を考慮したコストの最小化

$$\min_{u(0), \dots, u(N_C-1)} \mathbf{E} \left\{ x^T(N_C) P_{N_C} x(N_C) + \sum_{j=0}^{N_C-1} \begin{bmatrix} x(j) \\ u(j) \end{bmatrix}^T P \begin{bmatrix} x(j) \\ u(j) \end{bmatrix} \right\}$$

subject to

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + Fw(t) \quad x(0) = y_0 + v(0)$$

$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix}^T Q_r \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} = 0 \quad \mathbf{E} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix}^T Q \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix} < \gamma \quad Q = \begin{bmatrix} Q_x & 0 \\ 0 & Q_y \end{bmatrix}$$

$r = 1, 2, \dots, m$

$$\mathbf{E} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \in D \subset R^{n_x + n_u} \quad \mathbf{E} x(N_C) \in F$$

Terminal constraint set

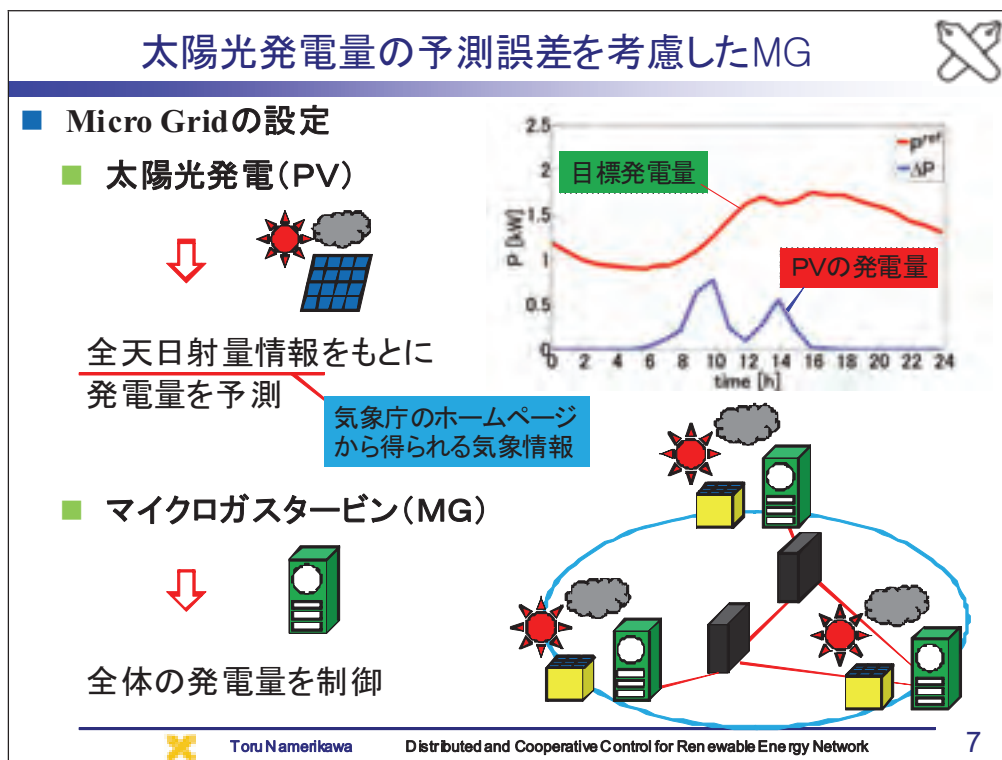


Toru Namerikawa

Distributed and Cooperative Control for Renewable Energy Network

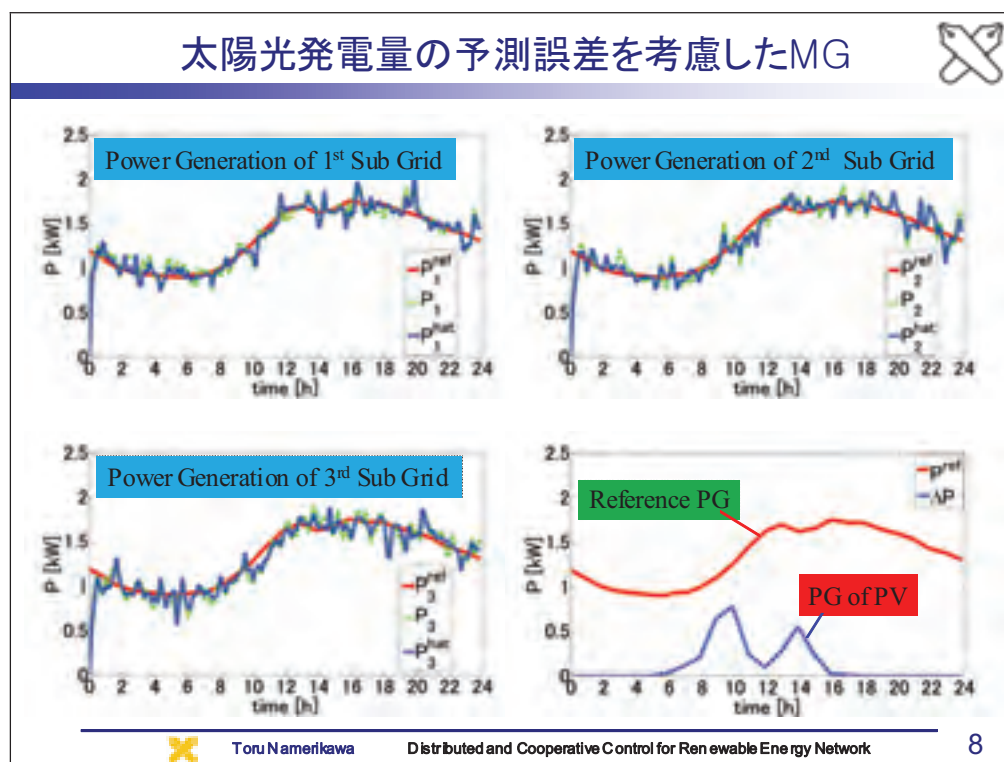
6

見にくくて申しわけありませんが、これはあるコストをあらわす関数だとお考えください。それを最小化するような入力を、現時刻から N ステップ先まで考えていきたいということで、このシステムの情報がここで制約条件として与えられていて、不確かさの情報とか外乱等が含まれているものです。

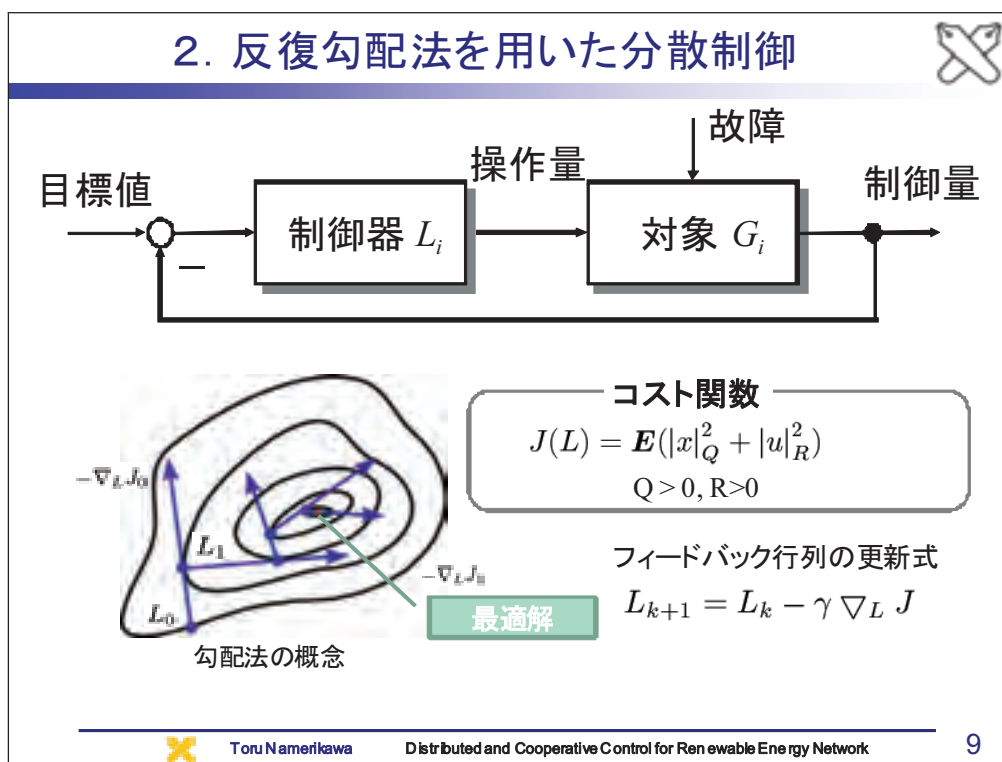


実際のここでのシナリオとしては、太陽光発電量の予測誤差を考えたマイクログリッドシステムについて考えています。

ここでは、全日照量情報をもとに発電量を予測するのですが、それに何らかの誤差があるという設定を考えます。制御するものとしては、設定としては少し古いですが、発電機や蓄電池が与えられていて、それが電力の融通をする。3つのシステムを結合しているという設定です。



あらかじめ予測した目標発電量があるのですけれども、この発電量に不確かさが存在するような場合に、不十分な情報であるにもかかわらず、それからノイズが乗っているにもかかわらず、3つのグリッドについて赤色と、それから緑のラインがそれなりに一致してほしいというのが目的ですが、この情報が十分に得られないような形でそれなりにこの設定で計算できる、そのような結果が得られました。



後半ですが、ある反復勾配法を用いた分散制御について簡単にご紹介します。

これは1つの制御システムで、これがN個結合している、そういうシステムをイメージしてください。

ただし、これに対して何らかの外乱とか故障信号が入ってきますので、制御器のフィードバックの程度をうまく変えてやりたい。そのときの指標としては、あるコスト関数が与えられて、これをできるだけ小さく抑えたいという問題を考えます。

ここでは、そのコスト関数を睨みながら、これはその手の情報の結合状態によっていろいろ変わってくるわけですが、それをだんだん小さく落としていくようなフィードバック行列の更新を時々刻々で行っていくという方法を用います。

再生可能エネルギーを含むMGの周波数制御



- 再生可能エネルギーを含む複数MGの周波数制御
- 反復勾配法を用いた分散制御
- 周波数変動に対する頑強性検証

■ 反復勾配法に基づく分散制御系の設計

- ☐ 状態フィードバックゲインを逐次的に更新
- ☐ 分散制御系

■ 再生可能エネルギーを導入した電力ネットワークの系統周波数制御

- ☐ ガスタービン, 蓄電池群, ヒートポンプ群, 風力発電からなるMG
- ☐ ガスタービンが正常運転している場合と故障した場合の比較
- ☐ 集中(Centralized)型 > Distributed $\geq$ Decentralized



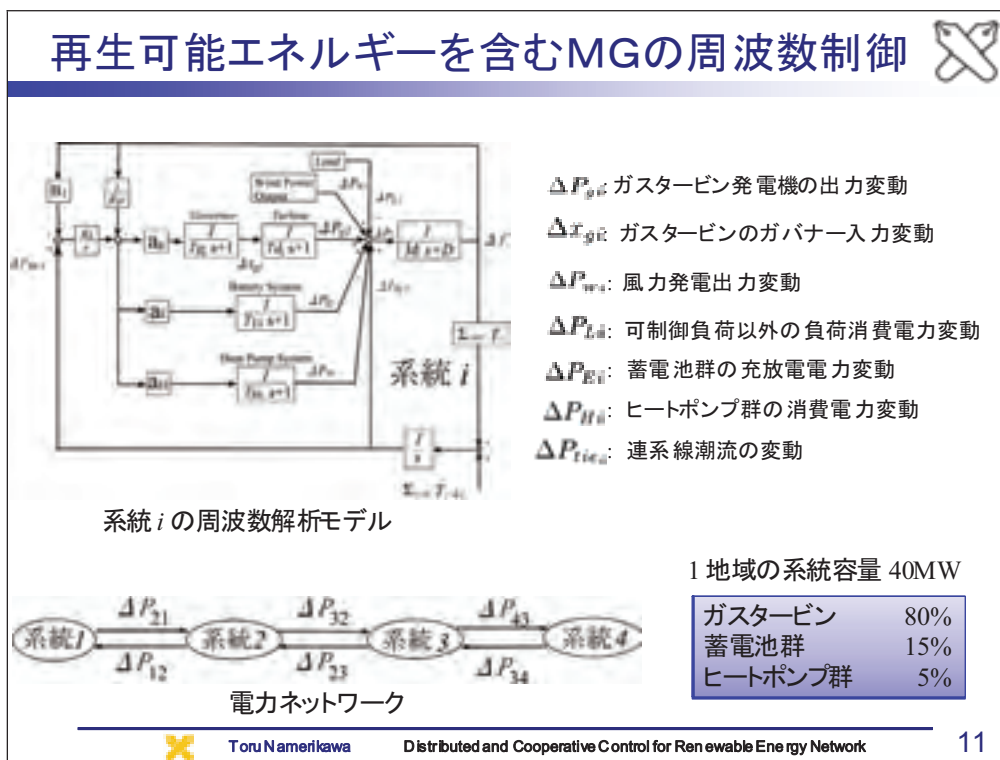
Toru Namerikawa

Distributed and Cooperative Control for Renewable Energy Network

10

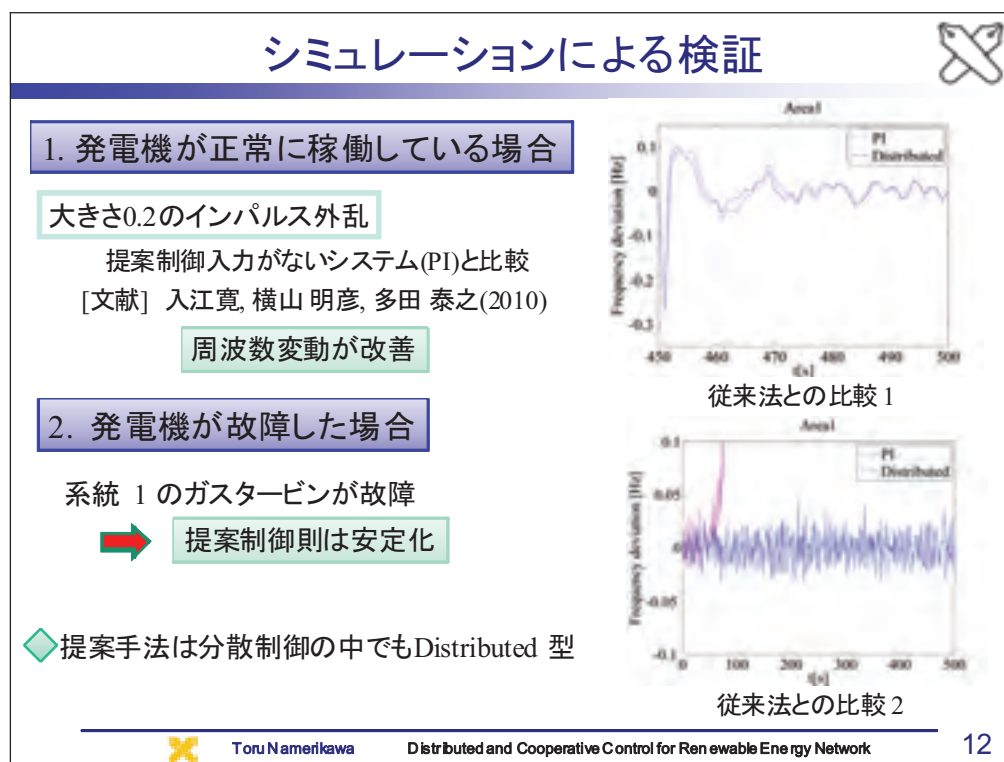
こういったものを再生可能エネルギーを含むマイクログリッドの周波数制御に適用してみたわけですが、ここでは反復勾配法を使って周波数変動に対する頑健性の検証をしてみました。

繰り返しのようになりますが、状態フィードバックゲインを逐次的に更新して分散制御系を構築し、ここではガスタービン、蓄電池群、ヒートポンプ群、風力発電から成るマイクログリッドシステムをつくって、それに対してコストがどれぐらい抑えられるかを数値実験で検証しました。

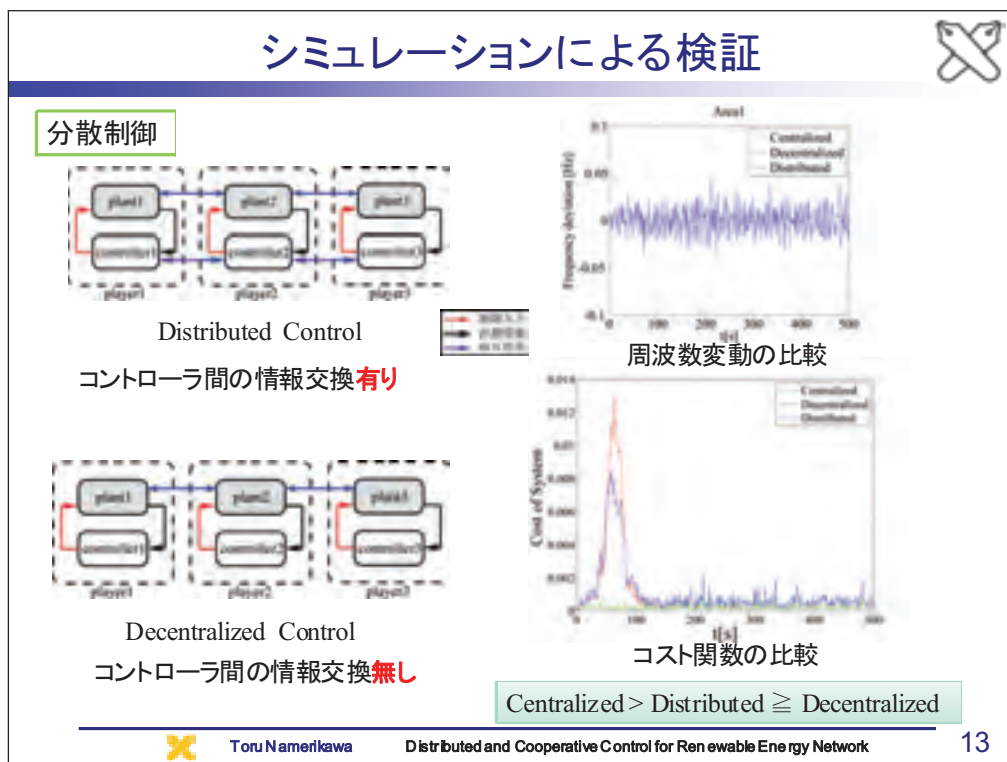


設定としましては、このような形になります。

見にくくて申しわけありませんが、ヒートポンプとかバッテリーとか発電機のシステム、それからウィンドパワーとか負荷がこのような形で結合していて、これが系統 *i*、マイクログリッド *i* だと考えてください。それが4つこのような形で連系して、結合しているというものです。



このシミュレーションは周波数制御が目的で、電力の品質を維持したいという視点で東大の横山先生の設定、分散を使わせていただきました。実際に発電機が正常に稼働している場合にはそんなに大きな差は出てこないのですが、発電機が故障したような場合に、故障に対して適切にフィードバックゲインを調節して、それで安定性を維持しているといった結果が得られています。



それから、いろいろな情報の結合構造があるのですが、ここでは2つのタイプの情報結合の方法について検証してみました。

もちろん、情報をできるだけ共有してやったほうがよりコストを抑えるようなことができるのではないかと予測されます。これがそのコストの比較で、小さいほうが望ましいですが、全体を集中管理してやると最適になっている。ここで、あくまで我々の数値例題ですが、それがディセントライズドという方法で、情報を交換しない場合に比べて、情報を共有してより適切に電力融通をしてあげるとここまで落ちるといったことが数値例題としてわかってまいりました。

安定かつ頑強な分散型需給管理システムを目指して 

**分散協調予測型ロバスト
エネルギー管理システムの開発**

達成目標

1. 計測や予測に誤差／ノイズが存在しても**性能保証**
2. 故障やシステム障害への**柔軟な対応**

目標に対する具体的なアプローチの事例紹介

1. 外乱を考慮した**情報構造制約付き分散予測制御**
[ICCAS 2011]
2. 反復勾配法を用いた**分散制御**
[CDC 2011]





Toru Namerikawa

Distributed and Cooperative Control for Renewable Energy Network

14

私の発表では、こういった分散協調予測型のロバストエネルギー管理システムを目指しまして、それに対する2つの事例を簡単に紹介させていただきました。具体的には、外乱を考慮しました情報構造制約付の分散予測制御、2つ目が反復勾配法を用いた分散制御というもので、それは今年の秋の国際会議で発表する予定です。

安定かつ頑強な分散型需給管理システムを目指して



今後の課題

1. 分散エネルギーシステムの**安定性**, **最適性**, **頑強性**
のための**理論**および**基盤技術開発**
2. エネルギー供給, 蓄積, 需要モデルに基づく
計算機シミュレーション／**模擬シミュレータ**を用いた
理論および**システムの評価研究**



Toru Namerikawa

Distributed and Cooperative Control for Renewable Energy Network

15

まだまだ十分ではありませんので、今後、さらに詳しくこういった分散エネルギーシステムの安定性、最適性、頑強性について理論とか基盤技術開発を行っていかねばいけません。ここではエネルギー経済問題等は全く入っておりませんし、そのような話は内田先生がこの後、お話しされると思っております。

それから、私がここでご紹介した結果は非常にシンプルなモデルでしかございませんので、実際それがどこまで使えるかは全くわかりません。そういう意味で、より実際に近いような計算機シミュレーションとか模擬シミュレータを使って分散制御が本当に使えるのかを検証していきたいと思いますが、それにつきましては、この後、林先生がご講演の中で詳しい現状をご紹介くださるのではないかと考えております。

＜質疑応答＞

○藤田

スライド 13 ですが、分散制御の上と下、Distributed Control と Decentralized Control の違いをもう少し説明していただけますでしょうか。

○滑川

コントローラ間の情報交換があるかないかの設定が違います。上の Distributed の方は、結合しているコントローラ同士で、ローカルな情報交換ができる。下の Decentralized の方は情報交換がありません。上は、分散した上で協調し合っている、下は分散しているだけでバラバラである。

○藤田

ということは、スライド 12 の右下のグラフが示していることですが、Distributed Control、分散協調型で制御することによって、故障があっても安定化できるけれども、従来法ではできない、ということであらわしていると考えてよいですか。

○滑川

そうです。スライド 13 でいう上の方でうまく制御を達成しているということです。

○安岡

私もスライド 13 に関する質問ですが、下を書いてある不等号式、 $\text{Centralized} > \text{Distributed} \geq \text{Decentralized}$ というのは、セントライズはコストが一番高く、ディセントライズドはコストが一番低いと考えればいいんですね。

○滑川

グラフのピークができるだけ小さいことが望まれるわけですが、赤の Decentralized がもっともコストが高く、青の Distributed はそれよりは抑えられているということです。評価関数の大小と、システムの良し悪しの感覚が逆転してしまっていて、あまりよい表現ではなかったかもしれません。

○飯野

上の Distributed、それから Decentralized と Centralized の三つがある。今の電力系統は、Decentralized のケースで、それぞれローカルで制御していて、情報のやりとりがない状態である。一番性能のいい緑色の Centralized は実現できれば理想的だけれども、それには物すごくコストがかかってしまう。要は、家一軒一軒とか需要家一個一個の情報を全部中央に上げないといけないので、社会的なインフラコストが膨大になってしまっていて非現実的である。それに対して、コストを余りかけずにうまくやろうというのが上の Distributed Control である、そういう解釈でよろしいですね。

○滑川

はい。

○飯野

そのときに、この青い所の横の通信というのが実際どのくらいのタスクというか、例えばどのくらいのサンプリング周期でやりとりすればこのくらいの性能が出るのでしょうか。

○滑川

このケースは1秒サンプルですね。

○飯野

では、例えば今のインターネット環境でも、うまく使えば実現できるかもしれない、そのくらいのイメージですね。

6. 5 林泰弘先生 ご講演記録



講演内容

- 分散型再エネ連系配電ネットワークの特徴と導入システム技術を実証する環境
- 計算機シミュレーションによる研究開発例
- 模擬シミュレータによる研究開発例
- 計算機シミュレーションと模擬シミュレータを用いた研究開発戦略

スマートグリッドというのは本当に定義が曖昧でよくわからないものなのですが、私は2003年からこういうエネルギーマネジメントの研究とか実証シミュレーション等をやっていますので、今日は経験的にいろいろお話しできればと思っております。

なぜ計算機シミュレーションが必要か、なぜ模擬シミュレータが必要かということで、大きく4つの話をさせていただきます。

1 つが、分散型の再生可能エネルギーが連系された配電ネットワーク。これを今、よくスマートグリッドと言いますが、もともと電気を配る電気のネットワークがありまして、そこに太陽光が新たに入ってきているというのが実際の電気のネットワークです。そういった特徴をまず整理させていただきます。

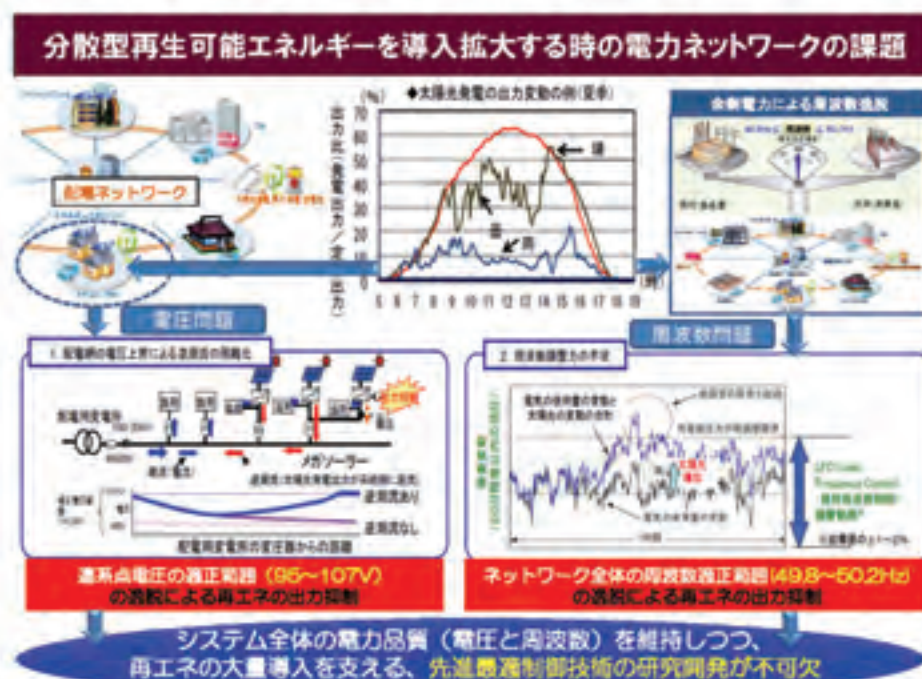
その次に、そこに導入システム、つまり新しい最適化制御技術を入れるときにはどういう環境が必要ですかということ。これは学の立場ですね。スマートグリッドといえば家電メーカーとか車メーカーとかいろいろな企業がありますが、私のところにたくさん話が来ます。それは、学は中立だからなんですね。ですから安心感があって、新しいイノベーションを興すときに学というのは、このような実験システム等があるところは非常にいい、安心するとよく言われております。

3 つめとして、計算機シミュレーションによる研究開発例ということで、私どもがやっていた事例を1つ紹介させていただきます。

さらに、先ほど藤田先生からもご紹介がありました実証の模擬、アナログの、実際の実験の物理的なシミュレータによる研究開発事例をご紹介させていただきます。

最後にまとめといたしまして、これらを用いた研究開発戦略ということでご説明させていただきます。

分散型再エネ連系配電ネットワークの特徴 と 導入システム技術を実証する環境



先ほど飯野さんからも話がありましたが、スマートグリッドで太陽光等がたくさん入るといことで、私、いろいろなところで講演するときにまず言うのが、「再生可能エネルギーがたくさん入ると電気の品質が脅かされますよ」ということです。電気の品質というのは何かというと、コンセントの電圧と周波数が、きちんと制御されているかどうかということです。

実は、皆様が使うコンセントの電圧は「95 ボルト～107 ボルト」とちゃんと決まっています。その範囲におさまらないと家電とかいろいろなものが動かないんですね。ですから好き勝手入れても、その入った量が電気のネットワークを通じて流れてしまうので、電圧が制限を超えてしまう。

よく聞くのは「私の家に太陽光パネルをつけたんですが、発電しません」ということです。それはなぜかという、この 107 ボルトを超えると自動的に太陽光の出力抑制機能が働くからで、せっかく 200 万円かけて太陽光発電をつけたのに、結局発電ゼロということは本当にあるんですね。ということは、せっかく再生可能エネルギーを入れても、発電する量をしっかり見ないと CO₂削減とか低炭素につながりません。そこに技術があるわけですね。つけた人がしっかり電気を流してちゃんと世の中に貢献するためには、電圧をこの 95～107 ボルトの範囲に必ずおさめる制御が必要で、そこにシステムの最適化の制御の技術が不可欠です。

一方で、地域全体でのスマートコミュニティ等がありますが、そうすると、地域全体で周波数を賄わなければいけない。その場合はコンセントの周波数、これも決まっています「49.8 ヘルツ～50.2 ヘルツ」の間におさめなければいけないんですね。そして、例えばコミュニティ全体の電気を使う量と発電する量がぴったり同じだと 50 ヘルツぴったりなのですが、それをみんなが必要以上に、例えば甲子園とかなでしこジャパンのテレビを見ると周波数がグッと下がって、この 49.8 ヘルツを下回ることになってしまいます。そのときにも周波数をちゃんと制御する技術が必要になってくるということで、再生可能エネルギーがたくさん入ってきたときに、再生可能エネルギーを注入できるようにするため、電圧と周波数の 2 つがちゃんとこの範囲におさまるような、技術が必要であると言われております。



もう一つよく言われるのは、システム最適化技術を入れたら何がいいんですかということですが、我々がよく見せるのは、こういうイメージです。

例えば、再生可能エネルギーがつながった配電ネットワークがあります。これまでの制御技術を導入すると、「CO₂の排出量がどれくらいでした」とか定量的に出ます。一方で、消費エネルギー量が出ます。もちろんこれは最小化して頑張るんですが、そのときの全体の評価値は、この面積のグレーの部分になるわけですね。

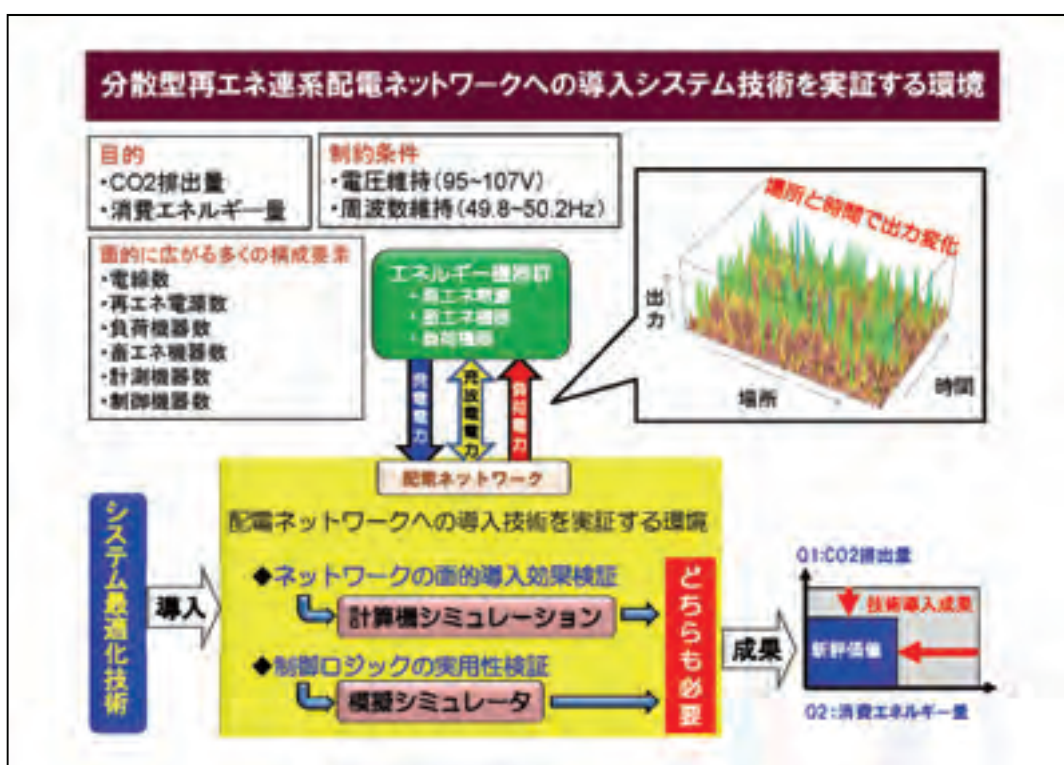
そこで、例えば先ほど説明がありましたような新しいシステム最適化技術をいろいろな機器に入れたときに、そこから出た量が必ず削減されます。従来より削減される新しい技術になりますので、そうすると、この両方が下がった分、この部分の面積が新しい技術導入の成果になるわけです。簡単に言うと、これで CO₂ 排出量とか消費エネルギー量を計算すれば、どれくらい効果があったかを社会的にも出すことができるというイメージでございます。



この特徴を考えると、特徴と目的と制約があると思っております。

例えば、太陽光等の再生可能エネルギーは発電電力として電気のネットワークに流し込みますし、これから電気自動車等で充放電も入ってきますし、蓄電池が入ってくると電池が双方向で行き来する機器も入ってきます。また、ヒートポンプ等いろいろな負荷を電気を使う側もコントロールできる時代になってきていますので、メーターで見せる化しながらコントロールもできます。そうすると、この3つの種類の電力がいろいろな機器、いろいろな箇所に入ってきて、それぞれが自由に動くというイメージを考えてください。

そうすると、この図では場所が横軸で奥行きが時間、縦軸が出力とすると、いろいろなところで電気が自由に動き回る。動くのは別に構わないんですが、動くときき言ったように電圧とか周波数に影響があって、せっかく再生可能エネルギーを入れても電圧とか周波数、ちゃんとみんなが安心して使える品質が得られません。そこに制御技術があると考えていただければと思っています。この目的と制約条件と個数ですね。いろいろな制約、構成要素も非常に多くなってきます。電線のネットワークもありますし、いろいろな制御機器も入ってきます。



ここからは次の話になりますが、例えば大学等で最先端の理論をつくって最適化技術を提案されたときに、自分たちの開発した技術が一体社会にどれだけ貢献するんだろうという、その場所が環境ということなんです、そこが必要になってきます。

実は私、最初はずっとシミュレーションをやっていました。シミュレーションというのは、例えば電気のネットワークは構成要素が多いため、装置をつなげてのネットワークでは数が多過ぎてとても実験ではできないため、コンピュータ上で計算するのです。

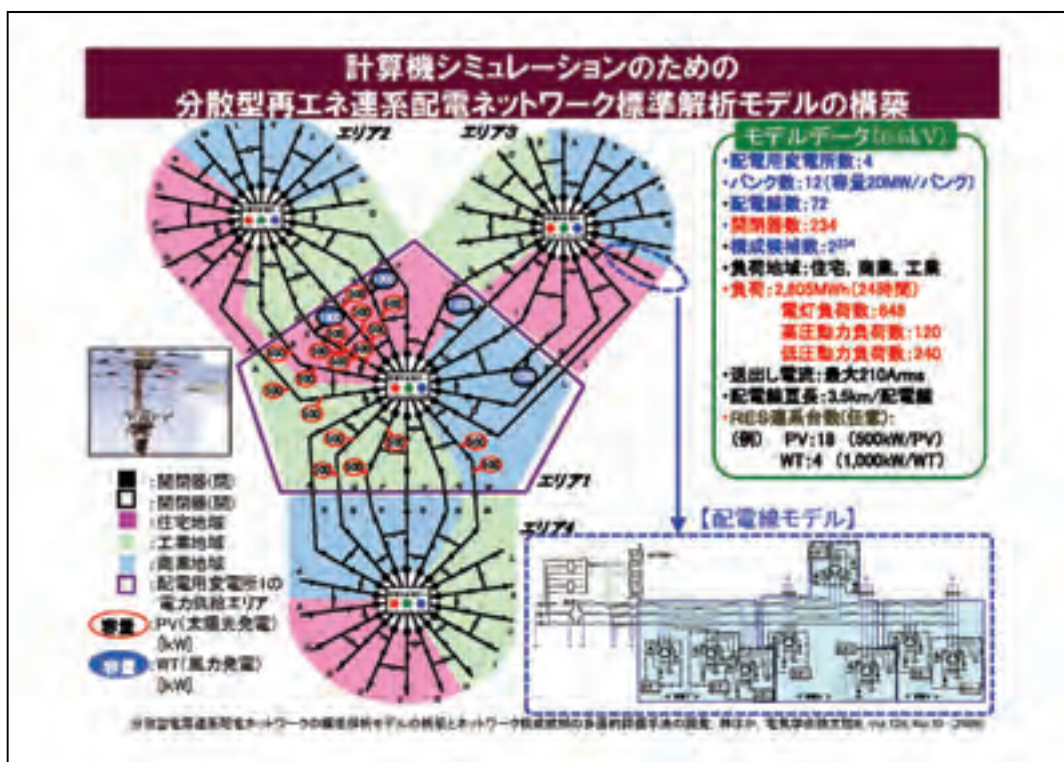
計算機シミュレーションにもよさがある、たくさん入っているものがどれくらい良いかというのは非常に効果があります。ただ、我々も制御ロジックをいろいろ開発しては思ったんですけども、やはりハードがあって、そのハードをソフトでしっかり動かして、本当に動くか、例えば計測誤差があったり観測時間のおくれがあったときに大丈夫か、そういった制御ロジック、実用性の検証は、ハード的な模擬シミュレータでやる必要がある。

ですから、2つあると思っています。部分的な、ちゃんとした機能はしっかりハードで検証して、それをシミュレーションに入れて面的なアプローチ、配電ネットワーク全体の効果がどれくらいかといったことを出すというイメージでございます。

何が大事かというと、我々大学人は、ほとんどが学術的な保証とか数学的な背景の正しさをきちっと出せますので、そういう意味で、成果が学術的な保証に基づくというのは非常に大事なと思っています。もちろん試算はコンサル関係の人なら多分どんな方でも、今はエクセルで簡単にできるんですけども、やはり学術的な、数理的な知識のある方がやった成果もまた大事なと思っています。



では、計算機シミュレーションによる研究開発例をご紹介します。



見づらくて申しわけありませんが、簡単に言うと、外に電柱があって配電線のネットワークがございますが、それを上から俯瞰したイメージと考えてください。

ここに描いてあるのは配電用変電所なんですけど、配電用変電所から電線が、ここに3本ありますが、これはまとめて1つにしているイメージです。そして他の配電用変電所の線につながって、上から見るとこういうネットワークとしてつながっております。

ただし、その中に開閉器があって、これは外から自動で開いたり閉じたりできるものですが、そういうものを実はコントロールして、電力会社は今、実際に、ある場所は開く、ある場所は閉じるという形でこういうふうに、各配電用変電所が上位とすると、そこからツリー状のネットワークでコントロールしています。そして、この部分は開いているイメージです。各配電用変電所はみんなこういうふうにツリー構造で、電圧が95～107ボルトの範囲に入るようにやっていました。これは実際、今もやっています。

ですが、3.11以降、例えばこの丸印が太陽光発電、青が風力なんですけど、こういうものが自由に入ってくるわけですね。こういうところから電気が逆向きに入ってきますと、昔のままのネットワークの構成では電圧を必ず95～107ボルトにおさめることはできません。これは、出せと言われればシミュレーションですぐ出せます。

そうすると電力会社はどうするかというと、ここは電気が軽くなってこっちが長くなるので、開閉器を開く場所を変えるんですね。要するに、こういうネットワークのトポロジーを変えることを行ってきます。そういう制御が今後、いたる所で必要になってくるということでございます。

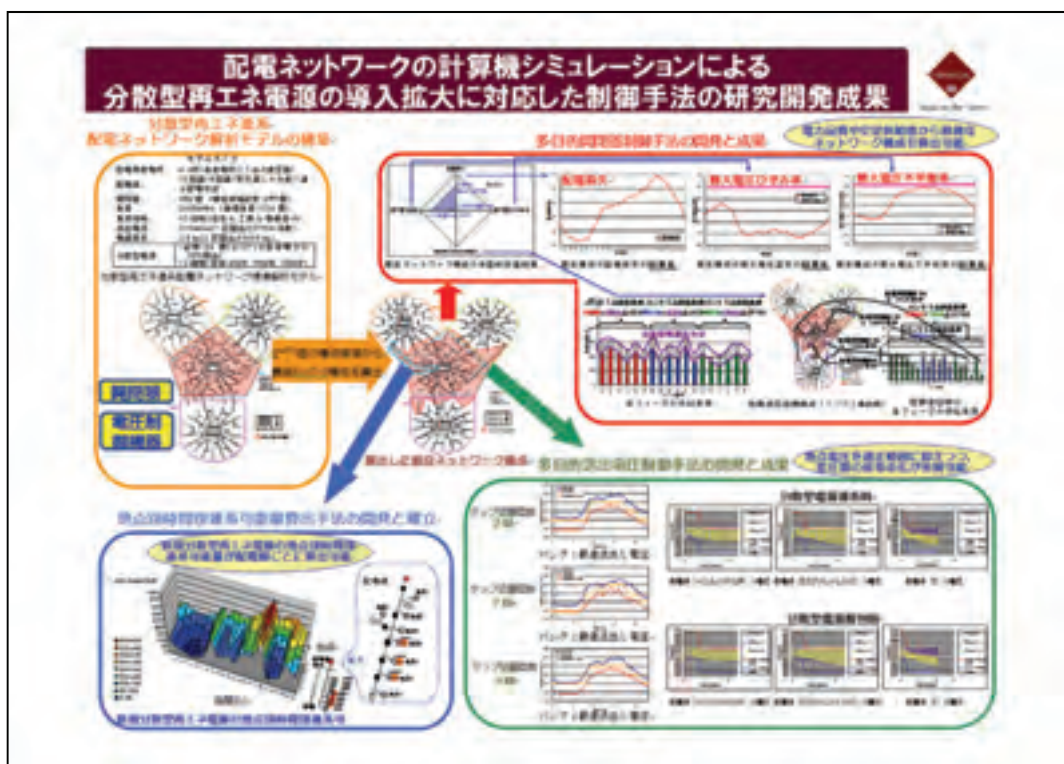
これを漫画でかくとこんなイメージですが、実はこの詳細モデルは3層で、電気回路がたくさんあって申しわけないのですが、きちっとモデル化して、その中にさっき言った電圧、電圧は階段状に変圧器のタップで動かせるのですが、電圧の制御機器、あと開閉器という形

になっております。

これは実は 2006 年に学術論文誌に出しているオープンなデータでございまして、もう一つ申し上げますと、単に我々が学術的な背景のみでつくったわけではなくて、実際、東京電力の配電部で配電ネットワークの管理をしている人と話し合っ、外に出してもいいが、一般的な配電のネットワークのモデルのデータをつくっております。

これを見ていただくと、例えば商業・工業・住宅地域もありますし、データも時間断面、1 時間断面ごとにございます。あと、見ていただくとわかるように開閉器数も 234 個ありますので、単純に開閉器を入れるか切るかという組み合わせを考えると 2 の 234 乗とおりもあって実際やるには天文学的な数字になってしまう。その中から一番いい構成をどう選ぶかといった話もございます。

ですから、次にお見せする私が今回このモデルでやったシミュレーション例は、電圧の制御と開閉器の制御という 2 つの視点からアプローチしたものです。



非常に見づらくて申しわけありませんが、ちょっと意味がございまして1つにまとめさせていただきます。

これが先ほどのモデルですね。真ん中の配電用変電所が供給しているエリアがピンクの部分です。ここに再生可能エネルギーが入る前はこれだったんですが、ここに再生可能エネルギーが負荷に対して30%入ってきた状況を想定しました。

そのときにどの構成が一番いいかを考える訳ですが、何を一番の目的にしたかという、実は流れる電流の二乗に比例して配電エネルギーの損失が起きます。エネルギーの損失というのは結局、無駄な電気になりますが、それを少なくすればその分、環境にやさしいことにもなりますので、配電損失を最小にするというネットワークの構成を計算する。

一方で、各地点の電圧の中で一番電圧のひずみ率が大きいものをできるだけ小さくしたいという条件も入れていますし、あと不平衡、電圧のバランスが悪くならないようにということで、この3つを満足するような構成を選んだ結果がこれです。

これはちょっと形が違いますよね。こうあったときにこっちに取りにいたりしていますので、この部分のもともとききれいな形をこのように違う形にして、一番エネルギーのロスが小さくてこれを満足する形にするという結果を出しております。

電圧に関しましては、上が上限で下が下限です。これがさっき言った95ボルト～107ボルトの範囲とイメージしていただくとわかると思いますが、その中に我々が作った電圧の制御ロジックを入れると、これは横軸が場所で縦軸が電圧で、点が多いのは24時間断面のプロットが入っています。それが24時間どこの時間でもこの帯の中に入っているということは、24時間いつでも電圧は出ませんよという証拠になります。そういうものを配電用変電所ごとにきちんと評価します。

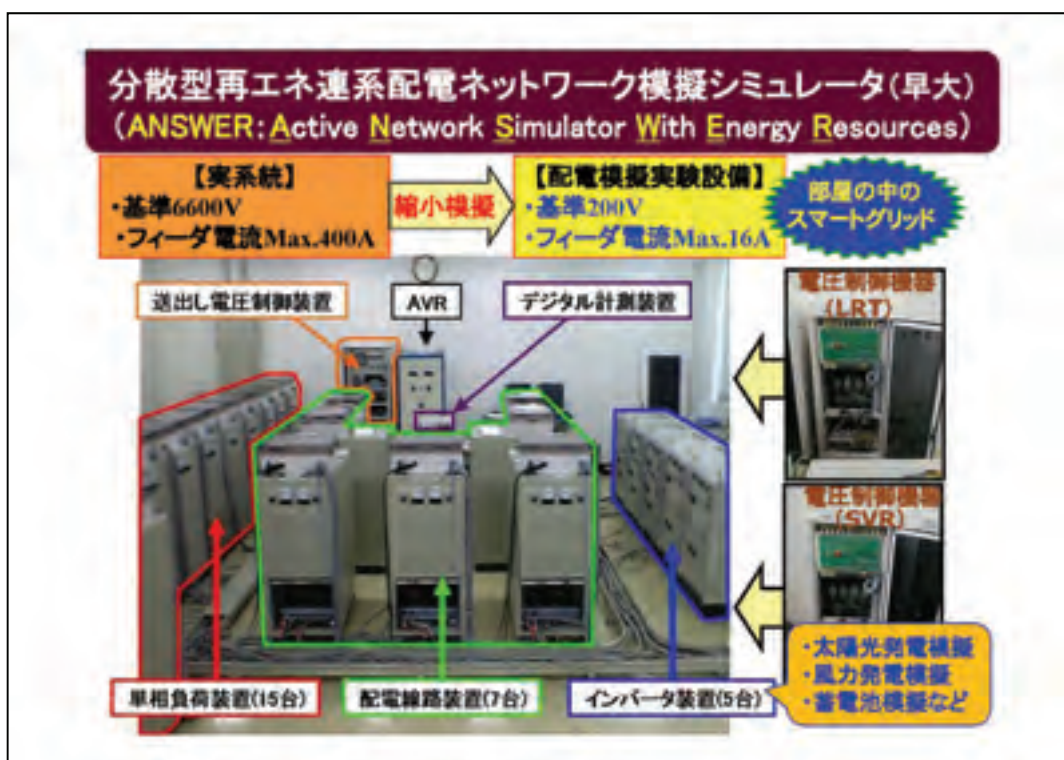
しかも、切り換え回数というのがあります。変圧器というのは機械的なマグネットのスイ

ッチなので、切り換えると磨耗して寿命が短くなるんですね。ですから、なるべく少ない回数で電圧をちゃんと範囲におさめたいということで行っております。

もう一つのポイントは、電力会社の方と話していると、解列といって、分散電源が系統から外れるときもあるんですね。そのときにもちゃんと電圧を維持しないと困るんですとおっしゃるので、では、そういうものもちゃんとやっておきますということで、この下は、つながっていた太陽光が全部外れた場合でも、ちゃんと電圧が範囲におさまっているというシミュレーションです。

実はさらにもう一個、私は当初、どここの配電線にどれだけ再生可能エネルギーを連系できるのかというニーズはいろいろな方に絶対あると思っていました、どうしたかという、地点別、時間別の連系可能容量、要するに、どこで、いつ、どれだけ再生可能エネルギーを受け入れられるかを3次元のグラフで見せるようにした。例えば、配電線がこうございまして、これは奥行きが地点で横軸が24時間で高さが受け入れられる量ですが、このように見せる化するんですね。そうすると、お昼に高ければそこに合わせて入れる側も考えられる。そういう手法も一応確立しております。

申し上げたいのは、例えば次世代のネットワークを考えるときには、まずエネルギーロス小さくする構成をつくって、電圧の制御をかけて、その上で一番いいネットワークの状況を見せた後に、入れたい人に対して「これだけだったら入れられますよ」というのを見せるということぐるぐる繰り返していけば、再生可能エネルギーというのはたくさん入るのではないかというアプローチを考えているということです。

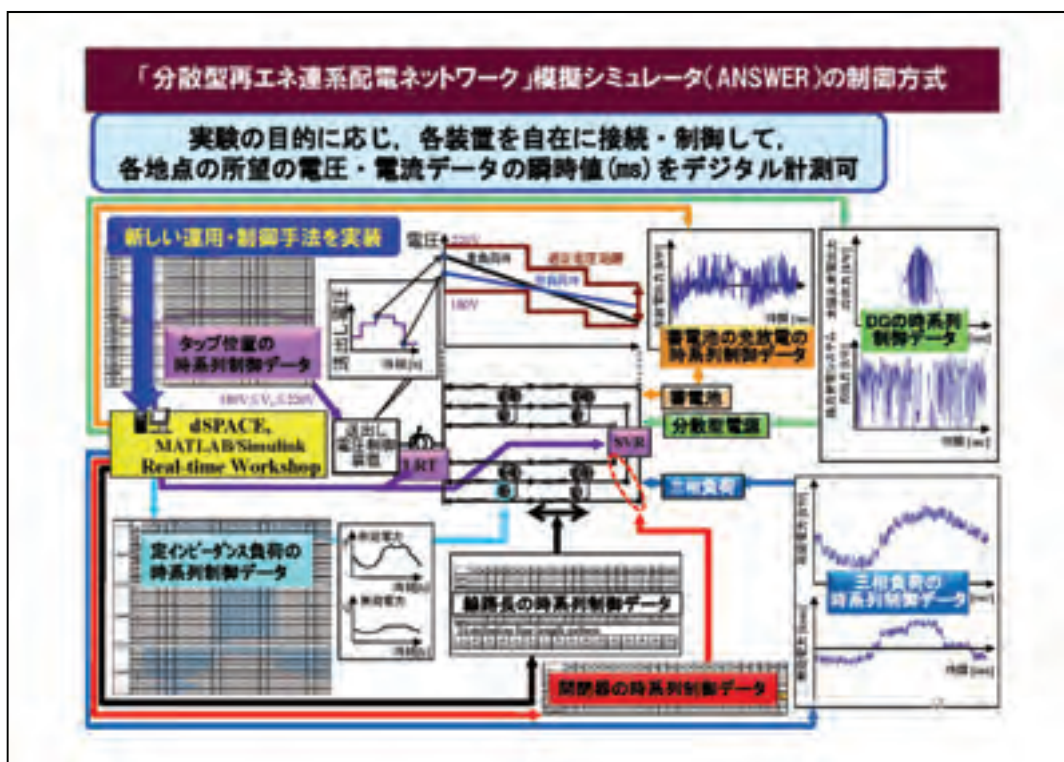


続きまして、模擬シミュレータによる研究開発事例です。

さっき 3 本の線がありましたが、実際に外にある線と線の間の電圧は 6,600 ボルトもありまして、フィーダというのは電線なんです、電柱の上の電線に流れる電流は最大 400 アンペアと、実は非常な大電流が流れます。それで実験できれば一番いいんですが、非常に危な

いし、とても大学の中ではできないので、それを 200 ボルト、16 アンペアにして大学の実験室の中に構築したものがこれです。

その中に電圧制御装置を入れたり、これはインバータと言われるものですが、太陽光発電を模擬したり蓄電池を模擬したりできるということで、基本のコンセプトはレゴブロックなんですね。レゴのマインドストームとかレゴブロックのイメージで、やりたいパーツをいろいろ持ってきて、それを電氣的につなげる。一方で情報通信もつなげれば電氣的にも情報的にもつながるので、いろいろな人がいろいろなことをやりたいときにはこういうものが一番いいと思います。装置自身も陳腐化しないんですね。そういう意味で、いいなと思っております。

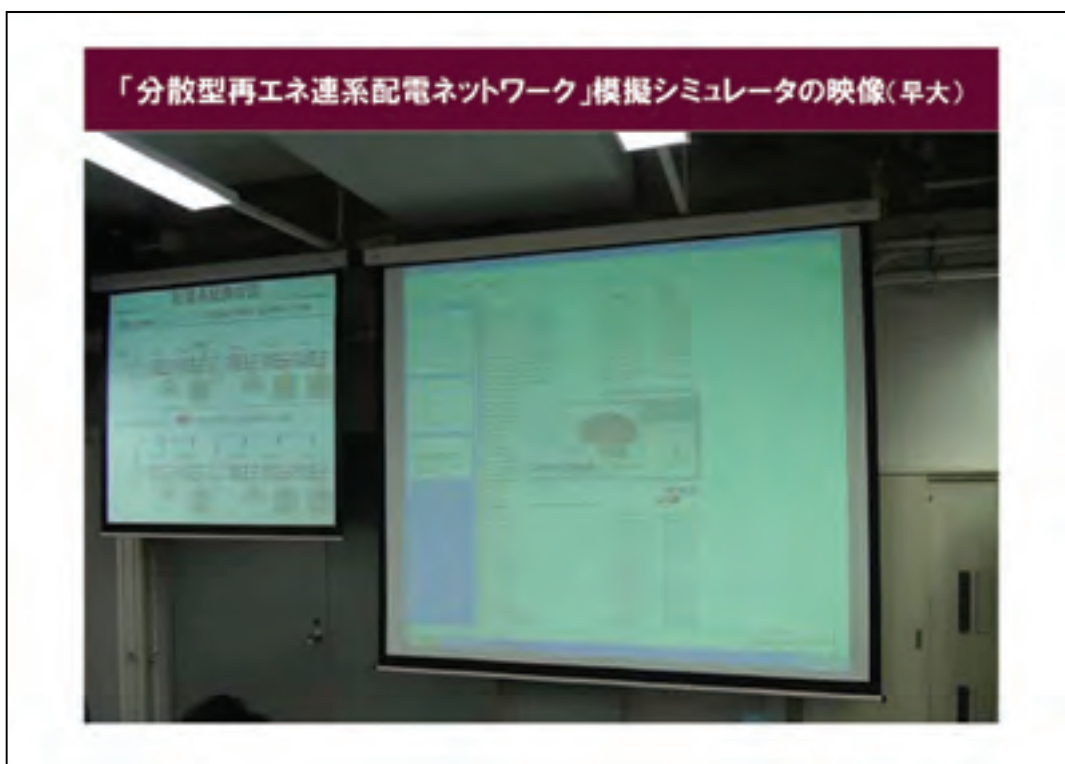


これが実際のイメージです。もうちょっと言うと、これは実験をやりたい人によって目的が結構違いますので、実験の目的に応じて各装置を自在に接続制御して、各地点の電圧・電流データをデジタルに観測できる。

見づらくて申しわけありませんが、さっきの装置がここに入って、こうつながっている。そして、蓄電池とか分散電源を模擬した装置には「こういう波形をあらかじめ入れてください」というデータを与えておきます。太陽光はこういうふうに入れてください、電気を使う側はこういうふうに使うことにしましょう、それを全部パソコンから入れておきます。ここに頭脳の部分があるのですけれども、そこが制御ロジックと思ってください。

そして「用意、スタート」とやると電気がこのネットワークに流れて、ここに線があって電圧に上と下の範囲があるのですが、昔の制御ロジックだと、その中から出ようとする。我々は、それではいけないということで新しい制御ロジックとか考え方をこのパソコンの中に入れます。そうすると、ちょっと出なくなる。では、次はこうしようと。要するに、トライアル・アンド・エラーでいろいろなことができます。

これをもし一般の家で実証実験したら、電圧が 107 ボルトを超えてしまうとクレームが出てしまいますが、大学だったら幾ら超えてもだれにも迷惑をかけませんので、学生にも思いっきり失敗していいよと言いながら、いろいろな先駆的な制御ロジック等にかんがんチャレンジさせています。これが我々の売りだと考えております。



これが模擬シミュレータの映像です。

これがさっき言った送り出しの電圧装置、こちら側に電気が流れていくイメージですね。この **LRT** というのは電圧装置ですが、これは東京電力の配電部と一緒に開発していますので、制御ロジックはそのまま入っていきまして、頭脳だけ我々がパソコンから変えられる仕様になっています。

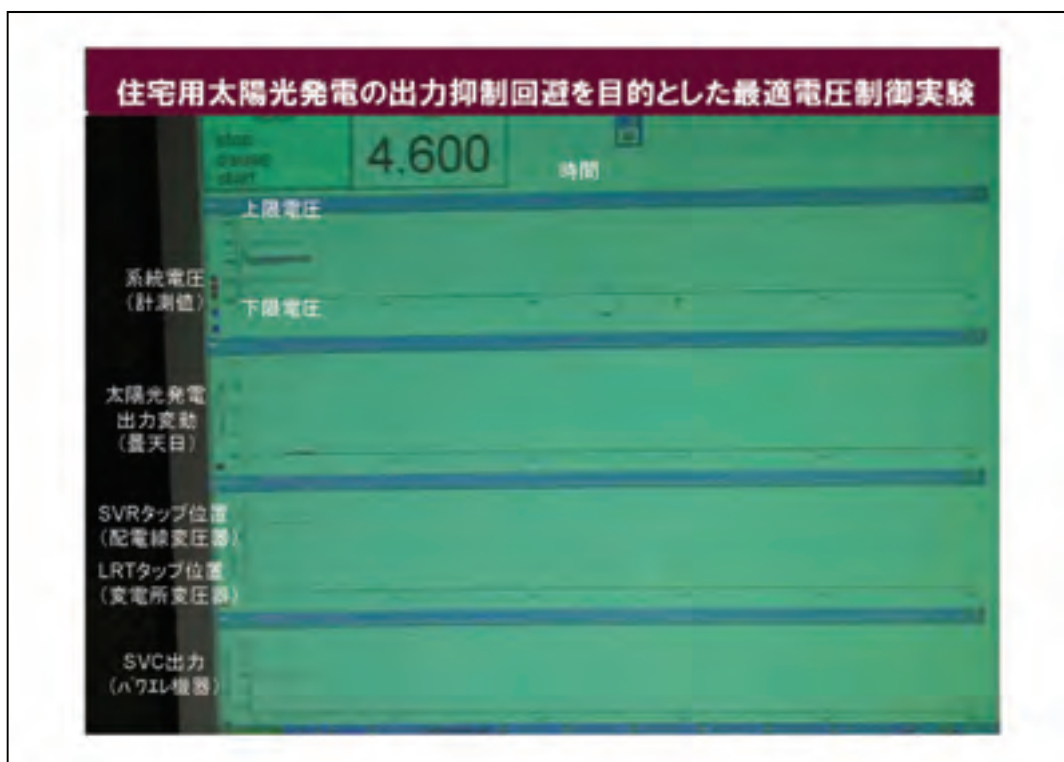
これが線路装置で線がつながってきていまして、ここにインバータ、これが太陽光とか風力を模擬するものになっております。

さらに、これは柱上変圧器です。電柱の上にある変圧器を模擬したもので、そこからまた引き込み線として電氣的な線をずっと引っ張ってまいります。さらにこれを引っ張ってくると、これが家側です。これを見ていただくとわかりますが、住宅用の太陽光発電機とか、蓄電池とか負荷装置を模擬した装置のユニットが入っていて、パソコンから「用意、スタート」と言うとみんなが動きます。その中で自由に制御もかけられるような形になっております。

もう一つ事例を紹介させていただきたいと思います。

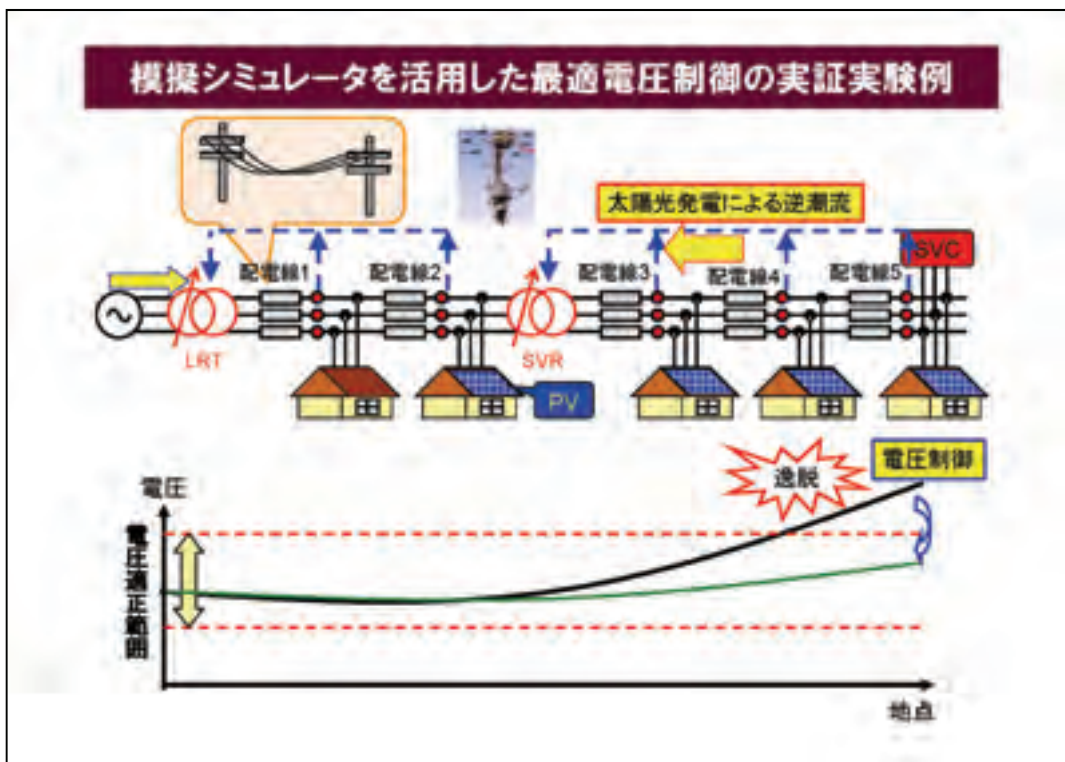
これが先ほどあった電柱で、配電線の線路が電柱みたいにならずとあって、皆さんの家が太陽光をつけてつながっているイメージで考えてください。

これは曇りの日を想定していきまして、今から激しく太陽光の変動が入りますが、この電圧、これは5カ所測っています。ですから5つの波形が揺れるんですが、それがこの2つの電圧制御装置、**LRT** というものと **SVR**、これらは変圧器タップですね。二つの変圧器の装置と一つのパワエレの **SVC**、この3つの装置でお互い情報通信しながら、うまく電圧をおさめる実験の結果を動画でご紹介いたします。



これが電圧です。これは太陽光発電の出力変動が入ってきまして、今、音がしているのは変圧器のタップが変わっているということですね。電圧の高さが変わっています。

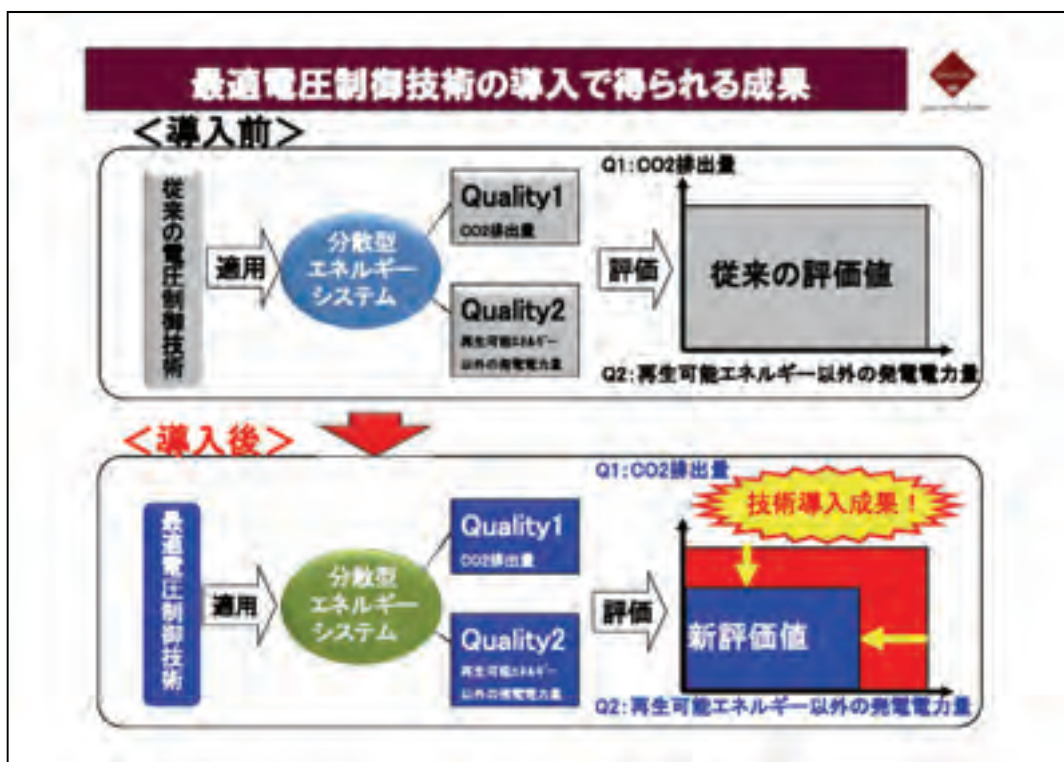
これはさっき言った5カ所の電圧を測っていて、上限値と下限値の間におさまり続けなければいけないんですが、これは群馬県太田市の実際の住宅用太陽光発電出力で、雲がものすごくかかったりして変動が激しい日のデータの動きです。このような日でも、変圧器のタップとパワーエレの機器の電圧制御で、足りないときだけ助けることによって、電圧が上下限範囲内にずっとおさまっているというようなことで、1日の電圧制御をこういうふうにお見せすることができるということでございます。



この実証実験システムのポイントとして、さっきレゴブロックと申し上げたんですが、今の電圧の制御実験をやりたいなと思ったとき、例えばこんなイメージで実験したい、太陽光がたくさん入ったときに電圧を制御するロジックを考えたただけどうまくいかなあというときには、私はフリーデザイン型と言っているんですが、まず、自由に構成要素をチョイスで

きます。要するに、各装置がそれぞれ配電線とか制御装置とか住宅を模擬していますので、自由に持ってこられる。あと、それらを電氣的にも情報的にも自由に接続できて、さらにそれらを自由にテストできるということで考えているイメージで、これをこういうふうに置いて、もう情報通信はつながっていますので線路装置がつながって、どこを測ってどこを制御するかはつなげた段階でもうコンピュータが認識しますので、その中で、新しい制御ロジックでうまくいくか、最適化技術がうまくいくかといったことができるということでございます。

あと、ここでは中立的な学の拠点として、使いたい人だれもが使えるということを私は非常に大事にしていまして、そういう考え方で、実は東大とか徳島大とか福井大とか、いろいろな先生とこれを使っていろいろな研究をさせていただいております。



例えば、電圧制御をさっきの効果のイメージで出しますと、もともと CO₂とか再生可能エネルギー以外の発電電力量を小さくすれば再生可能エネルギーは小さくなるので、最小化のほうで想像しやすいのではと思ひまして、これは再生可能以外の発電電力量で、これを減らせば太陽光がいっぱい入るイメージなんです。最適電圧制御が入ることによって太陽光の出力に抑制がかからなくなるわけですね。かからなくなった分だけ CO₂ は削減できますし、再生可能エネルギー以外の発電電力量が減っていったら再生可能エネルギーがたくさん入っていくということで、電圧制御技術の導入成果もこのように目で見える形でアプライできるかなと思っております。



最後に、計算機シミュレーションと模擬シミュレータを用いた結果のイメージです。

さっき予測と制御の話が出てきたと思いますが、太陽光の予測とか自然エネルギーの予測はこれから絶対必要になります。その予測に基づいて、制御という2つ、トスとアタックだと私は思っているんですが、予測に基づいて制御する、そして予測が外れたら、それに対し

てまた制御で補正をかけるといったシステム技術が必要になってくるのが再生可能エネルギーの世界。

ネットワークも同じですね。再生可能エネルギーはここだけで閉じているわけではなくて、発電した電気とか使った電気は必ずネットワークを介してみんなに面積的に広がるので、そうすると、そのネットワークの中に電気がどれだけ流れるかという電力潮流の予測、線に必要以上に電気が流れますと熱で切れますので、停電になってしまいますね。こういう話は意外と皆さん理解していない場合が多いんですが、電気の流れの制御というのは結構大事なんです。電線は水道管と同じで、必要以上に電気が流れると切れて事故になりますので。

あと、その中の電圧制御とか周波数制御があると思います。

一方で、先ほどから出ていますが、需要家側の制御ですね。HEMSとか言われて、要は家自身が発電所と同じになってきます。太陽光パネルで発電して、それを蓄電池にためたり電気自動車にためたり、ヒートポンプで電気でお湯を沸かす時間をコントロールする。ですから、ここでもコントロールとか予測する必要があるということで、そこにも技術がある。

ですから、それぞれの技術で開発して、そこをさらに協調する制御技術があると思っておりまして、再生可能エネルギーとネットワークと需要家側の三位一体と考えると一番わかりやすいんですが、三位一体の最適な協調制御技術体系が必要である。今、これは全然ないの

で。

ここをちゃんと実現するときに、さっき申し上げました面的な広がり、ネットワーク全体の評価をするときに、予測モデルとか制御モデルのシミュレーションは要ります。でも、シミュレーションだけだとリアルワールドがはっきりわからないので、本当に電圧がちゃんとおさまるのか、本当に制御のおくれとか誤差は大丈夫なのか、予測誤差とか制御誤差がありますよと言われたときに、それも踏まえて、これの上でさっき言った頭脳の部分、制御のロジックの部分を実証する必要があるのです。ですから、模擬シミュレータでリアルワールドでの効果を確認して、それをシミュレーションのモデルに入れ込んで計算して価値を出すという意味で、低炭素、高信頼、高品質、高効率、そういうネットワークのデザインが必要ではないかと思っております。

＜質疑応答＞

○木村

制御ロジックというのがよくわからなかったのですが、これは東京電力等がやっている従来方式、AVR とかああいうものを組み込んで、パラメータだけ試行錯誤的に変えているという理解でよろしいですか。

○林

そうです。従来というのは、今まさに電力会社がやっているローカル、古い制御ロジックです。それは自律型のコントロールで、自分の制御装置を置いた所の電流しか見ないで、自分で勝手にコントロールしますが、さっき見ていただいたのは他の装置と通信線で協調しながら、あと、今は開閉器にセンサーがついていますので、そこの情報を吸い上げて、電圧の推定をしながらコントロールをかけるという制御をする。これは電力会社ではまだ全然使われていませんが、これから必要だと考えています。

○木村

各家庭を模擬した装置が置かれていましたが、実際に入れる風力や日射のデータは、どの家庭も一緒ですか。

○林

どんなパターンにもできますが、シミュレーションでは何百軒か分を束ねて、変えています。天候は束ねていますが、一軒一軒の電圧はちゃんと監視しているので、家にいるかいなといった各家の事情や蓄電池などの機器のコントロールも入れられます。

ただし、模擬シミュレータでは今は 6 軒分しかありませんので、増やしたいと考えています。装置 1 つで 400～500 万円かかってしまうので、なかなか簡単ではありませんが。

○木村

シミュレーションで完全にバーチャルに行うのと、実物の模擬シミュレータを使うのとでは、どこが違うのでしょうか。

○林

模擬シミュレータというのは、中にタップなどの機械的なものが全部入っていますから、アナログのシミュレータだと思ってください。実際の制御の動き、実用性の検証ができます。

また、模擬シミュレータのよさをもう一つ申し上げますと、外から好きに波形を入れられるというのがかなり大事です。これからライフスタイルとかいろいろなもの、あと場所によって発電等が違いますから、無限のケースがあるときにパソコンから模擬の、例えばさっきの太陽光の模擬装置、あれは無限の組み合わせというか、どんな波形でも秒オーダーとかミリセックオーダーで入れられますので、そのときに新しい制御がうまくいくかということで意味があると思っております。

○三平

需要家のところも含めた形の協調制御技術が非常に大切で、それを理論化していかななくてはならないというのはよくわかりますが、そのときに、今の需要家はその協調制御に参画してくれるのでしょうか。

○林

29日に行われたエネルギー環境会議では、5年間で総需要家の80%にスマートメータを入れなさいという話が出ていました。私は経済産業省の方のスマートメータ制度検討会の座長もしていますが、各電力会社は10年間にスマートメータを最低限入れるという話になっています。

今まで電気料金というのは日本ではフラットでしたが、アメリカ等ではデマンドレスポンスで、価格が2時間ごとぐらいに変わっていくんですね。一番電気が必要なときに、今まで発電所のためにやっていたんですが、今、アメリカ等ではクリティカルピークプライシングと言って、一番消費電力抑制の必要性の高いときだけ電気代を高く、メニューで見せています。だから、そういうものが見える化されて、各需要家が見えるようになってくると考えていただければいいと思います。

それは後の内田先生のお話にもつながるかもしれませんが、価格でデマンド側、需要家側が誘導されるという世界が私は結構すぐ来るのではと感じております。

○三平

基本的には電気を買うということで、蓄電池などをうまく使って安いときに電気をたくさん買って、高いときには買わないというスタイルはわかるんですが、私が一番気になったのは、たしか太陽光発電というのは、売電するときには蓄電池にためてはいけないという話を聞いたことがあるのですね。

○林

おっしゃるとおりです。

○三平

だとすると、太陽光パネルをつけた人は必ずその時点で売らなければいけないので、太陽光が入った時点で、需要家というのは太陽光のエネルギーを売るという立場で考えると完全に利己的になってしまっていて、協調制御の枠組みから外れてしまうような気がするんですね。

藤田先生からも蓄電池を使うという話がありましたが、システム制御の視点からみれば、そういうところでちゃんと平滑化してあげるのが当たり前で、例えば政策的に考えるならば、太陽光パネルをつけるだけではなくて蓄電池も入れてあげて、そのセットに対して何かしらの補助をしてあげるようにしないと先生の言われる協調制御はできないような気がします。今の政策は全然違いますから、今の政策のまま太陽光パネルが普及してしまうと、協調制御というものをつくろうとするときに足かせになるような気がするので、そういう観点も含めてお伺いしたいんですが。

○林

先生のおっしゃるとおり、実は今、キロワットアワー42円で買い取っているんですが、これは10年間でだんだん下がってきて、電力会社は一応今後も買い取るということで、太陽光は入ると思うんですが、私が言う協調の意味は、さっき言った間接的な情報で、この人たちが間接的なつながりを持った上で動くというイメージが私の中にあります。

先生がおっしゃるとおり、太陽光は今は高く売れますので売りますが、もしかしたら20年後、30年後は買ってくれなくなる。世の中にもう十分浸透したとなると多分、蓄電池に自分でためて自分で使うという自立的なモードになる。そうすると、今日売るか、ためるか云々ということも出てくるのではないかなと思ってはおります。

すみません、ちょっと答えになっていないかもしれませんが。

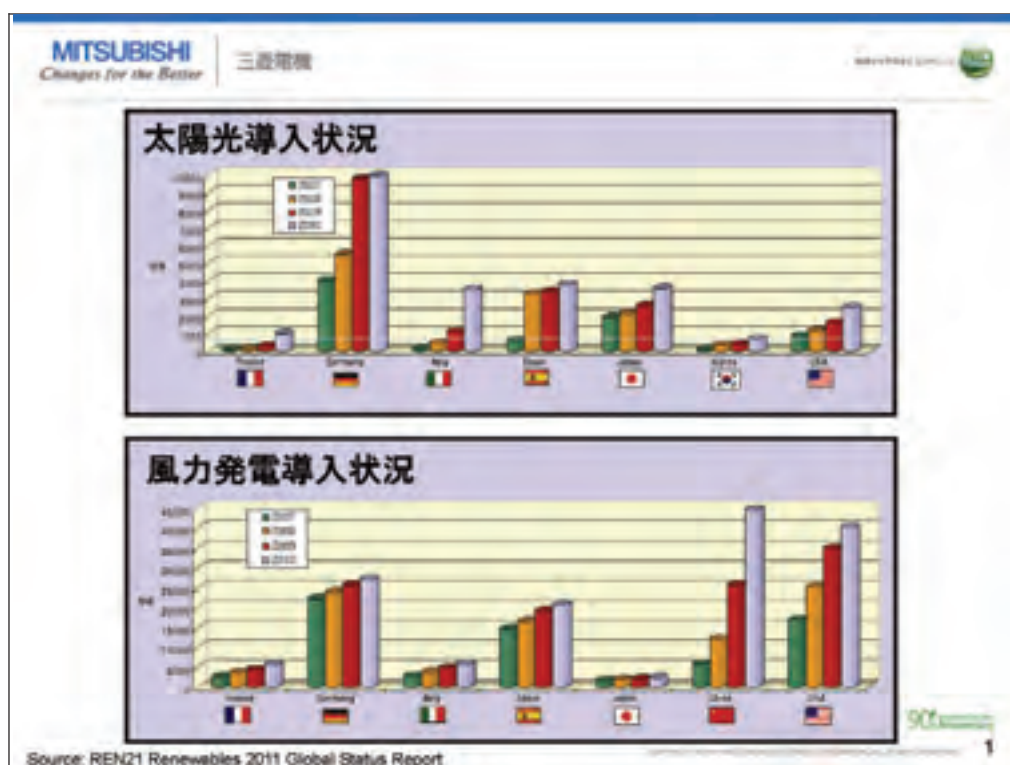
○三平

確かにそうなのですが、再生可能エネルギーをここ2〜3年ですごく普及しなければいけなくなったときに、この2〜3年は太陽電池そのものを全部買わなければいけないというのが何か問題になりそうな気がしたので、コメントさせていただきました。どうもありがとうございました。

○林

先生がおっしゃるとおり利己的な話で、本当にここがすべてとは私も考えていません。多分、利己的な動きがたくさん出てくるとは思っております。

6. 6 マルタ マルミローリ先生 ご講演記録



スマートグリッドという概念が出てからいろいろな研究が増え、IEEE も特別なトランザクションをつくるまでになりましたが、15 年前の市場はどこへ行ってしまったかを感じています。

前のプレゼンテーションでもありましたが、まだアメリカの場合は、スマートグリッドの中でマーケットが小さく左上にあるのですが、日本はマーケットのイメージは全然できていない状況です。本当にまだ考えているだけで、ソリューションやこれからどう進むべきかという方針まではいたっていませんので簡単なプレゼンテーションとなりますが、必要なポイントを説明させていただきたいと思います。

ご承知のように、新エネが増えてきています。太陽光については、特にドイツとか日本、イタリア、スペインがどんどん増えてまして、今は数ギガワットレベルに増えていきます。風力はもっともっと多くなっており、特にドイツとかアメリカは物すごい量で、これは一般の電源、市場に参加する電源になっています。

 		
種別	サイズ	コスト(\$/kWh)
水力(大)	10MW～	0.03-0.05
水力(小)	～10MW	0.05-0.12
風力(on-shore)	1.5-3.5 MW	0.05-0.09
風力(off-shore)	1.5-5 MW	0.1-0.2
太陽光(屋根)	2-5kWp	0.17-0.34
太陽光(メガ)	200kW-	0.15-0.30
バイオマス	1-20MW	0.05-0.12

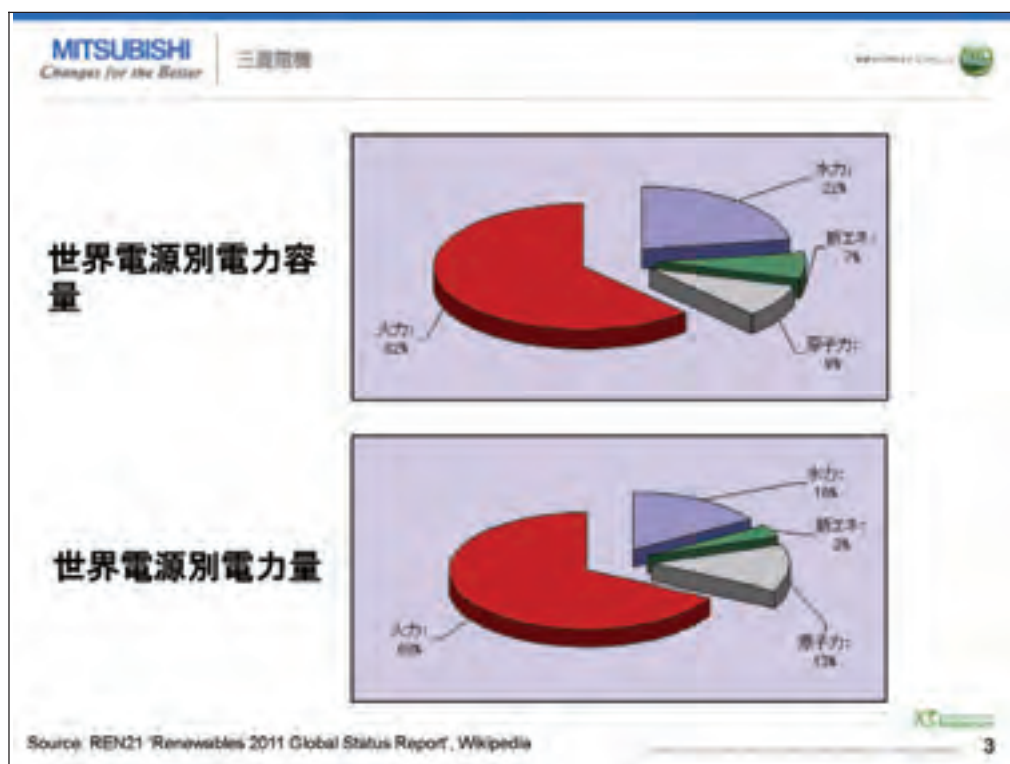
USA卸電力市場価格平均:0.0982

Source: REN21 Renewables 2011 Global Status Report, EIA State Electricity Profiles 2009

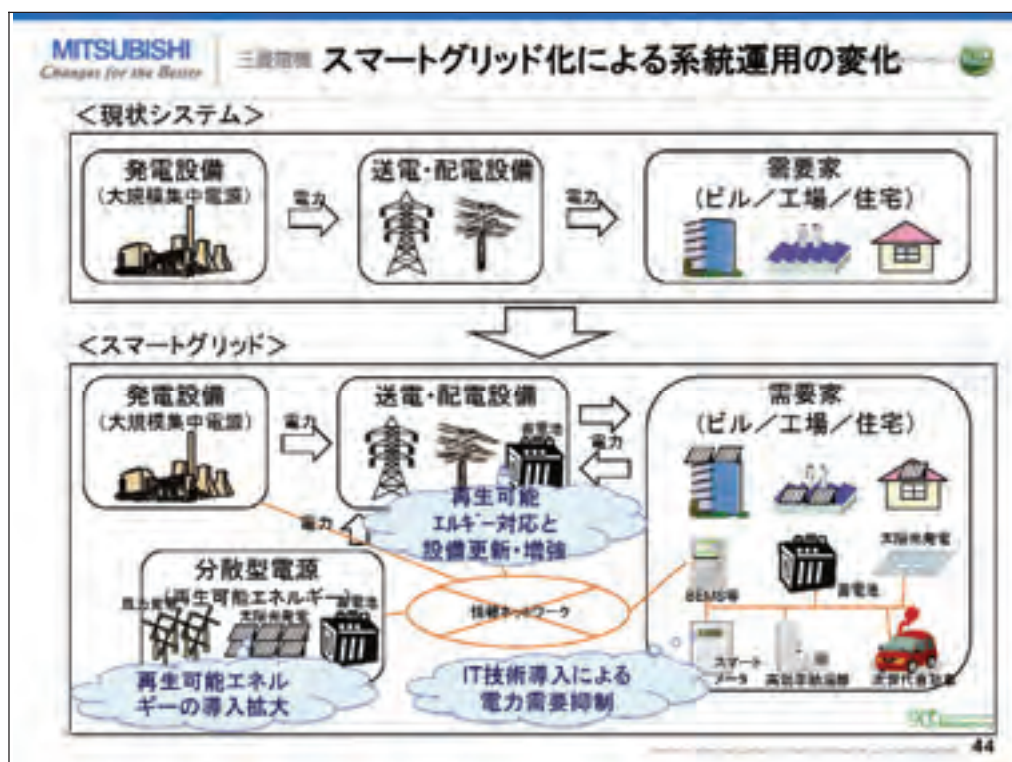
ただし、1kWhのコストをみると、もちろん場所や使っている技術によって変わりますが、太陽光は今一番安くて15セントとか17セントレベルです。風力は、オンショアだと比較的安く5～10セントぐらいの間ですが、オフショアではもっと高くなります。

アメリカの市場価格では、これはいろいろな州とかいろいろな組み合わせがありますが、平均としては10セントいきません。風力や太陽光は、このままの価格では市場に入れることはできない。

今のところはまだフィード・イン・タリフなどいろいろなインセンティブがありますが、いつまでもそんな形で市場の外からお金を入れることは不可能だと思います。市場価格が上がるか技術が安くなるか、一つのクロスポイントになると考えていますので、必ず新エネの部分も市場に参加するようになると思います。



現在のところ、市場に入れることをそんなに心配することはありませんが、電力容量では現在 7%、まあまあの比率ですが、電力量では 3%しかありません。大体的場合、市場はキロワットアワーで決めるので、3%の部分が価格にどこまで影響するかを含めて、まだ分析しにくいと思います。



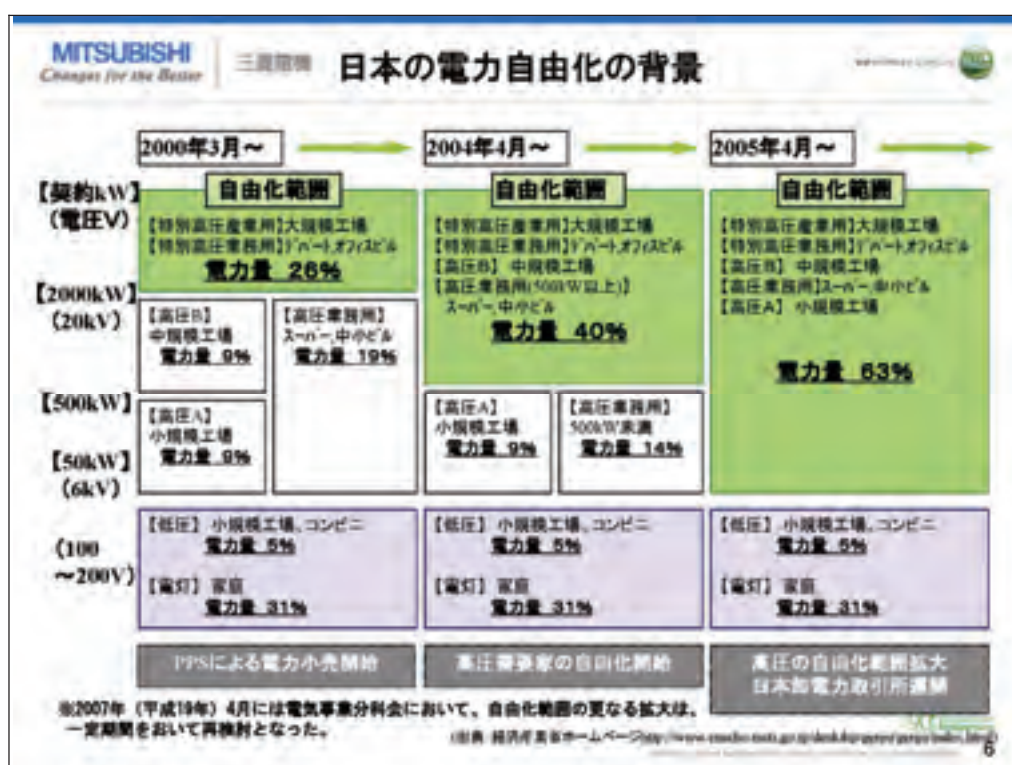
ここまでの講演で同じ話が何度もありましたが、この新エネの電源が入ることにより、系統運用がどう変わるのか。分散的に発電機が入ると、需要家側の動きが変わることが考えられます。

スマートグリッドというのは、この分散型電源にちゃんと対応できる、系統がダウンしないことと、ITを使ってデマンド側も含めて一つの事業として参加できるようなことを考えています。

 三菱電機 電力システムにおける将来の課題 		
課題	原因	対策案
1 周波数変動 	瞬時の需要と発電のアンバランスによる	・太陽光・風力発電の出力変動抑制 ・揚水発電高度化(可变速化) ・蓄電池の設置
2 余剰電力 	低負荷期における需要を上回る太陽光等の一斉発電による	・蓄電池の設置 ・太陽光・風力発電の出力抑制 ・需要側対策(需要側電気利用拡大)
3 配電線の電圧変動 	配電線に連系された多数の太陽光発電の逆潮流による	・変圧器の分割 ・電圧調整器の設置 ・太陽光発電の出力制御

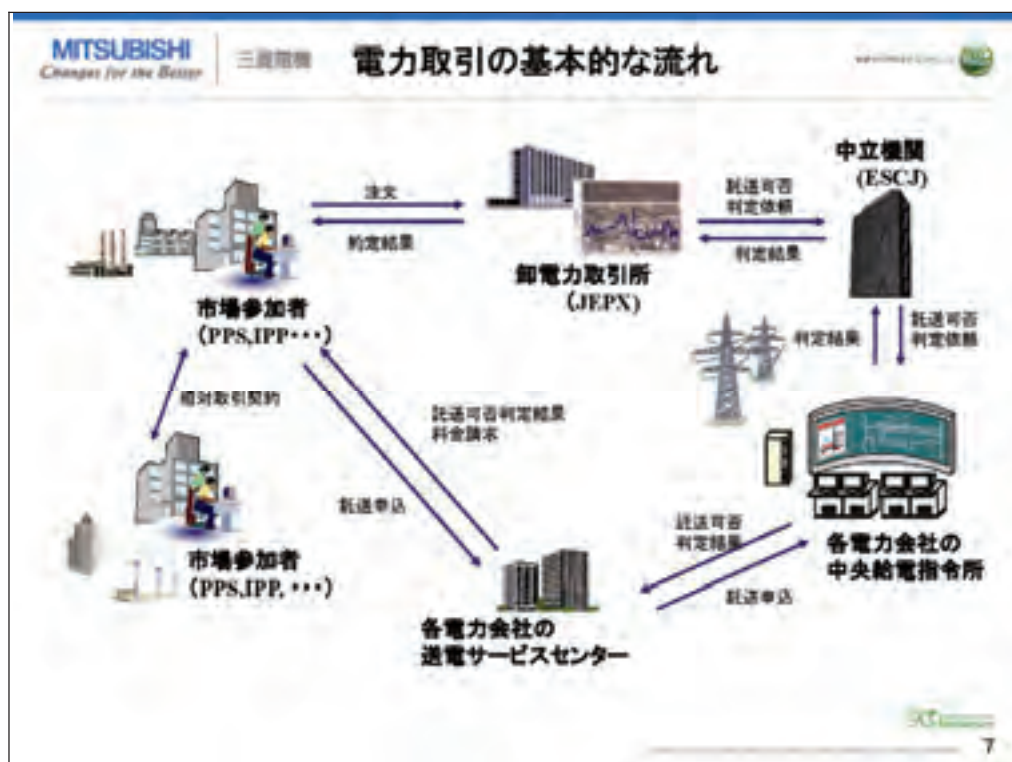
課題については、これも他の方から説明がありましたが、新エネの場合、天気によって変わりますので、振れていたり、周波数に影響があったり、要らないときに余剰が出たり、あとは、分散型というのはもともと電源を考えていないようなところをつなげているので、電圧の問題がある。この制約の上に、本当に市場に参加するべきかどうかという一つの課題があります。

特に、周波数の関係ですね。これから市場の説明をしますが、1 日前とか 1 時間前の市場に、次の 1 時間で幾らぐらい電気を出せるかわからないようなものが市場に参加すべきかどうか大きな課題になると思います。



皆さんよくご存じと思いますが、日本の場合、2000年から自由化が進んでいまして、初めは大口需要家だけが自由に電気を買えることになって、2004年、2005年にはどんどんマーケットシェアを開け、現在キロワットアワーとしては65%ぐらいが、市場で自由に電気を買えることになっています。

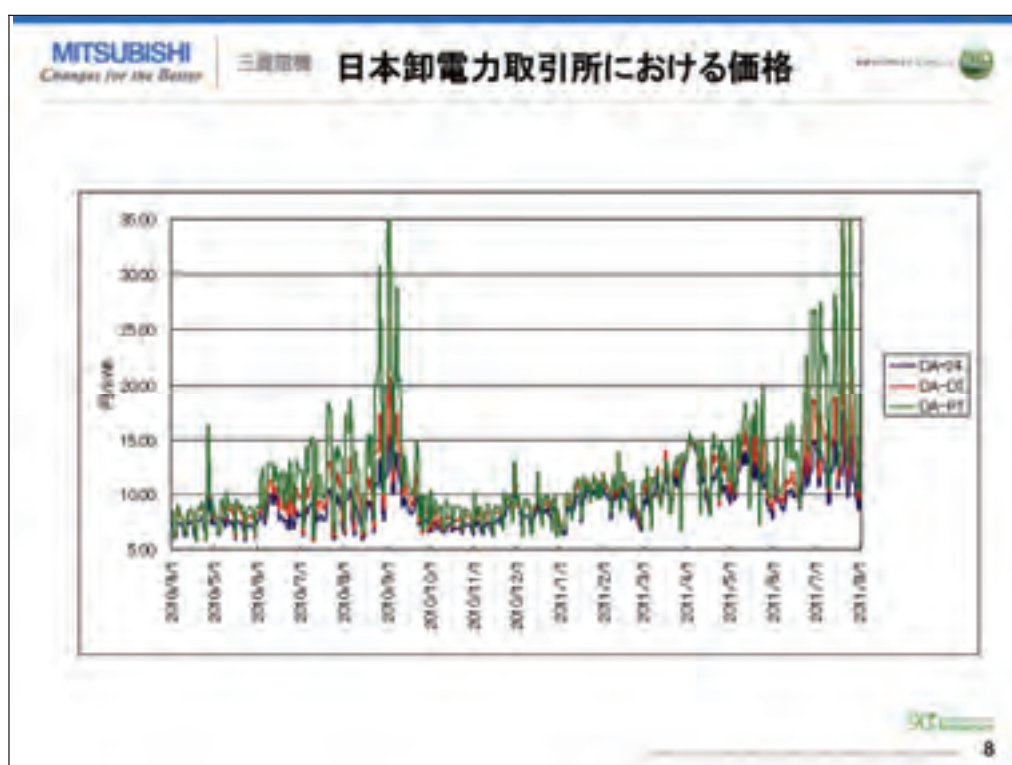
どこから買うかという点、まだ日本ではそれほど選択肢がありませんが、電力会社以外にPPSという会社から取引できるようになります。



では、この PPS はどこから電気を買うのか、どんな形で電気をつくるのかというと、2005 年から、現在も運用しているスキームで取引所ができています。市場の参加者は、現在は PPS、IPP と電力会社で相対で取引、もしくは取引所の取引で電気を調達、もしくは電気を売ることができます。電気の場合、バーチャルとかトラックで渡すことができないので、送電線を必ず使わないといけないので、送電線を管理する ESCJ で電力会社単位の管理と、中給とデータのやりとりを行うことになります。

日本のルールでは、30 分の間でつくった電気と使った電気が同じにならないといけない、もしくは、取引所に売った電気は契約した電気と本当につくった電気が同じにならないといけないので、インバランスずれの部分で各電力会社を計測して、インバランスの情報によってペナルティの形でお金のやりとりがされます。

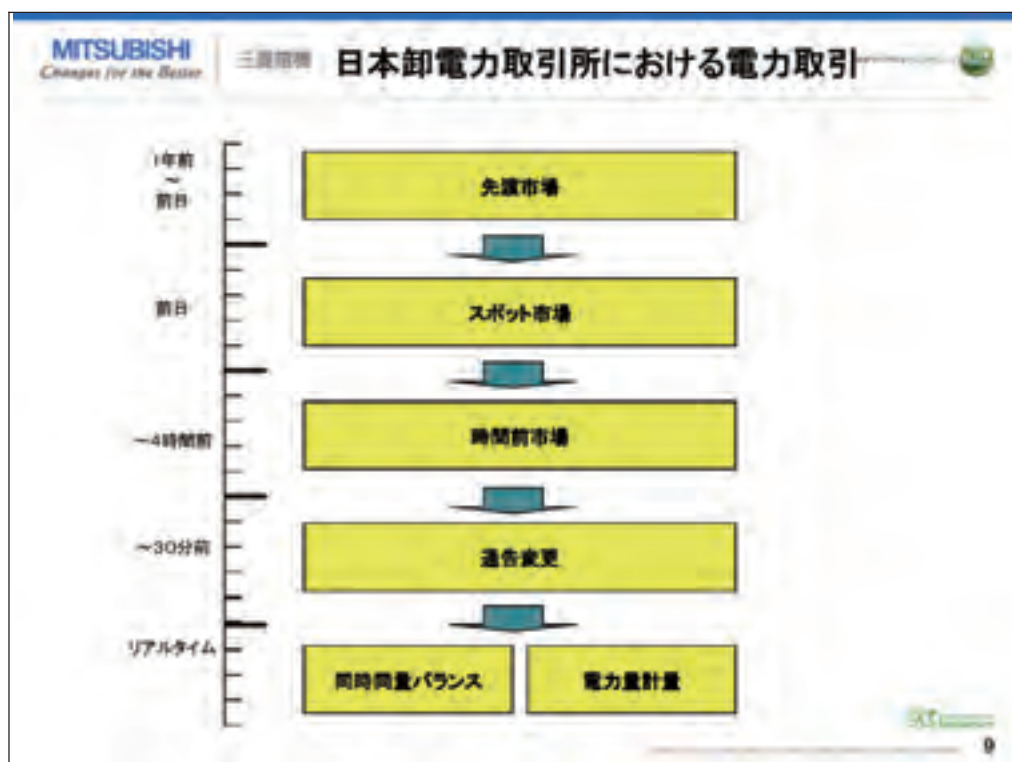
このスキームの中に、これから新エネの事業者、新エネをつくる形はどんな形で入ればいいのか。もし今と同じルールで乗っていったらいろいろな課題があって、特に予測しにくい、予測設定もずれる可能性があるので、現在と同じペナルティで同じ請求をもらえば、多分、会社としてすぐ潰れることになるので、全体のシステムとして、市場としては再検討が必要になると思います。



これは、8月1日月曜日までの日本の取引所の価格の振れ幅です。ここからも、十何セントぐらいの新エネのことで、入りにくいことは判断できます。

特に、ここは3月の地震後のエネルギー不足で価格がどんどん高くなっていたんですが、秋と春は価格が大分安い。この状態で新エネが参加しても、全然ペインできない。

日本だけではなくて世界の市場、電気だけではなくエネルギー関係の市場は振れやすいので、もしこの中にもっと振れやすい新エネが入ったらこの価格は大分振れることが想定できますが、投資する方、インベスティメントする方にとって振れる市場は不安定な感じがするので、何の形で市場が動くのか、分析と研究が必要と考えています。



これは日本の取引の簡単な説明になりますが、実は世界で似たようなスキームになっています。

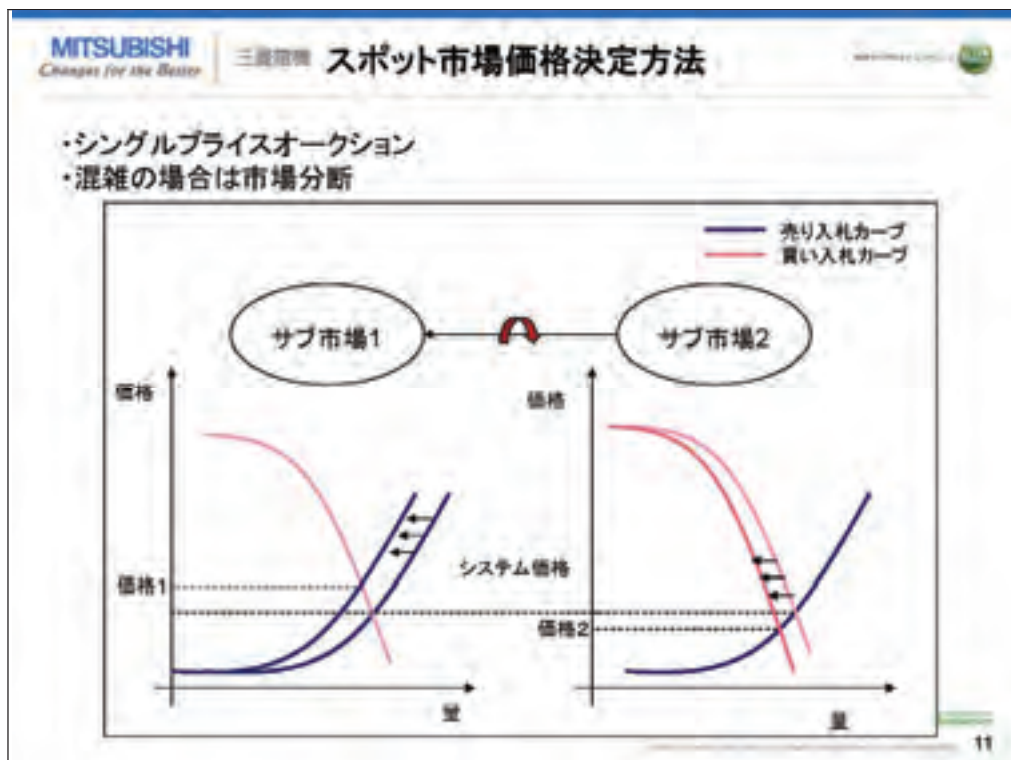
大体は長いスパンで先渡、1年後とか3カ月後は幾らぐらいで何キロワットアワーぐらいという30分単位の取引を決める。この先渡というか、長いスパンのものはどうしてやるかというと、価格を安定させるためですね。ぎりぎりになって安くしか売れなかったというようなことにしたくないので、あらかじめ、リスクを少なくするために売ることになる。

あと、世界のどこでもそうですが、市場的に一番重要になるのはスポット、1日前の価格です。もともと電力会社は1日前にトータルの計画を決めて、晴れのベースで運用するので、新エネに関して、前にお話があった予測に関しては多分ここがポイントになります。1日前にきちんと予測できて予測の差が少なくなれば、簡単に新エネもスポット市場に参加できると考えます。

もちろん、スポットから1日たつといろいろな状況が変わるので、変更する可能性もあるので、時間前市場と、あと本当にぎりぎりは通告変更までの制度がありますので、この間で複数取引、同じ電気は売ってもう一回買い戻すことも含めてできるので、この中で新エネも運用しないといけないと考えます。

 三井物産 日本卸電力取引所における電力取引					
市場	商品	入札方法	約定方法	清算方法	備考
スポット	○当日の電気 ○30分毎48商品	○受付時間8:30-9:30 ○入札形式(1商品12/7) ・価格と量(15種)	○オークション方式 ・量-価格曲線上の交点で約定価格を決定 ・連係線に連続がある場合市場分断	○取引所清算 ・売買代金 ・売買手数料 ・常徴代金	・当日の余剰・不足電力の調整に適用。
先渡 (定型)	○1年間の電力 ○月間/週間 ・[24時間型] ・[昼間型] (8:00-22:00一定)	○取引時間 ・前場10:00-12:00 ・後場13:00-15:00 ○入札形式(1商品12/7) ・価格、量、履行条件	○ゼラハ方式 ・入札時刻前、価格優先で組合せ ・与信条件、連係線送電可否を確認	○取引所清算 ・売買手数料 ○当事者間清算 ・売買代金 ・常徴代金	・スポット取引のリスクヘッジに適用。
グリーン電力	○グリーン電力 ・CO2非排出電気 ・通常の電気+CDM ・実行済みCDM	○入札形式 ・申込書を取引所へ送付 ・指示紙へ提示	○指示紙方式 ・応札を取引所へ連絡 ・取引所が応札書を決定	○取引所清算 ・売買手数料 ・常徴代金	・グリーン電力付加価値付与。 ・EJ/17より試行運用開始。
先渡 (市場)	○1年間の電力 ○月間/週間 ・[24時間型] ・[昼間型] (8:00-22:00一定)	○取引時間 ・前場10:00-12:00 ・後場13:00-15:00 ○入札形式(1商品12/7) ・価格、量	○ゼラハ方式 ・入札時刻前、価格優先で組合せ	○取引所清算 ・手数料代金 ・スポット差料金	・スポット取引のリスクヘッジ ・実運はスポット ・2009年4月運用開始
時間前	○当日の電気 ・30分毎48商品 ・4時間前に取引	○取引時間(入札締め) 1場:9:00, 2場:13:00, 3場:17:00 ○入札形式(1商品12/7) ・価格と量	○オークション方式	○取引所清算 スポット取引と同様	・当日の事故時対応 ・2009年9月末運用開始

10



11

スライド 10 は、今の取引所の詳細な商品と取引方法を書いたものですが、参考として見てもらえればと思います。

もう一つの大きい課題をテーマとして挙げたいと思います。

新エネの場合、特に風力の場合はロケーションがすごく重要になるので、系統全体でどこ

でも簡単に入れるわけではありません。もちろん風がある所では風力が入りますが、風がある所というのは、ある意味で偏ってしまうんですね。偏ってしまった場合は送電線の使い方が大きい課題になります。

例えばドイツの例を見ると、当たり前ですが全部北のほう、海のほうにありまして、負荷は全部南のほうになりますので、では、ある送電線をだれが使えばいいか、幾らで借りればいいのかといったことが大きい課題になります。市場が始まったから送電権利とか送電の使い方、送電価格には大きなテーマがあるので、もう一回、新エネのことを含めて再検討が必要だと思います。

日本の市場の場合、ドイツの市場と近いやり方をしています。例えば2つのエリアがあって、エリアの間に送電線があります。だけれども、送電線には制約がある。前のプレゼンテーションでは売る側と買う側のクロスポイントが変わったんですが、もともとの、これは買うほう、青い線が売るほうのカーブになります。クロスしているところは市場価格と取引量になります。

ただし、制約があったときに、もらうエリアについてはもらえる電気が少なくなるので、売る、買うは高くなります。同じ量でももっと価格が高くなります。売るエリアから見たら買う量は少なくなって売れる量も少なくなりますので、結果的に、もらえないエリアとしては価格が高くなって、売れないエリアから見たら価格が安くなる、こんな形で送電線管理を今までやっていたんですが、新エネが増えた場合でも同じ形でいいかどうかを含めて、検討が必要だと思います。

MITSUBISHI 三菱商事 **先渡の価格決定方法**

・価格優先、時間優先、約定単位で価格決定
・混雑の場合はエリア間の取引を禁止する

買い入札: 20MW, 8.5円

売り		価格	買い	
制約あり	制約なし		制約なし	制約あり
4		9.77		
10	23	9.01		
22	20	8.50		23
		8.00	2	

混雑しない場合

売り		価格	買い	
制約あり	制約なし		制約なし	制約あり
4		9.77		
10	23	9.01		
22	20	8.50		23
		8.00	2	

20MW約定、価格8.5円

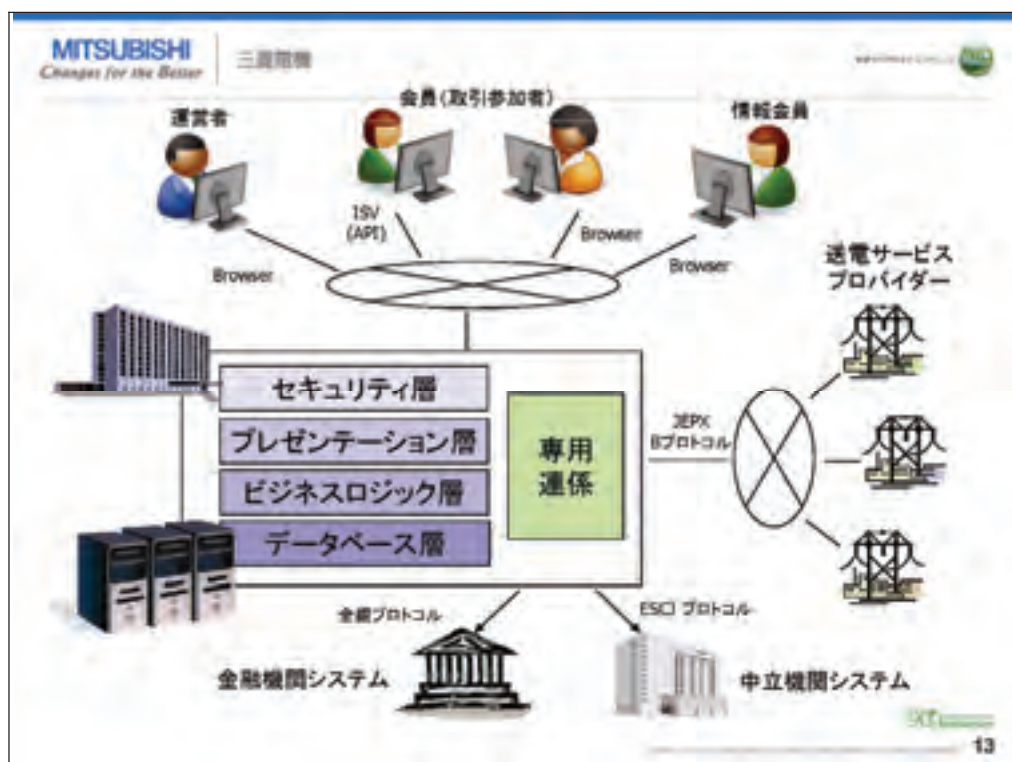
混雑の場合

売り		価格	買い	
制約あり	制約なし		制約なし	制約あり
4		9.77		
10	23	9.01		
22	40	8.50		43
		8.00	2	

12

似たような、先渡の場合ですね。これはスポットで、みんな同時に入札している間ですが、先渡の場合、普通は結構ナガイになるので、ずっと入札しながら場に出して、マッチングできる人たちがいればマッチングする。例えばここは複数価格、円で考えてもらえばいいと思いますが、8円、8.5円、9円といろいろな入札があります。そして売る側で、8.5円は20売りたい、23売りたいと。ただし、エリアとエリアの中に制約がある人もいるので、こうなります。

では、だれか新しい人が来て、8.5円というのはいい価格ですから電気を買いたいと20メガワット入札したときに、もし送電線がいっぱいでなければ買えるので大丈夫ですが、送電線がいっぱいになったときには買えない状態になるので、結局は場に乗るか9円で買うかしかないのです。同じ形で、先渡は送電線の制約で価格がずれる、エリアによって価格が変わることがあります。



最後に、JEPX、日本の卸取引所のシステムをご紹介します。これは私が開発したのですが、今度、新エネの型を含めて、参加する人たちが増えることを考えています。トータルスキームとしては置き換わりはないと思いますが、もともとデータベース、ビジネスロジックとか、皆さんに、GOIとか入札できるようなところとセキュリティの部分がメインになりますが、送電線プロバイダ、送電線を幾ら使えるかとか、ルール系のところとか、あと、参加できる人が増えると変わることが考えられるので、システムのにも影響がある。今と同じシステムでいいかどうかは研究が必要だと思います。

プレゼンテーションとしてはこれで終わりますが、1件だけテーマというか、ディスカッションのポイントにしたいと思います。

皆さんのプレゼンテーションの中でバッテリーの話が結構出ましたが、電気の場合、今つくった電気をバッテリーに入れて後で使うと、同じ電気は同じ電気ですが、実は、入れるだけで30%ぐらい損をします。例えば、魚は今の市場で買って今、食べたほうがいいですが、冷凍してどこかへ持っていてもまた食べられる。ただし、ちょっと味が変わりますね。電気は変わりませんが、30%なくなる部分はCO₂、コスト、いろいろな影響があるので、私から見たら、いい市場といい動き、いい価格で出せるようになれば、できるだけバッテリーを使わずに、電気をつくる時にみんな電気を使う、電気をつくれないうきには使えなくていいようになれば一番スマートグリッドではないかと思っています。

＜質疑応答＞

○飯野

東芝の飯野です。

今の取引の仕組みが非常によくわかるプレゼンをありがとうございました。

問題は、これから再生可能エネルギーが増えていって、こういった市場が変わっていくであろうという話ですが、その中で、今、スマートグリッドとしては新しい取引の価値、すなわちデマンドレスポンスというものが出てきています。当然デマンドレスポンスにはインセンティブがセットになっていて、インセンティブがないと需要家も動いてくれないだろう。ある意味、これも取引の一種であると考えられるのかなと思っております。

そういう意味で、日本の市場の場合、今はキロワットアワーの取引ですが、そこからデマンドレスポンスでさらに変化分とか、あるいは余力というものを新しい商品にしていくとか、そういった多様な取引の形態が出てくるのではないかと思います、そのあたりはいかがでしょうか。

○マルミローリ

市場に参加するのはすごく難しいと思いますが、一般的に、もし本当に参加するのであれば自動的にデマンドレスポンスになります。安ければいっぱい使う、安くなければ使わない。今までは、電気はいつでも供給しますから、需要側は何も考えず好きなだけ使っていていいですよ、という考え方でしたから、余りデマンドレスポンス方法で動いてほしくなかったわけですね。今年もピークを更新しました、このぐらいみんなに電気を使ってもらいましたという、電力システムの運用をする側にとって、ピークの高さはある意味自慢になっていました。

今後は変わります。需要側でも、普通の買い物と同じように、電気が高ければ洗濯をやめて明日にまわしたりするようになるでしょうし、また、これから EV が増えれば、どうせ車が動いているのは 1 日のうち 30 分とか 40 分ぐらいの限られた時間ですから、安い時間帯に充電するでしょう。価格があればデマンドレスポンスになると思います。

ポイントは、情報をどのように渡すかです。今、例えばドルとか株だったらテレビで見れば 1 日 1 回ぐらいデータがありますが、電気は、1 日じゅうずっと同じ価格では意味がなくなりますから、やはり 30 分とか 15 分でしないと駄目でしょうか。情報をどのぐらい早く、どのぐらいの間隔でわたすか、人間は完璧にわからなくても、少しわかれば自動的に動くのがポイントになると思います。

商品については、もちろん予備力とかいろいろなお話がありますが、予測がきれいにできればニーズも少なくなるのではないかと。価格だけで進めると思います。

○内田

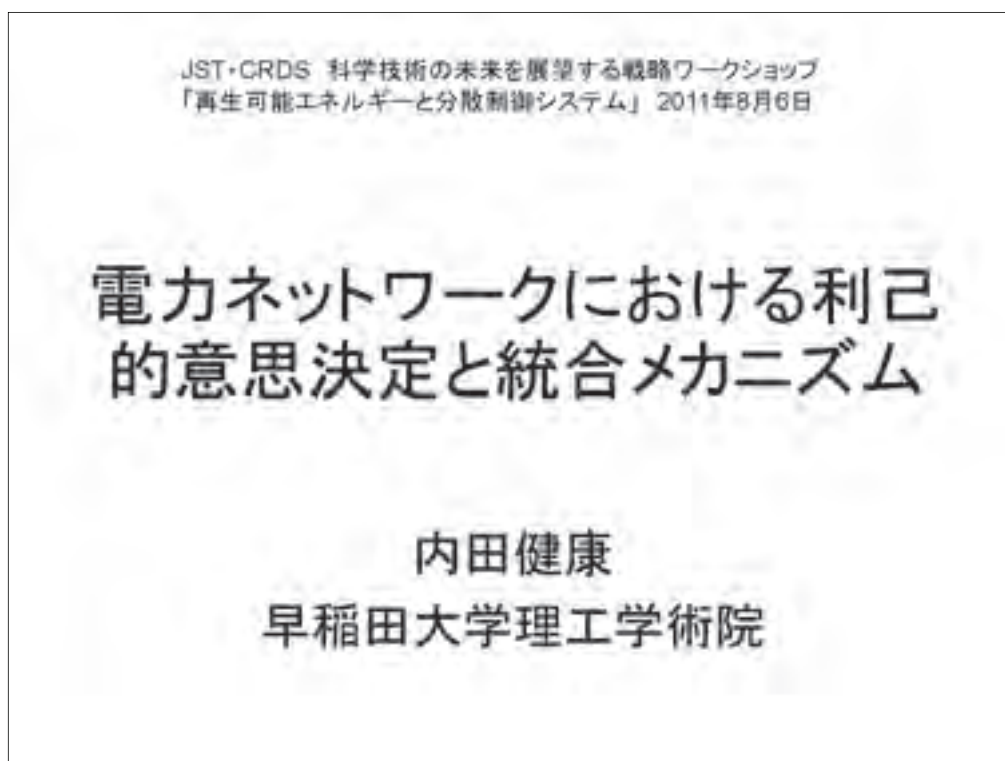
今後の取引、市場の方向として、先ほど会員の資格があるとか、ある程度大きな事業者でないとだめだとかいうことがありましたよね。それがどんどん小さな事業者でも、あるいは極端なことを言うと個人の需要家でも参加できるような方向に行くのかどうか、お考えを聞かせていただければと思います。

○マルミローリ

単体でいかないと、今みたいな日本のスキームでは、太陽光を家につけてもいつまでもフィード・イン・タリフになるか、価格が結構変動していたら、販売の小売価格をだれが決めるかがポイントになるんですね。

最近の動きですが、ドイツでは、本当に小さい IPP というか、電気をつくる人たちを組み合わせアグリゲーションして、組合みたいなものをつくって初めて市場に参加できるという動きが結構あります。電気と経済の真ん中ぐらいの考え方の開発になりますが、その辺がすごく重要だと思います。

6. 7 内田健康先生 ご講演記録



「電力ネットワークにおける利己的意思決定と統合メカニズム」というかなり刺激的な名前ですが、要するに、現在の集中的なコントロールができなくなる供給者、あるいはエネルギーの生産者が存在し、かつ、例えばエネルギー源を自由に選択できるような事業者が出てくるようなネットワークを目指したときに、それでもなお電力ネットワークというのは社会的な公共性を維持しないといけないわけですから、それをどうやって結びつけたらいいかというお話をして、これが大事だと、これの基本的なところがまだほとんどない、やるべきだということをお話ししたいと思います。

私自身、実は1年前からの分科会活動で飯野さんのお話を聞いた中でこういうことに興味を持って、それから、私自身はこれが一番大事ではないかと思いながら現在に至っています。

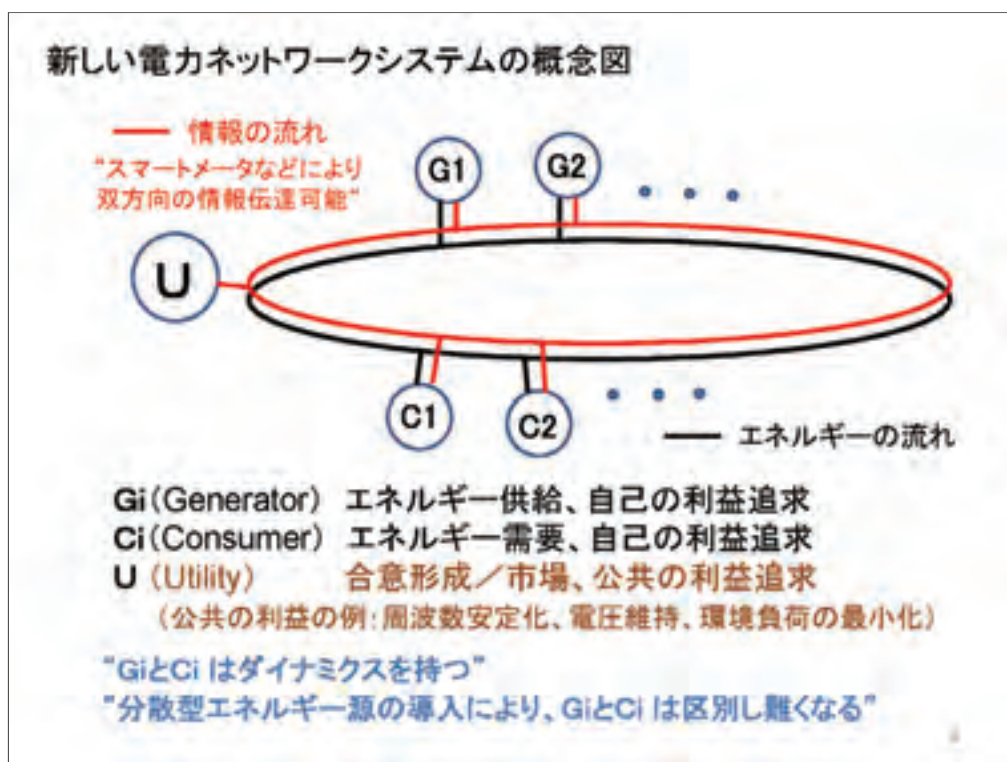


繰り返しになりますが、市場と結合するメカニズムの1つといいますか、多分ベストだと思いますが、市場を形成する。市場といっても、いわゆる完全自由な市場を目指して統合するわけではなくて、やはりそこを上手にデザインしないといけないわけですね。公共性を維持しないといけない。

どういう形でそれをやればいいのか、需要者、供給者の利己的な決定をどうやって公的な価値に結びつけていくか。そして、市場ですから、具体的なエネルギーの価格ということには必ずしもならない場合がありますが、いわゆる価格を決定して、それをやろうと。

別に再生可能エネルギーが入る前から議論されていたことですので、それがどんな影響を受けるかをさらにやらないといけないわけです。そういう仕組みを研究する。

これは今回の提案の中で言うと2つ目のテーマで、何をやるのかわからないと一番批判が出るところなので、どういうことをやるのかを中心にお話したいと思います。

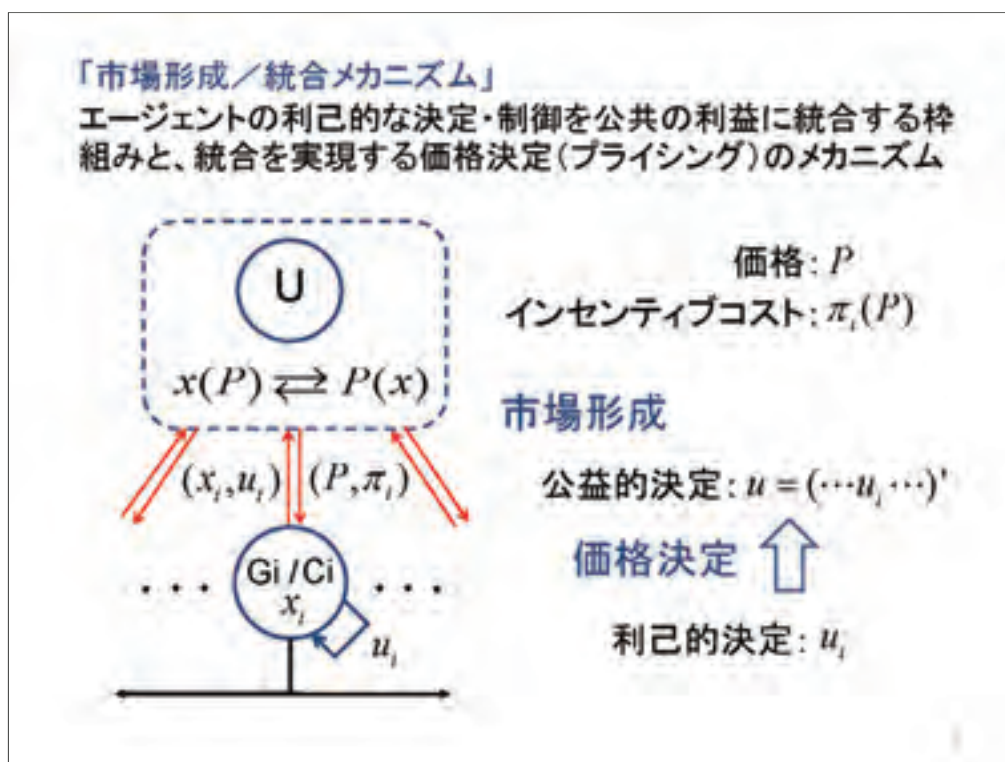


これからの電力ネットワークを概念的に見ますと、こんなふうにかけるのではないかと思います。

ジェネレータ **G** とコンシューマー **C** がいて、それぞれ自分の目的が追求できるような形のネットワークをつくり、そこにスマートメータによって双方向のエネルギーと情報の流れとが実現できるようになりつつある。しかし、これをどうやって使ったらいいかという、基本的な考え方がまだ決まっているわけではない。スマートメータは大事だ、これをやらないといけないと言われていますが、どう利用するかということは、まだ何も決まっていないと私は思います。

ユーティリティですね。これが現在は、いわゆる電力会社の中電指令所がやっている仕事ですが、これがもう少し公的な形になるだろう。しかも、できればそれを市場という形で実現すべきだというわけです。

これは先ほどのマルミローリさんのご講演と少し関係しますが、さらにジェネレータとコンシューマーがダイナミクスを持つというところが私の話のポイントになると思います。これまでのお話の中で出てきましたが、いわゆる供給者と需要家の区別がだんだんできなくなる。ある場合には需要家だし、ある場合には供給者だというわけですね。それをどうやって解決していくかということになると思います。



これも非常に抽象的ですが、何をやるのか、流れを理解していただくためにポンチ絵で考えてみます。

ユーティリティがあって、コンシューマーあるいはジェネレータがあるわけですね。メカニズムの最初として、ある価格、何に対する価格かも含めて実は設計しないといけないんですが、それにプラスして、その価格である指令を出すために一指令と言ったらいいいですかね、インセンティブを与えるためのコストを追加するわけです。それを受けて、利己的な決定で「私のところは、現時点ではこんな形でやります」ということになる。一応それを報告させます。それに基づいて市場が形成されて、ちょっとスライドはフォントがなくなっていますが、要するに、状態に応じて価格は決まるし、状態は価格によって決まる。これが収束したところが平衡点になるわけで、それが価格決定である。

このプロセスを通して、利己的に決定しているんですが、結果としてはある意味、抽象的な市場ですが形成されて、最終的には、社会的に満足できる決定につながるような市場を設計しないといけないということです。

その一番大事な部分は、価格は何で選ぶか、インセンティブコストをどうつくるかということになります。非常に抽象的になりますが、2 番目のテーマの中で言うと、これをどうするかということになると思います。

“周波数制御問題”における 「市場形成／統合メカニズム」

背景

- ・周波数制御とは？
- ・何故、市場メカニズムか？
- ・再生可能エネルギー導入

動向・課題

- ・周波数制御のための統合メカニズム(具体例)
- ・今後の課題

電力システムの制御

「周波数制御」

“需給のインバランスによって周波数が規定値から外れる”
システム全体の有効電力の需給バランスの調整

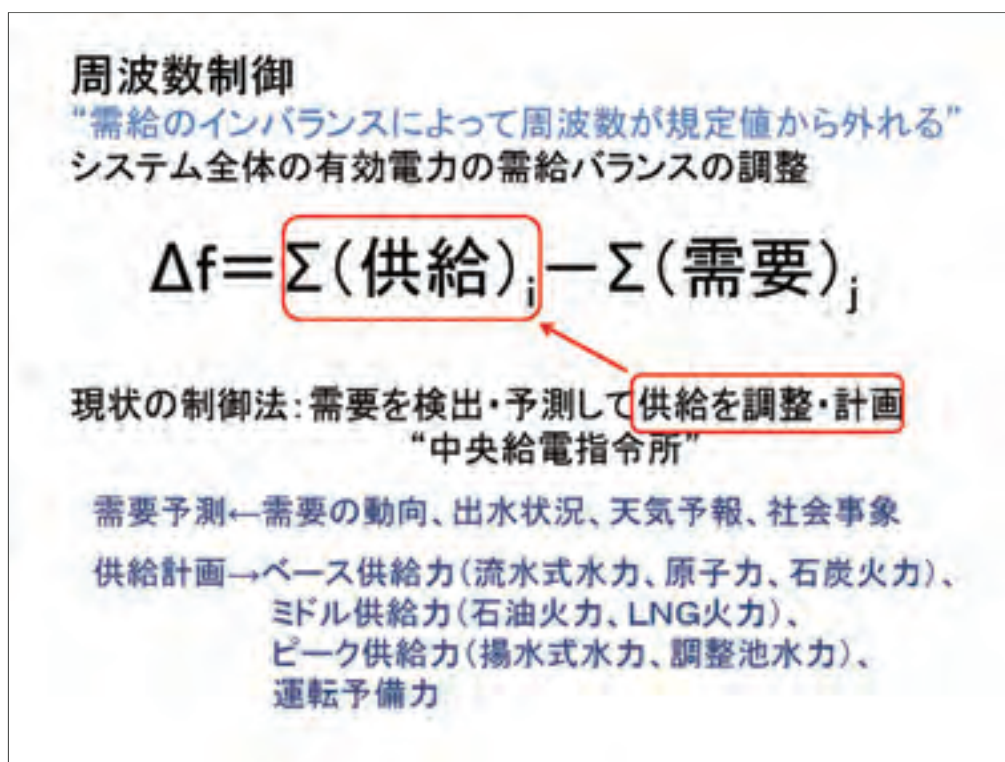
「電圧制御」

“受電端における電圧が規定値から外れる”
局所的な電圧の維持調整および無効電力のバランス調整

「電力の安定供給」

“同期運転状態から外れる”
発電機電圧の位相角動揺抑制による復帰と維持
“電圧崩壊(電圧不安定現象)”
余裕をもった運用

電力システム制御の課題は、これまでも幾つか話が出てきていますので説明はとばします。周波数制御、電圧制御の2つが電気の質を決めるときに一番大事なわけです。電圧制御も大切ですが、これは比較的ローカルに対応できる部分があるので、周波数制御のために全体を見ないといけないという意味で、今日は周波数制御問題の例に絞って具体的にお話しします。

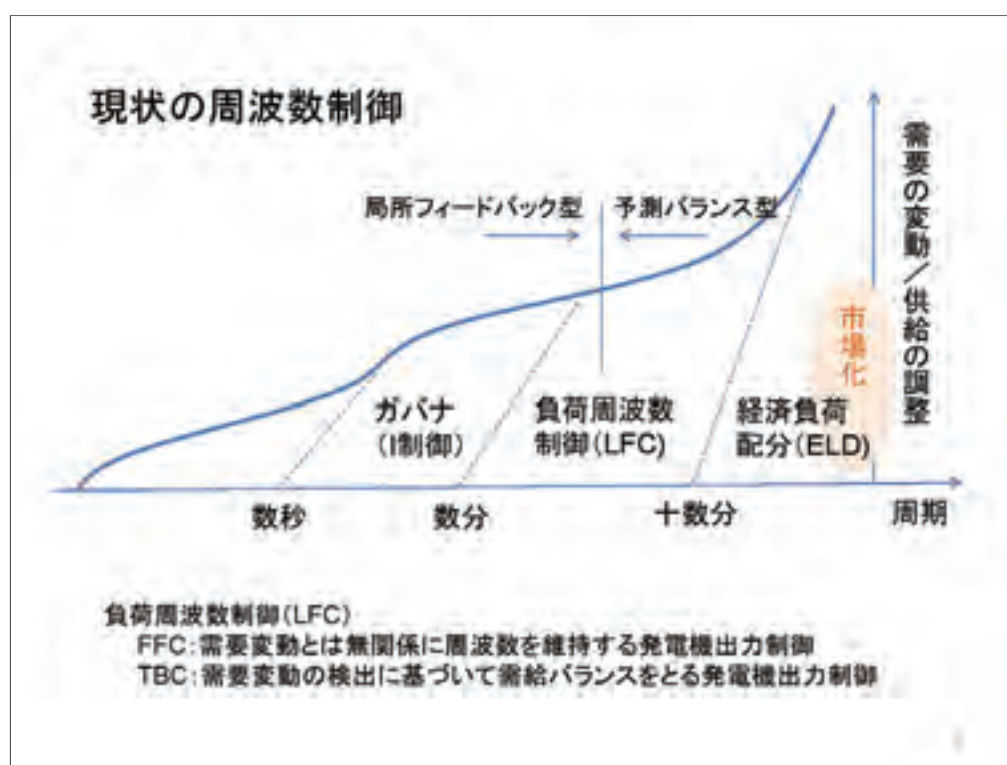


非常にラフな考え方ですが、周波数は、需給と供給に差があると変動するわけです。

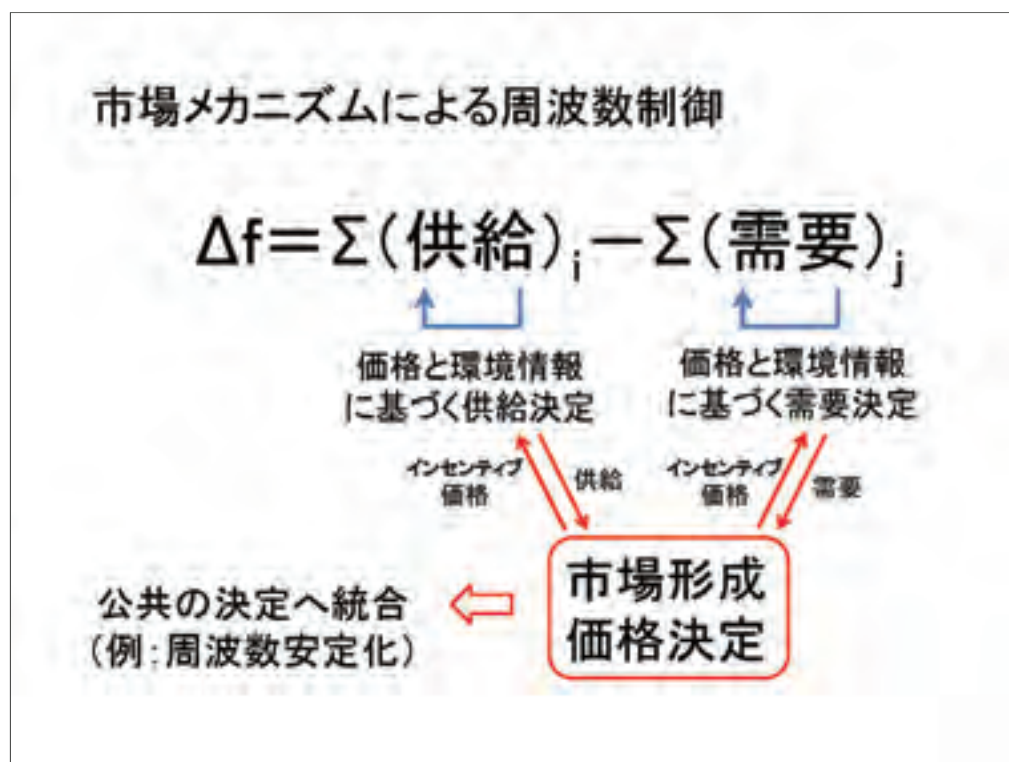
現状ではどうやってバランスをとって制御しているかといいますと、需要を検出して予測して、もちろんいろいろな長い時間のスパンでやるわけですが、簡単に言うと、検出予測して供給を調整します。それをやるのが中央給電指令所です。

需要の予測で何をやっているかというと、需要の動向、世の中のことも考えています。天気予報、出水状況、これは本当にやっているわけです。それに基づいて、自分の持っている供給力を見回しながら毎日の計画を立てる。「今日はこんなふうに」と1時間刻みぐらいの計画を立てています。

ポイントは、従来の方法は供給を調整、計画していましたが、これからはそういうわけにいかない。それにどう対応したらいいかということを考えないといけない。



こういう図がよくかかれていますので使いますが、横軸が周期です。先ほどマルミローリさんのお話にあったように、市場化も少しずつ進んでいるわけですね。要するにここで動くんですが、ここでいわゆる負荷周波数制御がされています。もうちょっと早いオーダーについては、発電機一個一個にガバナがついていて回転数を調整するということで、現在、やられています。



では、市場メカニズムを使うとどんな周波数制御になるかということですが、先ほど言いましたように、ある価格と環境情報も当然使うわけですが、利用者も、自分はこんなふうに必要なという自分の計画を立てられるという状況があるわけですね。もうちょっと具体的に言うと、市場がインセンティブを与えて価格を決めて、その結果を報告して価格が決まって、公共の決定へ統合するということで、多分、周波数制御を市場メカニズムで制御することになります。

何故、市場メカニズムによる制御を目指すのか？

- 市場への供給者と需要者の自由な参入と市場原理によるコスト削減、環境負荷の削減
- 価格弾性化による需要の適正化(デマンドレスポンスによるピーク需要の削減)、ピーク供給力確保のための過剰設備の抑制

再生可能エネルギーと市場メカニズム

再生可能エネルギーは、比較的小規模の多様多数の分散型電源により供給されるため、集中管理型制御が困難であり、分散型需給制御が必然である。

- 市場メカニズムは、分散型需給制御を実現するための最も合理的な仕組み
- 再生可能エネルギー市場形成による再生可能エネルギーの普及促進

なぜ市場メカニズムかということ整理してみますと、市場への供給者と需要者の自由な参入と、市場原理によるコスト削減と環境負荷が削減できるだろうということで、これを旗印に自由化が、特に欧州からこの辺の考え方で進んでいるわけですね。

一方、これはアメリカが中心になると思いますが、デマンドレスポンスによって需要を削減することで、要するに、ピークベースの考え方をやめよう、抑制できるよというわけです。

では、再生可能エネルギーが導入されたことによってどんな変化が起こるだろうかということですが、藤田先生のお話あたりから何度も出てきているように、再生可能エネルギーは分散型電源になる、そして集中管理が難しくなる、必然的に分散型にならないといけないだろうということになるわけですね。ですから、市場メカニズムというのは分散型需給制限を実現するのに最も合理的な仕組みではないかと思います。

それから、市場をつくることで逆に再生可能エネルギーの普及を促進できる面があるということ、ここは強調しておきたいと思います。

再生可能エネルギー源導入に伴う課題

再生可能エネルギーは、比較的小規模の多様多数の分散型電源により供給されるため、集中管理型制御が困難であり、分散型需給制御が必然である。

- 集中管理型制御システムから分散制御システムへ
- 電源の変動、特に、短周期の変動、確率的変動の増加

統合メカニズムにおける価格決定(プライシング)インターバルの短縮が必要

⇒ スポットプライシングからリアルタイムプライシングへ

発電機の供給力安定化制御の性能向上が必要

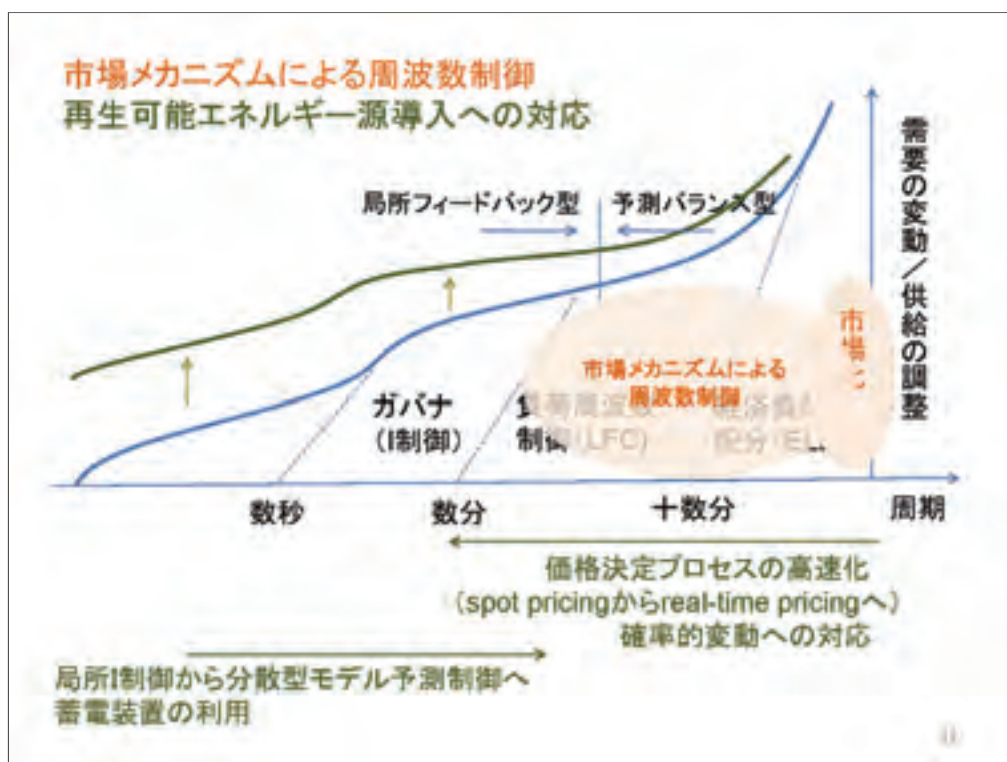
⇒ ガバナーからモデル予測型制御へ、蓄電装置の利用

少し細かい話になりますが、再生可能エネルギー源導入に伴う課題です。

これは先ほど言いましたように、集中型から分散型へという流れがありますね。それから電源の変動が、要するに、自然エネルギーが入ってくるのでどうしても短周期の変動が大きくなる。特に風などは、確率変数と考えたらいいぐらいの変動をします。

それから、分散電源はインバータを使うので、基本的には時定数がどんどん小さくなる方向なので、ちょっとした変化が大きな動揺につながります。そういうものを解決しないといけないわけですね。

もちろん両方向からやらないといけないわけですが、メカニズムの方向から言うと、要するに、価格決定のメカニズムをいかにオンラインに近づけるかといった考え方でやれる。一方、ガバナを高度化してさらに分散化、要するに、相互の関係も入れながらもっと高級な制御にしていく必要があるという両方があると思います。

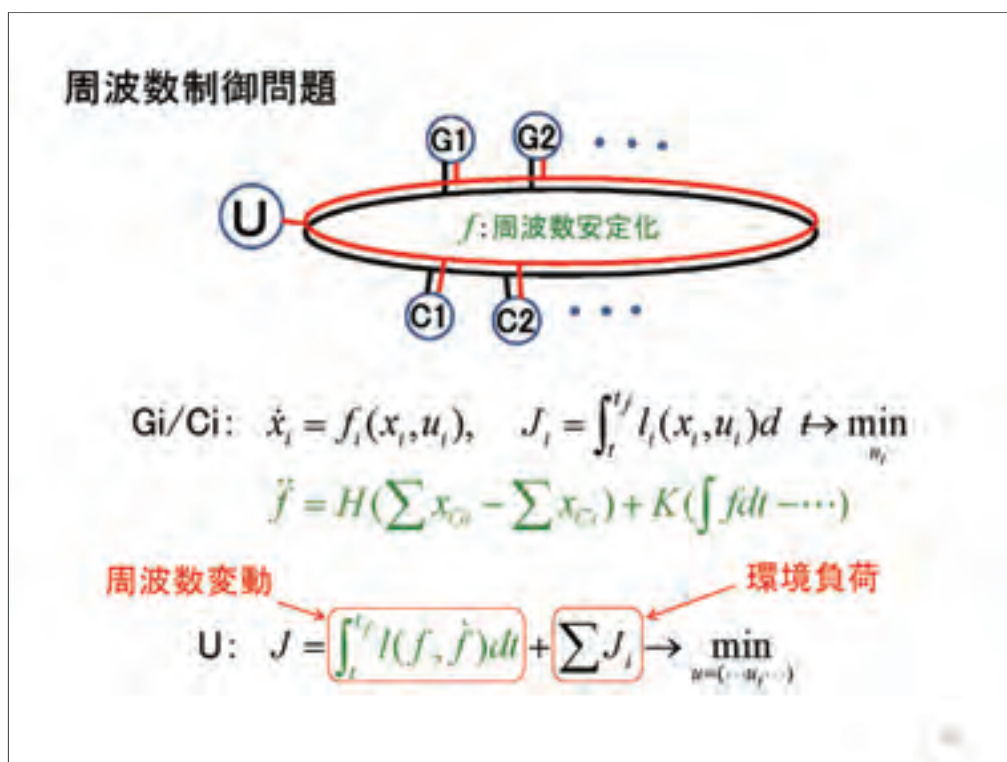


もうちょっとここに注目してまとめますと、市場メカニズムによる周波数制御ですが、この辺も市場メカニズムによってやる必要がある。とにかく需要者に突然大きな変化を与える可能性があるわけですね。

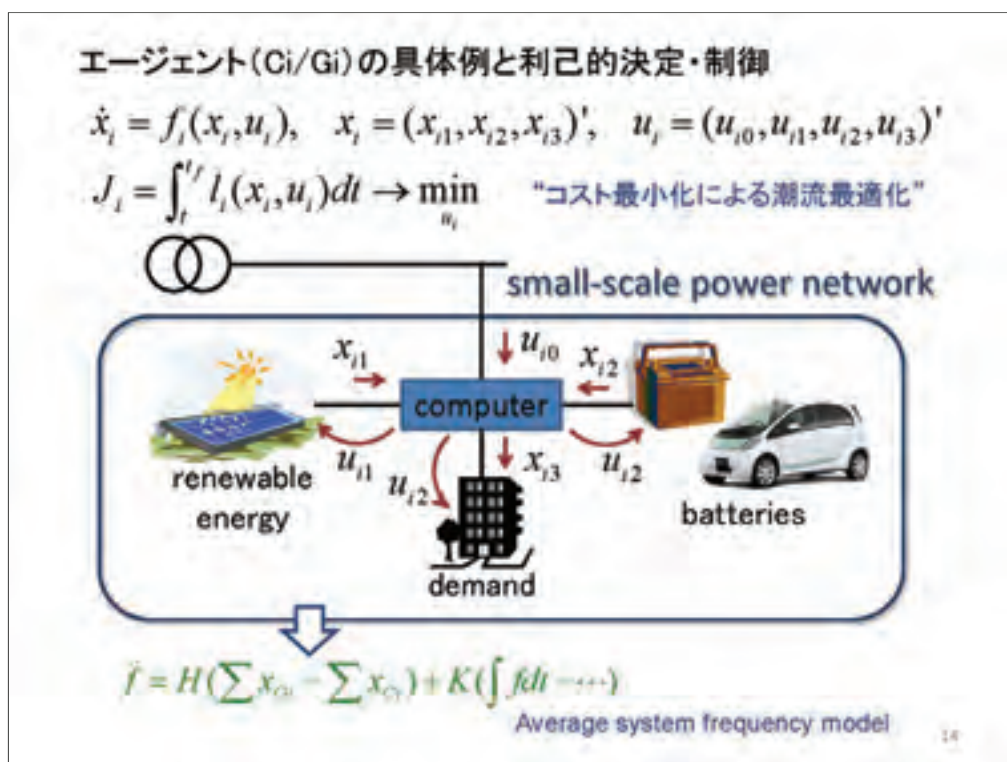
一方こちらは、先ほど言いましたように分散型モデル予測制御等を導入して高度化を進めないといけないだろう。両方から攻める必要があると思います。

では、何をやることになるのか。これもかなり抽象的になりますが、さっきのモデルを使って、例えば、ジェネレータやコンシューマがダイナミクスを持つわけです。需要者がダイナミクスを持つというのは何か変な気がするかもしれませんが、例えばこの部屋のエネルギーを管理しよう、温度を制御しようとするすると当然ダイナミクスがあるわけですね。そういう状況を考えればいいと思います。

そういう形である目標が与えられて、それぞれはミニマムを、コスト削減をねらうわけです。当然その結果、このネットワークの周波数に差があると変動します。そういうモデルがつくれるわけです。要するに、モデルベースの考え方になるわけですが、逆にそれが大事だと思っています。



これがトータルの考え方で、この周波数の部分を一定化させるためのコスト、それから、こちら側は各戸のコストを合わせたもので、公的に言うとも環境負荷と言ってもいい。エネルギーの浪費を防ぐという意味です。



ここのコンシューマーやジェネレータというのは特に小さなイメージでとらえる必要はなくて、先ほどアグリゲーションの話もありましたが、まさに1つのネットワークである可能性もあるわけです。これはそれほど大きなネットワークというイメージではありませんが、こういう形でローカルなネットワークを組むデマンドがあって、こういう形のものも結局はこういうシステムとしてかける。ですから、U自身は指令値といった考え方も入っているわけですね。単なるフィードバックということよりも、ここから来る指令値が入って、それが固定されている変数になる可能性があります。

それから、その結果としてこういうものが決まるわけですね。

周波数制御のための「市場形成／統合メカニズム」(内田・平田 2011)

(1) ユーティリティはエージェント i に対して、時刻 t で、価格 P における単位時間当たりのインセンティブコスト $\pi_i^L + \pi_i^T$ を課すことを伝える。

$$\bar{J}_i = \int_t^{t_f} (J_i(x_i, u_i) + \pi_i^L(x_i, u_i, P_i) + \pi_i^T(x_i, P, u_{-i})) dt \quad x = (f, \dot{f}, \dots, x_i, \dots)'$$

統合コスト: $\pi_i^L(x_i, P_i, u_i) = P_i' f_i(x_i, u_i)$

移転コスト: $\pi_i^T(x, P, u_{-i}) = \text{Vickrey-Clarke-Groves型コスト}$

(2) エージェント i は、 (t, x_i) において、次の局所的最適化(利己的決定)を行い、その結果 u_i^* と現在の状態 x_i をユーティリティに告げる。

$$u_i^*(x_i, P_i) = \arg \min_{u_i} \{J_i(x_i, u_i) + \pi_i^L(x_i, P_i, u_i) + \pi_i^T(x_i, P, u_{-i})\}$$

(3) ユーティリティは、受け取った利己的決定 $u^* = (\dots u_i^* \dots)'$ を用いて、全体の最適制御に対する2点境界値問題/HJB方程式を解いて、 (t, x) における価格 $P(t, x) = (\dots P_i(t, x) \dots)'$ を決定して、各エージェントに知らせる。

(4) エージェント i は、時刻 t において、制御 $u_i^*(x_i, P_i(t, x))$ を実行する。

これは私が今検討しているメカニズムですが、もう時間も来ますので、大事なところだけ説明いたします。

インセンティブコストを2種類考えます。これはローカルなミニマムをグローバルなミニマムに近づけるためのコストで、これは制御をやられている方はすぐわかると思います。ただ、これがプライスになりますが、このプライスの意味が、例えば x がエネルギー—電力だとしますと、単位時間当たりのエネルギーのコストという意味合いが出てくるわけですね。

一方、これはかなり社会的な市場になることを考えて、こういうコストを考えることになります。

この辺は省略します。

この統合メカニズムが保証する公共性と合理性

π_i^L による性質:

1. (公共の利益の分解と統合) エージェントの利己的な制御が公共のコストを最小化する。

$\pi_i^L + \pi_i^T$ による性質:

2. (対戦略性) エージェント i からユーティリティへの戦略的申告 $\sigma_i(x_i)$ のなかで、真実の申告 $\sigma_i(x_i) = x_i$ が、インセンティブコストを加えたコスト $\bar{J}_i$ を最小化する。

“各エージェントにとって、偽りの申告は得にはならない”

$\pi_i^L + \pi_i^T$ による性質:

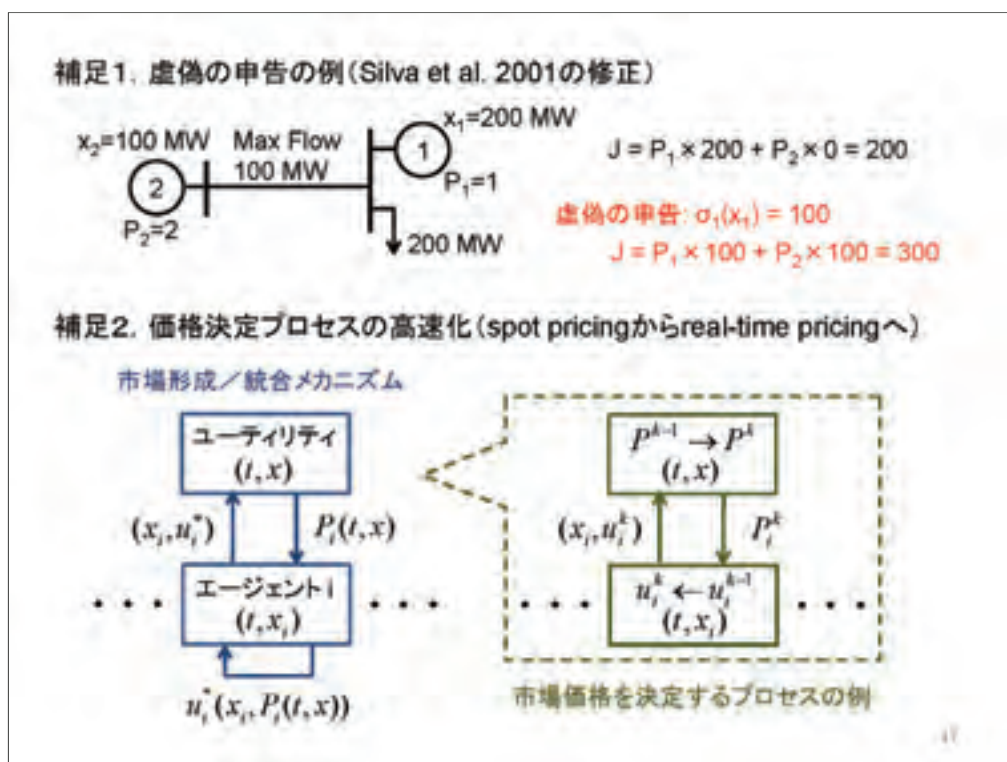
3. (個人合理性) $\bar{J}_i \leq 0$

“各エージェントにとって、市場への参入は損にはならない”

ローカルにやった結果をまとめて、そうすると、先ほどのコストを上手に選ぶと、当然ですが、エージェントの利己的な制御が公共のコストを最小化する。

もう一つ、これが市場に参加するある意味のインセンティブになるし、合理性を与えるようなコストでないといけないわけですが、それがあ意味で保証される。特にこちらはそうですね。絶対損をしない、そういうインセンティブを与えるわけです。

一方、小売的かつ戦略的な参加者が当然出てくるわけですが、実はあるコストを上手に決めてやるとそういうものにも、真実を伝えるほうが、報告するほうがベストだということを保証することができます。



これは一つの例ですが、ジェネレータが 100 メガワット、1 は 200 メガワットです。これでデマンドが 200 メガワットあったとすると、公共の立場としては、こららの安いものを使うほうがベストになりますが、申告をして「私は 100 しかないよ」と言われたら、しょうがないから 100 やるしかない。結局、社会が 300 を負担しないといけないわけですが、そつと中で相談しておいて 100 を渡してやると、1 は損をしないし 2 も損をしない。逆に 1 は儲けるわけです。例えば 250 取ってこっちに 50 やって、結局 100 をこっちに戻してやる、そういう戦略的なこともできてしまうことになります。

「市場形成／統合メカニズム」研究の課題

(1) 新たな電力ネットワークシステム構築のための、市場形成／統合メカニズム理論の確立と設計法の開発（Operating Systemの確立）

要素機能を組み合わせるネットワーク全体の機能を実現するにはOSの確立が不可欠。OSなしの実証研究は、実証モデル依存の局所最適な技術の開発と評価に止まる可能性が高く、実証データの普遍性も高くない。

(2) 周波数制御の議論から

- ・ エージェントが緩い利己的最適化（例えば、Nash平衡解の構成）を目指す場合の検討
- ・ コスト関数やダイナミクスに関する情報も含めた一般的な（戦略性のある）情報構造を前提とした検討
- ・ 価格決定プロセスの高速化（Spot pricingからReal-time pricingへ）および収束性の検討
- ・ 自然エネルギー源の導入による確率的変動への対応
- ・ 統合メカニズムのロバスト化、学習型統合メカニズムへの展開

今のところ全くないと言ってもいいと思いますが、ここに示したようなことを考える必要がある。これは藤田先生の言葉を使うと、OSを確立するということになると思います。OSなしにやると、せっかく実証試験をやっても「そうですか」で終わってしまう可能性があるということです。

少し細かい話ですが、1点だけ。

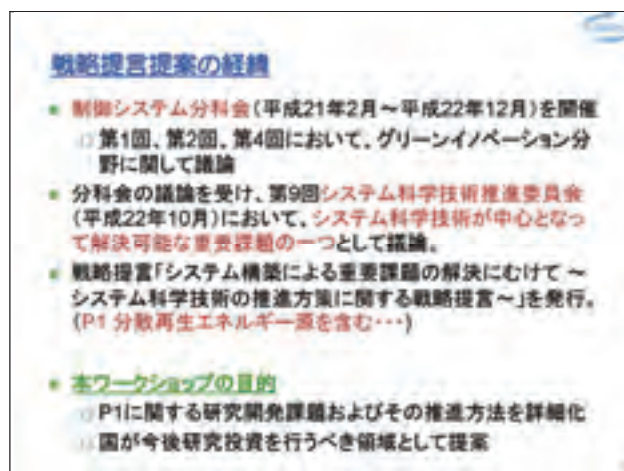
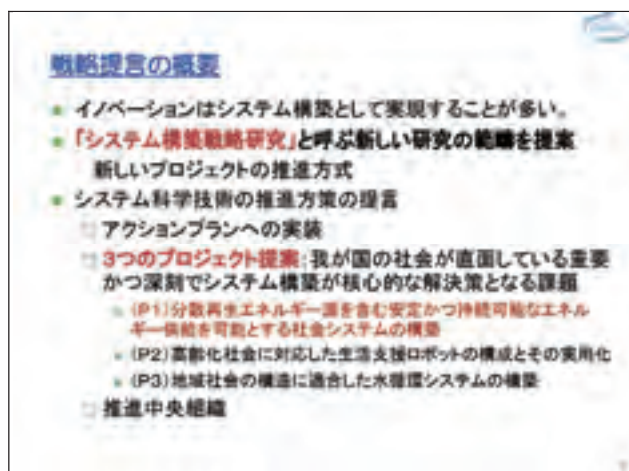
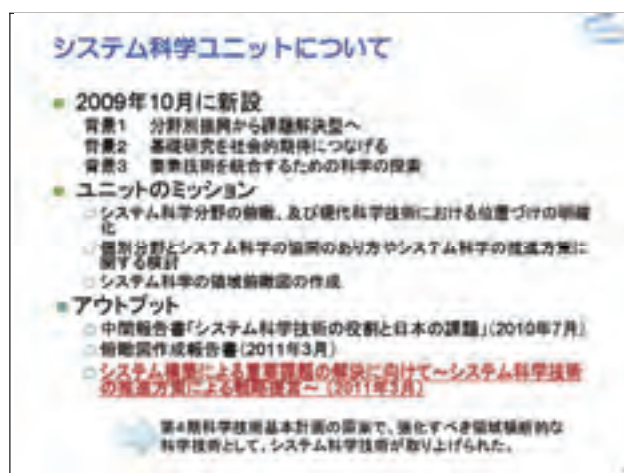
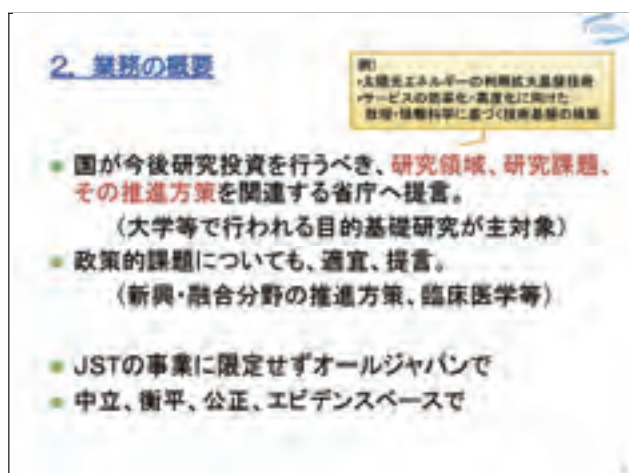
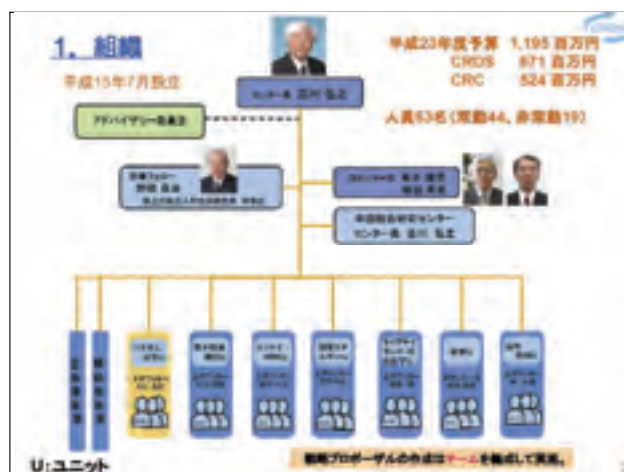
例えば、先ほどの個人の利益を追求してベストにしてやると、実はユーティリティの役割が余りにも大きくなり過ぎる。そこで、エージェントの間で少し緩めて、例えばゲームをさせるような形の市場をつくるとユーティリティの負担が減る、そんなこともいろいろ検討できます。

今日の話はかなり抽象的なことばかりでしたが、こういう仕組みを考えていくことが、これから再生可能エネルギーを含めたネットワークを考えていく、あるいは海外進出をするといったことを考えたときに大事ではないかと思っております。

<質疑応答>

なし

事務局説明資料



- 再生可能エネルギー導入によるエネルギー源の多様化と新たなエネルギーマネジメントシステムの必要性が強調されている。
 - 新成長戦略
 - 第4期科学技術基本計画
 - H23・H24科学技術重要施策アクションプラン
 - エネルギー基本計画
 - 東日本大震災からの復興の基本方針(H23.7.26) 等々
- 国内外で、スマートグリッドや、関連するインフラ整備を含めたスマートシティに関するプロジェクトが数百におよび進行中。

再生可能エネルギーの安定かつ頑強な分散型エネルギー需給管理運用システム構築のための理論および制御基盤技術開発（案）

（國家標準 2004年—標準化編號：GB/T 2004）

- ①分散型電源システムとは、電力が電源地から遠い場所、大規模電力・大電力の集約型電源系統と
したシステムとは異なり、電力の消費地付近で発生可能な小電力、ロー・ヴォルテージ・システムであり、散
布型電源を用いた配電系統を構築するシステム。



＜同生可觀工本必平＞の諸人書翰、書翰集＞

(注：表1中各列数据为平均值，方括号内数字为标准差。下同。资料来源：作者根据《中国统计年鉴》整理。）

- 新たなベストミックスとエネルギーシステムの成果を実現する。

● 中央
 ● 地方
 ● 地域

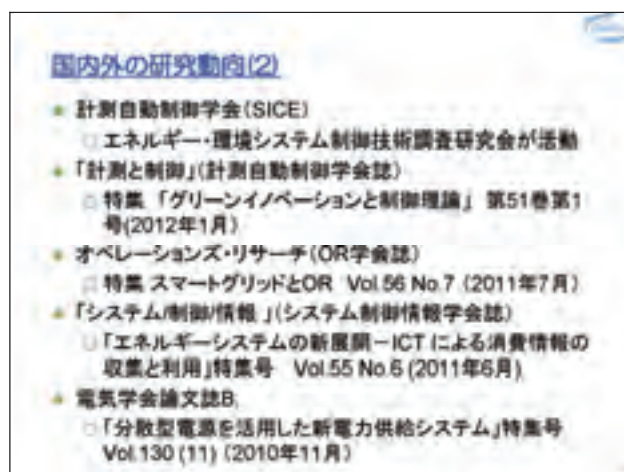
どういう構造で要素を
 繋ぎ、制御をするか？

・ 階層型と分散型の最適化
 ・ 要素の制御要素への柔軟性

要素間の制御関係 (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100)

- ・エネルギー源多様化
- ・低炭素化
- ・高品質化
- ・有事の環境強化
- ・低コスト化

一 価格メカニズムによる資源配分



事前アンケート結果

JST/CRDS 科学技術の未来を展望する戦略WS 「再生可能エネルギーと分散制御システム」アンケート

これまでの検討を元に現段階の案として、国が実施すべきプロジェクトの内容を「再生可能エネルギーの安定かつ頑強な分散型エネルギー需給管理運用システム構築のための理論および制御基盤技術開発」として、資料1（p5に掲載）にまとめています。

資料1の内容について、以下のような視点からご意見をお聞かせください。

視点の例

- ・現状案に関するご意見（訂正すべき点、追加すべき点など）
- ・国内外の状況について、訂正や追加情報があれば
- ・プロジェクトを効果的に推進するために必要な方策（個人研究、グループ研究、拠点あるいはネットワーク形成による推進、予算規模、研究期間、国際連携、企業連携など）
- ・その他

井村順一先生

- （1） 「研究投資する意義」として、普遍性の高い理論を構築することによって、電力ネットワークだけでなく、様々なネットワークシステムに応用できることもあってよいのではないのでしょうか？ システム科学の役割としての研究提案という位置づけが重要であると思います。
- （2） 電力ネットワークの実質的研究を促進するためには、④の研究も必要ですが、やはり、電力会社の積極的な情報開示が必須であるように思います。この辺りの仕組みを是非考えていただければと思います。

大塚敏之先生

回答：

以下、現状案を拝見して感じたことになります。プロジェクトを効果的に推進するための方策に関することも含まれます。

- （1） 本当に強い社会的ニーズがある問題設定なのか気になりました。そうでないと、成果が得られてもインパクトは弱いと思います。
- （2） 一方で、エネルギー関連分野の当事者すら認識していない技術的可能性をシステム科学分野の研究者が見いだせる可能性もあると思います。そのためには、エネルギー分野とシステム科学分野がインフォーマルな議論を繰り返し行う必要があると思います。
- （3） 具体的な問題設定の段階でエネルギー分野の技術者・研究者にも参画してもらい、適切なベン

チマーク問題を作成することができれば、システム科学分野の研究者にとって取り組みやすいですし、エネルギー分野にとってもゴールと効果が分かりやすいと思います。ベンチマーク問題自体も、将来にわたってさまざまな理論の検証に使えるという意味で一つの成果になると思います。

- (4) 最適化等による効率の向上ももちろん重要ですが、理論的限界が明確に示せれば、システム科学の重要な貢献になると思います。
- (5) ベンチマーク問題の設定に当たっては、対応する実データが入手しやすいことや将来的な実証を行いやすいこともなるべく考慮した方が良いと思います。

大森浩充先生

回答：

- (1) 3つの提案とそれらのシミュレータの開発はたいへん良いと思う。特に、2番目の経済的合理性を組み込んだ制度設計の提案は必要であると思う。プログラムの順番が3+1の順番に対応していないことは、内容で並べたと理解できる。
- (2) 地域気象予測と空間情報の取得は、制御ではセンサーに当たるが、時間的・空間的な変化が早い遅い、広域/狭域の違いが存在するため、時空間周波数分解のような考え方が必要ではないか。
- (3) 理論の重要性を強調したい。
- (4) 適応学習というシステム科学技術の分野から貢献できるかもしれない。
- (5) 電力線、熱線、情報線の3つのライン間の物理量、情報量の移動を統合化する必要がある。
- (6) 災害はいつも想定外であるので、イベントが起きてから復興するまでの時間・人・モノ・金を最小にするシステムづくり（レジリエンス工学）の導入が必要である。
- (7) 低炭素化、CO₂排出量削減は、結果として出てくるものではないか。

加嶋健司先生

ご回答：

電力システムなどの現実から乖離しない研究をすすめる重要性を認識する一方で、これらへの応用可能性を有するが特定の対象へ特化しすぎない理論・基礎研究がもう少し加えられてもよいと感じました。これにより、他の関連する大規模複雑ネットワーク型システムへの応用に関する知見も得られることが期待できるとともに、こうした基礎研究のプラットフォームモデルがあればより多くのシステム制御の研究者の積極的な参画をはかれるのではないかと思います。

杉江俊治先生

回答：

(1) 現状案に関して

- ・電力システムのような大規模システムを扱うためには、目的に応じた解像度を設定し（もしくは動的に切り替えて）、その解像度でセンシング・制御することが重要です。そのような、階層化（複数解像度）センシング・制御技術の開発も、研究課題のひとつとして挙げてはいかがでしょうか？
- ・3-②に「需要家を確率システムとみなし」とありますが、需要家モデルが存在する仮定の下で制御方法を開発するより、むしろ、「需要家の行動モデル」を作る方が挑戦的だと思います。

(2) 国内外の状況

特にありません。

(3) プロジェクトを効果的に推進するために必要な方策

- ・研究課題のスケールからすると、数年で実成果につながるとは考えにくく、最低でも 10～20 年は必要だと推測されます。本プロジェクトが終わった後も、一貫性と継続性を保ちながら長期間に渡って続くような組織作りが必要だと考えます。（たとえば、20 代をリーダーとしたチーム編成など）

(4) その他

- ・全体を貫くような統一的なビジョン（システム科学ならではのもの）があまり明瞭ではないという印象を受けました。また、そのため研究課題の各課題にまとまりがないことに問題を感じました。
- ・今回提案されているようなシステムを構築するにあたっては、システムオブシステムズ的な視点が不可欠であることを強調されてはいかがでしょうか？
- ・ローカル情報のみを使って、ある程度のパフォーマンスを出す、という分散システムの考え方が表に出ていないように感じます。ローカル情報のみでも、できるだけ高いパフォーマンス（電力品質等）出すために、研究課題 3-①の分散制御、ネットワークトポロジーなどの知見が必要になります。さらなるパフォーマンス向上のためには、3-②、3-③における研究結果である、需要家、気象のモデルが不可欠になります。この辺りをクリアにして、全課題が協力して高パフォーマンスなシステムを構築するという観点を追加すれば、課題のまとまりが出てくるかと思います。

杉原正顯先生

回答：

（以下、思いついたことを羅列します）

現在、我が国でも、数多くの分散型エネルギー需給管理運用システムに関する研究が進んでいるよう

に思われる。それらの研究との差別化、もしくは、統合化を意識した構想が必要である。

今回の震災において、インターネットが頑健であったとの評価であるが、物理的な線を修復する地道な作業がそれを支えたという報告もある。「安定かつ頑強な」を実現するには、このような物理的な観点、さらには、当然であるが費用に関しても意識する必要がある。

このプロジェクトは理論的な観点からのものと思われるが、理論の出発点となる実験的？事実の収集を行う必要がある。

鷹羽浄嗣先生

回答：

現状案の具体的研究課題について

タイトルにあるように本プロジェクトでは、再生可能エネルギーの需給管理システムの頑強性も一つの重要な観点であると思われる。

災害時には、配電線や通信線が切れたり、発電源が故障・停止するなどエネルギーネットワークの構造(トポロジー)そのものが急に変化する。したがって、頑健なエネルギー需給管理システムを構築するためには、

- ・ネットワークの構造変化に対しても安定的に所望の需給バランスを確保する分散制御
- ・ネットワークの構造変化の検出、ネットワーク構造の推定

などの研究が重要と考える。

塚本幸辰（マルタ マルミローリ）氏

回答：

（１）一般論

電力システムの安定運用のための系統技術や電力市場の競争メカニズムと需給バランスの関係については過去多くの研究実績ならびに事例があるが、いずれも火力、原子力、水力などの比較的 **controllable** な電源を前提にしたものである。今後、再生可能エネルギーの大量導入により桁違いの多くの参加者が参加する電力システムにおいて、それを公平かつ効率的に運用するための技術開発についてはその理論武装をきちんとおこなうとともに理論に裏打ちされた技術開発が必要である。従い、本分野の基盤技術開発は重要なテーマと考えられる。

なお、研究項目としては、短期的最適性と長期的最適性の両面からの検討を付け加える必要がある。

（２）国内外事例

本分野は、諸外国での検討や実用化が先行しており、ぜひとも諸外国の考え方を十分に調査する必要があると考える。なお、国内外比較においてはわが国の国内事情による制約に焦点を充てるのではなく、少なくとも本研究においては理論の発展に力点をおくべきと思われる。

(3) プロジェクト効果的推進のための方策

本研究の必要性は高くかつ喫緊である。また研究テーマは業態そのものを変革する力をもっている。それを良しとするかどうかは政治的判断が必要と思われるが、すくなくとも理論的研究の意味では業界に制約を受けないような中立性をもった進め方が必要。

分散再生エネルギー源を含む安定かつ持続可能なエネルギー供給を可能とする社会システムの構築
(戦略提言 P18 より)

19世紀末から20世紀初めにかけて急速に進んだ配電網の展開は、スケールメリットを期待した発電源の巨大化と集中化を軸としていた。低炭素化社会を実現するために各種の再生可能エネルギー発生装置、燃料電池、コジェネレーション、ヒートポンプ、電気自動車などが登場し、電源は一举に多様化しつつある。スマートグリッドやマイクログリッドは、すでに概念のレベルから実現の段階に来ている。これはシステム構築を核とする典型的な課題であり、その解決のためには要素技術の研究開発とともに、システム科学技術が大きな役割を演じなければならない。

エネルギーという物理的なシステムのダイナミクスだけではなく、生活スタイルを含めた社会経済システムに関するダイナミクスをも兼ね備えた、新たな次世代エネルギーシステムを構築していかななくてはならない。企業、家庭等異なった生活規範のもとで異なったエネルギーの使い方をする構成員がいるなかで、全体が合意できるような社会システム設計の基盤構築を目指す。

システム構築戦略研究では、各地で実施されているエネルギー関連プロジェクトのデータも利用しながら、各種再生可能エネルギー等の代替普及シナリオ、個人消費行動を取り入れた電力市場のモデル、運輸や民生セクターといった需要側の各々の利己的決定と多くの異なった種類の発電機を含む電力供給側の各々の制御とを、エネルギーネットワーク全体の性能向上（経済性、省エネルギー性、信頼性、安定性など）につなげるための制御論等を研究する。

システムの範囲や要件を定義するために、シナリオ・モデル群という合理的な選択のための統合基盤を築くことが第一ステップであり、このステップの後に、最終的にどのようなエネルギーマネジメントシステムを構築するかについてステークホルダーが意思決定をする第二ステップ、新たに構築するシステムに必要な要素技術開発や実証事業等を実際に進めていく第三ステップが続くことになる。ステークホルダーが示す条件、システムを構築する場所や範囲、時期、期間等によって、どのようなエネルギーシステムを最適に構築するかという方針が異なってくるため、ここでは統合基盤を作るという最初の共通のステップを示した。

■編集担当■

メンバー

木村 英紀	上席フェロー	(システム科学ユニット)
本間 弘一	フェロー	(システム科学ユニット)
豊内 順一	フェロー	(システム科学ユニット)
森 猛	フェロー	(システム科学ユニット)
○武内 里香	フェロー	(システム科学ユニット)

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY2011-WR-04

科学技術の未来を展望する戦略ワークショップ

「再生可能エネルギーと分散制御システム」

平成 23 年 9 月 September 2011

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター システム科学ユニット
Systems Science Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒102-0084 東京都千代田区二番町 3 番地

電 話 03-5214-7562

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

©2011 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.
Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknow.

