

---

**Review**


---

Special report: 9th Energy Technology Seminar for Young Researchers and Students

小特集：第9回エネルギー転換・利用に関わる若手研究者の勉強会活動報告

## What to Expect for Sustainable Energy Technologies

Masayoshi ISHIDA

(Received October 28, 2011)

### 持続可能なエネルギー技術に求めるもの

石田 政義

The nuclear power accident following the earthquake and tsunami on 11 March has influenced researchers' thinking in various ways, in particular in the field of energy engineering. We need to reconsider both the sustainability of energy resources and future energy consumption. University of Tsukuba is promoting the development of a Carbon Neutral Energy System (CNES), featuring hydrogen-based energy production and DC interconnection networking. This paper introduces the original ideas, history, experience and present status of the project, and gives food for thought to young scholars and technical experts on the creation of sustainable energy technologies and holistic engineering.

#### Key Words

Sustainability, Holistic engineering, Renewable energy, Distributed generator,

Direct current interconnection, Hydrogen energy, Energy networking, Biological life force

#### 1. はじめに

東日本大震災と福島原発事故はエネルギー工学に対して多大な影響を与えたことは言うまでもない。筆者にとってもかなりの衝撃であり、頭の中が真っ白になって正に途方に暮れた状態になった。以前はCO<sub>2</sub>排出削減を旗印に、火力発電と可換な分散型電源を導入するという図柄を描いていたのだが、原子力を主とするエネルギー供給の枠組みが脆くも崩れ去ってしまったのである。さらに、被災地の端くれで停電をはじめ断水や物資入手困難な状況に自らが少しばかり陥っただけで、もたらされる不安や恐怖から、人間の生き物としての弱さを体感し、巨大な社会システムに依存している脆弱さを再認識した。先達が創り上げてきたエネルギー工学は現代科学技術文明の礎であり、様々な恩恵を与えてくれたことは間違いない。しかしながら一方で、資源の浪費およびCO<sub>2</sub>や核燃料廃棄物の蓄積に止まらず、いつ戻れるとも知れない放射性物質汚染地域まで遺してしまったのである。人を幸せにするはずの技術が人を不幸にする。我々はいったい何をしているのであろうか、もう一度原点に戻って考え直す必要があるのではないか。安易に用いていた“持

続可能”という言葉の重みが一気に増したのである。この答えを導き示すような知見や能力はとても持ち合わせていないものの、当研究開発における経験や考え方が良くも悪くも読者各人のこれからを見据える参考になることを望みたい。

#### 2. 次世代エネルギーシステムの考え方

エネルギーシステムを単純化すると、源、パス、需要、でしかない。需要は様々な用途があるにせよ、全体的にはあらゆる手段によって減らす努力をするという方向性だけであろう。つまり、一次エネルギー資源の選択、そしてそれらをどのような二次エネルギーの形に転換して効率的に消費地に運ぶかが技術的に対処可能なところである。前者については、化石燃料を削減し再生可能エネルギーを導入することは疑いが無い。核燃料をどうするかは国民全体での議論を待たなければならないが、少なくとも増やすという気運はなくなったのではないだろうか。脱原子力が進むとすると、現状では次に大容量かつコスト的に有利とされる火力にCO<sub>2</sub>排出の観点で簡単に頼れない以上、新たなエネルギー資源を獲得しなければ

ならないことになる。爪に火を灯すような努力により低密度で高コストの再生可能エネルギーをかき集めるか、文字どおり“夢”のエネルギーである核融合の実用化を期待するのが関の山である。エネルギー輸送媒体においては、電力は十分に成熟した技術であることから、石油や天然ガスの加工製品に替わる水素等化学物質を如何に上手く利用できるかに尽きる。以前に予測していたエネルギーシステムのパラダイムシフト例を図1に示す。マクロな視点ではエネルギー工学での選択肢は高々知れているものと思われる。

次世代エネルギーシステムとして取り沙汰されているのは、言うまでもなくスマートグリッドである。これはマイクログリッドに情報通信技術（ICT：Information & Communication Technology）を活用し、信頼性の向上や環境改善に役立てようというのが基本的な概念であろう。ICTを柱として、電力の流れを供給側と需要側の双方から制御し、需給を自律的に調整するとされている。ICTの他に現われる技術的なキーワードは、デマンドレスポンス（スマートメーター、EMS（Energy Management System））、インフラバッテリー（定置用蓄電池、電気自動車）、新サービス創出（宅配、セキュリティ、省エネデバイス等）である。ちなみにスマートグリッドに交通システムや情報システム（モノ-モノ、モノ-ヒト、ヒト-ヒト）を加えて展開した形が、いわゆる“スマートコミュニティ”の発想である。

ところが筆者は、なぜ世間がスマートグリッドに大騒ぎしているのか些か不思議に感じている。第一の理由は、どこにもチャレンジングな技術開発が見受けられないことにある。蓄電池そのものの開発や利用法には興味を覚

えるが、他は技術的に高揚感を湧き立てられる要素がない。“同時同量”の上に成立する商用電力系統（以後、単に電力系統と称する）の運用において、供給が不足しそうなときに需要をフィードバックで制限することは当たり前である。これをローカルで行うことが新しいのかもしれないが、どこがスマートなのか良く分からない。第二には、先に述べたエネルギーシステム論で唯一需要をコントロールするにしか過ぎず、源やパスに切り込もうとしていないことだ。再生可能エネルギーを導入するとの精神論は含まれているものの、不安定性を解消するための電源強化の話はなく、ましてや水素エネルギーやコージェネレーションをどのように展開させるかといった議論は皆無に近い。

エネルギー工学の本質は、信頼性・経済性・環境性を兼ね備えた供給方法をいかに構築するかにあるのではないか。供給責任の一部を需要側に転嫁しようという思想は、電力自由化が行き過ぎた米国ではいざ知らず、現状の我が国にとって必要に迫られた技術とはどうしても考えにくい。ある意味お金をかければできることで、鼻息の荒い企業がコンピュータ、商社、不動産系、次が電機メーカーで、ガス事業者はともかく電気事業者が比較的消極的である実情に、多少なりとも違和感を覚えてしまう。典型的なイメージ先行型の開発と言っても、賛同してくれる向きは少なからずあると考えている。

最近、筆者は“Holistic Engineering”を重要視している。ホリスティックは、全体、関連、つながり、バランスといった意味を全て包含した言葉で医療や教育で良く用いられている。医療では、目に見えない心や霊性を含めたつながり、環境をも包括した全体的な視点で健康を考え

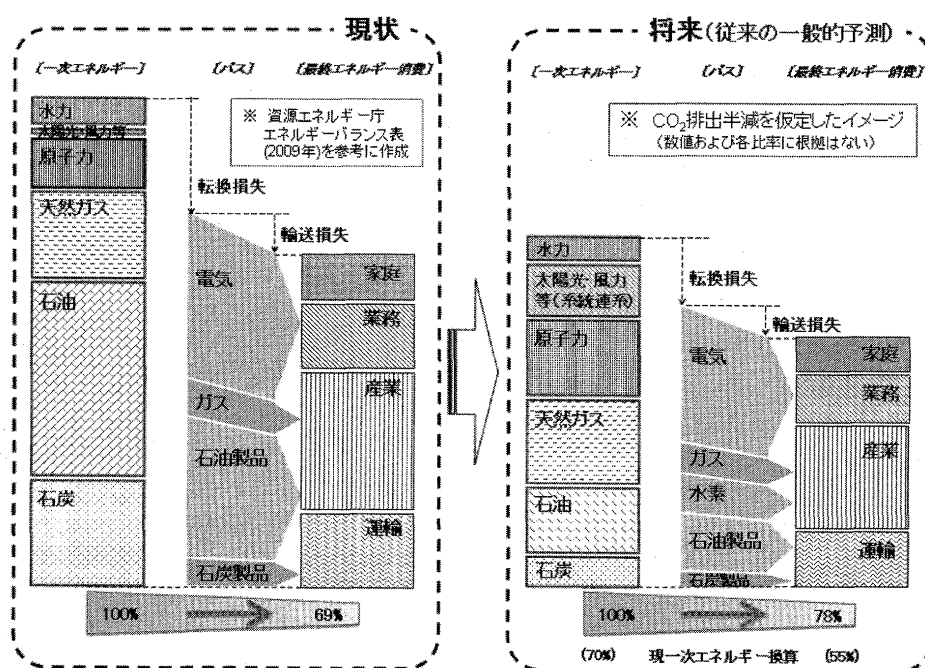


図1 エネルギーフローの現状から将来に予測される変化

るとされ、教育では、自己の存在証明、人生の目的や意味を見出し、生命への尊厳とか、学ぶことへの喜びを引き出すことを目指す。筆者にとっては極めて理想的な考え方である。土木、建築、情報等、工学全般のあらゆる分野にあてはまり、それぞれのホリスティックがあるはずである。とりわけエネルギー工学に関しては、①巨大で複雑なシステムへの極端な依存は危険性を孕む、②ほぼ成熟した要素技術の単なる寄せ集めでは頭打ちになっている、③局所最適化に根ざす既存のパラダイムや固定観念は行き詰まりが見えてきている。これらを反面教師とすると、簡素で取り扱い可能な手法を用い、得意な能力を活かして弱点を相互補完し、従前の枠組みから外れ自由な発想の下で技術開発を進めることが革新に繋がると言える。具体的には、大規模で経済合理性の高い現状の供給手段から、コンパクトで自然共生を基調とする新たな仕組みへのシフトが求められていると確信する。そこで筆者なりに導いた解は、分散型電源を主として負荷調整を従とする、いわば地産地消のエネルギーシステム構築である。自立、自律、柔軟を特徴として、ユビキタス、モバイル、スマートを広い意味で実現することが、次世代エネルギーシステムに最も相応しい。このために欠かせないキーテクノロジーが、“水素”と“直流連系<sup>1)</sup>”である。

### 3. 各種分散型電源に求められる役割

分散型電源とは消費地近傍に設置されるオンサイト型の小規模電源であり、具体的には太陽光や風力の再生可能エネルギー利用電源、もしくは燃料電池やガスエンジン等のコージェネレーションが挙げられる。前者は気象条件に左右されるため出力が不安定で、後者は変動応答性の遅さや最適運用条件の関係で出力が硬直しがちである。したがって、大方単独での運転ができず、電力系統との連系で成立するパラサイト的な立ち位置と言っても過言ではない。需給調整を電力系統に頼って設備や制御が簡素になる分、常に電力系統の下の位置付けになることから、停電時には一緒に止まり、逆潮流に対する制限、電力品質維持や保護対策を課せられる。電源なのだから停電時に一部だけでも発電してほしいと願うのは筆者だけではないであろう。最近の家庭用太陽光発電ではこのような声に押されて、非常時コンセントが設けられるようになった。現在普及している家庭用燃料電池（エネファーム）に至っては、燃料は当然ながら電気に加え水もないと運転不能である。本来は燃料電池が非常時に働くことこそ、安心を供与できるのである。

再生可能エネルギー利用電源が今後多く導入されていくことは間違いないだろう。特に太陽光発電は、政府見通しで2030年には現状の40倍、実に全電源容量の約1/4である53 GWが入ることになっている。そのためのコス

ト低減（7円/kWh）や変換効率向上（15～22%）の数値目標が掲げられているのだが、電力系統の中で他電源とどのような関係を築くかについては、青写真が十分描かれていない。大量導入に伴う偏在の結果、出力集中による配電線電圧上昇に起因した逆潮流の制限や不均衡、需給調整のために必要な設備強化、固定価格買い取り制度の長期保証など、これらのための財源と負担分配を含め議論は希薄に見える。電力系統側から見ると導入量が少ないうちはピークカット効果があり歓迎であるが、10 GW 辺りを超過するとそれがなくなるばかりか発電設備の日負荷率が低下するなどデメリットが増す。つまり連系技術としては、図2に示すように他電源との協調性をどう確立するかが大きな課題となる。

他方、燃料電池は商品名エネファームとして8,000台を超過（2011年7月現在）する普及状況にある。改質装置、電池スタック、パワーコンディショナ等、化学プラントのような複雑な構成をコンパクトにまとめあげ、補助金の支援を受けつつも市販可能なコストダウンを実現したことには脱帽する。我が国の技術レベルの高さを痛感する。けれども、火力発電をマージナル電源<sup>脚注1)</sup>としながら環境性能が高いとするのは、エネルギー工学者として如何なものかと考えている。エネファームが将来数十GWを超えるほど大量導入されたときに、見合う火力発電が削減されるのであれば異論を挟むわけではない。しかし、ほぼ定常でしか出力できない性能では、それを期待することができない。燃料電池の本質は電気化学反応による発電にあり、効率がスケールに関係なく、部分負荷でも高いことが通常の熱機関にない特長なのだ<sup>2)</sup>。“電池”と名付けられているとおり、本来は乾電池のように負荷変動に対して受動的に应答でき、使わなければ化学物質（燃料）を消費しない。エネルギーシステムに適用するに

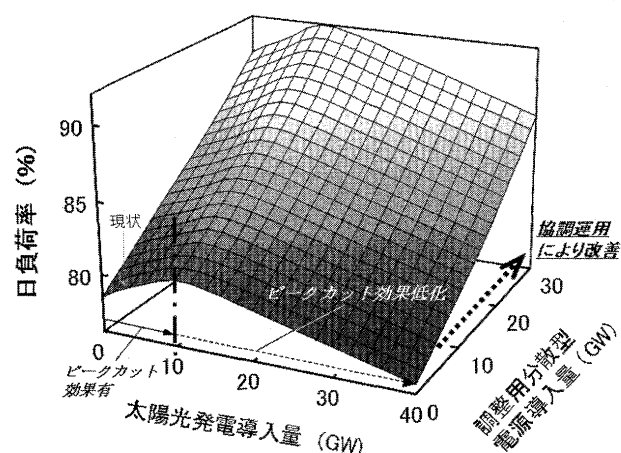


図2 太陽光発電および調整用電源の導入に伴う電力系統日負荷率の試算

脚注1) 対策（新技術普及）によって影響を受ける（実質的に出力が削減される）電源。

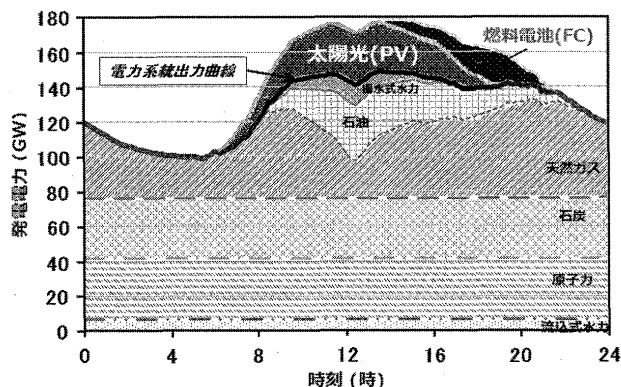


図3 分散型電源の協調運用によるピークカット貢献の概念

は、極めて優れた性能を有しているのである。燃料電池では燃料を外部から供給するため、設備サイズはW(ワット)だけに依存し比較的小型で済むが、一般の電池ではサイズがWh(ワットアワー)で決まることから大型になりがちとなる。以上のように、燃料電池自身はとてもユニークな特性を持っているのだが、これを引き出すには純水素を供給しなければならない。

太陽電池(PV: PhotoVoltaics)や燃料電池が任意かつ自由に普及すると、自己都合運用をすることになる。PVは文字どおりお天気任せで、燃料電池は夕方以降の給湯ピーク需要の準備をするため、いずれも単純に考えれば朝～夕方の日中発電がメインとなる。固体高分子形燃料電池(PEFC)でも必ずしもDSS(Daily Start & Stop)ではなく、また、固体酸化物形(SOFC)では相対的に熱転換率が低く、一部がベースロード運用志向になることも留意する必要がある。多くの分散型電源の運転が昼間に集中すると一定容量以上で電力システムにとっては逆にデメリットになり、ベースロードに大きく係わると原子力発電領域を侵略しCO<sub>2</sub>排出を助長しかねない。このように無策な分散型電源の大規模導入は、既存電力システムとの協調性を欠くばかりか、環境対策にしても本末転倒の事態を招く。言い換えれば、不安定で制限のある再生可能エネルギー利用電源と、人為的にコントロール可能なコージェネレーション機器とを計画的に出力分担することによって、協調と環境負荷低減を両立させられるのである(図3)。受動的で柔軟かつ高速に出力変動可能な純水素利用燃料電池は、最も相応しい需給調整機能を提供できる。PV、燃料電池、加えて蓄電池は、全てが直流出力であることから、そのまま直流連系すると簡素で制御容易なシステムとなることは自明である。

#### 4. 水素エネルギー利用に関する要素技術開発

上述の考え方を基に、筆者は燃料電池の能力を最大限に引き出し、真にスマート(“賢い”ではなく“スタイルが良いとか好感のある”)の意)な、自らが望ましいと考えるエネルギーシステム開発に取り組んでいる。そのた

めの主要要素技術が、(1)オンデマンド対応の水素供給、(2)需給調整機能としての燃料電池利用、(3)負荷を含めた異種電源の直流連系、である。以下にそれぞれの概念と概要を示す。

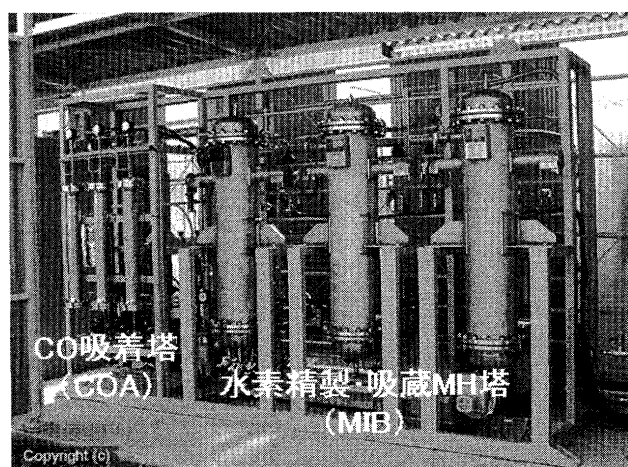
#### 4.1 COA-MIB プロセス

元来、炭化水素系燃料を水素転換するための改質反応は、高温中での触媒反応ゆえにスケールメリットを活用して、大きな容量で可能な限り定格運転の方が高効率となる。他方、負荷変動はやむを得ないため、燃料フローバッファのための一時貯蔵は不可欠である。これらの条件の上で水素を精製する手法を志向した。一般的な水素精製法は、PSA(Pressure Swing Adsorption)法またはパラジウム等による分離膜方式である。両者とも高圧が必要であり、概ね回収率が優れず、別途大きな圧力バッファタンクが必要である。PSAについては高純度化のために機器構成および動作が複雑となり、パラジウム分離膜に対しては高コストが指摘されている。より合理的な方法を求めて、かれこれ10年強前に水素吸蔵合金(MH: Metal Hydride)が水素のみと選択的に反応することを期待して研究を始めた<sup>3)</sup>。MHで期待どおり精製できれば、貯蔵機能も一緒に付いてくる。けれども、当初、一つはMHが不純物に被毒しやすいから実現は難しいとけんもほろろの感触であった。これに対しては、流通型MH容器を用いて実証し、MIB(Metal-hydride Intermediate Buffer)法の開拓ができた。さらにもう一つ、先行する改質ガス利用燃料電池システム開発に対して、精製プロセスが増えることでのコスト増加の懸念が指摘された。負荷追従性向上、高効率化、制御の容易さの付加価値で相殺できるとは思っていたが、普及にはコスト低減が最優先であることも理解できるため、MH精製機能のついでに改質プロセスのCO選択酸化除去プロセスが省略できないか追求した。COも一部だけでも取り除けないか挑戦したのである。吸蔵反応の温度を高めにすることでメタネーションにより、CO含有量1%程度までは対応できる反面、吸蔵量が大きく減少してしまうこと<sup>4)</sup>から、それ以上の性能追究は諦めてかけていた。

ところがここで、学生が文献で見つけてきた神戸製鋼所が進めるCO吸着(COA: Carbon mono-Oxide Absorption)技術との出会いがあった。低濃度で性能が発揮されるのかという心配が頭を過ぎったものの、吸着容量の大きさに興味を覚え、何はともあれ話をしてみた。どうせイング運用をするなら一緒にやると素晴らしいプロセスになると持ちかけた。当時、同社も水素関連技術に係わろうとした時期であったことが功を奏したのか、どこの馬の骨か分からない人物(後日同社談)との協同関係成立に至った。こうしてCOA-MIBプロセスの形が産声をあげたのである。

ここからの展開が目覚しかった。相手はこちらの話を鵜呑みにせず自ら MH 性能を検証し、ビジネスとして成り立つ処理速度を具体的に目標に定め、それを達成するノウハウを着実に積み上げて行く。その姿勢および努力に、さすが民間企業の逞しさと真剣みを感じた。大学の立場では、精製能力を高めたければ単純に SV (Space Velocity) を下げれば良いと考えるだけなのだが、彼らの世間に通用するものづくりの基本精神には脱帽した。特に同社側リーダー (主任研究員) である三浦真一氏の「人生のうちの数少ない仕事のチャンスにおいて、この技術を確実に実用化しなければならない」と寸暇を惜しまないバイタリティには圧倒される。大学では空想でものを言っていれば済むところが、技術開発というものの神髄を教えられていると言ってよい。普通、大企業は体面を保つばかりで動きはほとんど鈍いことが常であるものの、同社にはそう感じさせない独特の雰囲気があるのかもしれない。

こうして COA-MIB プロセスは平成 21 年度から環境省地球温暖化対策技術開発事業の支援を得て 3 Nm<sup>3</sup>/h 処理能力のベンチスケール (図 4) まで発展し、水素回収率 85% を達成して目標性能を実証するに至った<sup>5)</sup>。別途、ラボスケール試験機 (0.1 Nm<sup>3</sup>/h) にておよそ 800 回もの吸放出サイクルで性能劣化の兆候は全くないことが検証されている (平成 23 年 7 月末時点)。同社では DSS 運用を実現させ、最終的には 100 Nm<sup>3</sup>/h 級規模で水素ステーションや定置用集中型水素供給装置としての実用化を見据えている。我が子可愛さを差し引いても、他競争技術に比べて動特性を含めてのトータルパフォーマンスはずっと優れたものになるだろうと予想している。



改質ガス中水素量	CO-PVSA出口水素量	MIB放出水素量
406.7Nm <sup>3</sup>	364.2Nm <sup>3</sup>	346.7Nm <sup>3</sup>
CO-PVSA回収率	MIB回収率	総合回収率
90%	96%	85%

図 4 ベンチスケール COA-MIB プロセス試作機外観と性能

#### 4.2 純水素 PEFC の負荷追従性

従来の熱機関を主流とした発電手段に比べ、電気化学反応の受動的で柔軟な動特性に意義の大きさを感じていた筆者は、以前から純水素燃料電池 (HFC: Hydrogen Fuel Cell) 開発の重要性を主張していた。あるとき、関連予算計画に携わる方から「それはまだ先の話だ」と言われたことがある。ロードマップが固まり、とても回すお金がないということなのだろう。しかし、燃料電池は純水素で用いられたのが起源であること、改質装置と併用する方が技術的には難しいことで、筆者個人は先に確立すべきであったと考えている。もっとも自動車メーカーは内々にこの技術を獲得しているものの、製品はおろか情報に触れる機会さえない。世界的にも HFCの方が先行しているが見えるのだが、我が国ではガス・石油事業での商用化が優先されてきた。教材として小型で簡単な燃料電池が販売されており、誰でもが入手でき水素さえ投入すれば容易く発電する、そんな姿こそが技術の究極と思うのは筆者だけなのだろうか。かつて一世を風靡したカナダ Ballard Power Systems 社の NEXA (1 kW 燃料電池) は良くできており、コージェネレーション対応ではなかったが、起動や負荷追従性能を含め発電装置としては望ましいものであった。我が国のメーカーの方に HFC の製作可能性を尋ねると、概ね「やればできる」と回答される。技術は経験やノウハウの蓄積の上に成立するので、筆者が望む性能を実現する HFC が完成するまでにはある程度の努力と時間を要するであろうと予想する。

簡単であるか困難であるかはおいておくとしても、国としての HFC 技術開発は進められていないため、本質的にどれだけの能力があるのか定量的なデータはほぼない。これだけエネファームが普及している中で、原始的な HFC の工学的に役立つ本質的な性能データが入手できないのはおかしな事実である。なければ仕方がないので自分で調べるのみとの訳で、HFC の過渡的な出力応答特性を実験で評価している。再生可能エネルギー利用電源の出力変動はそれほど速い現象ではなく、実際に留意すべきは負荷の on-off に伴う変化である。特にスイッチが入るときは、電気回路特性に従って電流が指数関数的に増加する。供給側の HFC はその電流を出力するが、システム内では物質移動や熱移動の遅い現象の上で反応条件が決まることもあり、律速によって追従できない可能性がある。三相界面での活物質の不足によって、代わりに電極であるカーボンが消費され劣化が進むことが HFC で懸念される点となる。マクロに検証する方法は、急峻な電流の立ち上がりにおいて電圧を維持できているかを見ることである。この考え方を基に実験装置を組み立て、電子負荷装置でステップ状の負荷を模擬的に与え、電圧変化を詳細に調べた。実験上の電気回路および電子負荷装置の特性を含めて、0 から定格電流まで 6.6 ~ 8.8 μ秒の

時定数での高速立ち上がりを実現し、電圧の詳細な変化においては単調減少するのみで、一瞬たりとも最大出力電圧 (0.6 V/cell) を下回る極小値を出現するような過渡応答はなかった<sup>6)</sup>。すなわち、HFCから定格出力以内で最大限の出力アップを施しても、十分に電力を供給できていることが認められた。水素供給源がMHであっても適正な供給条件が設定されていれば、HFC自身は極めて高い応答性能を有していると言える。ただし、電極構造内のミクロの視点では活物質不足が生じている可能性も考えられ、電極消耗の証拠を示すCO<sub>2</sub>発生があるかどうかは今後解明する予定である。通常はコンバータを介して負荷と接続されたり、回路が長かったりなど、並列にキャパシタンス (静電容量) 成分、直列にインダクタンス (誘導係数) 成分が比較的大きく含まれることから、ここまでの追従能力があればほぼ差し支えないだろう。仮説として系内で形成される電気二重層<sup>脚注2)</sup>がバッファの役割を担い電圧変化を緩和しているのではないかと推察している。

#### 4.3 直流連系ネットワーク

太陽電池 (PV) と燃料電池 (FC: Fuel Cells) は言うまでもなく直流 (DC) 出力で、分散型電源として需要地 (オンサイト) で用いるのであれば、DCのまま連系するのが容易である。交流 (AC) は長距離を効率良く送電するために必要な方式であって、必ずしも電気利用において必須でなければならない理由はない。一般の負荷機器も本質的に内部ではDCで使われており、昔は誘導モーターが利用されていた電化製品も最近は省エネや高精度制御のためにDC区間を含むインバーター方式が主流である。それゆえ、ACを基盤としたこれまでの枠組みをリセットし、DCを媒介しての新しい方式を構築し直すと極めて合理的な低損失かつ省物質のエネルギーシステムが創造できる。DC→ACまたはAC→DC変換部が省かれることのみが目が行きがちであるが、筆者はむしろ各種電源が連系されている場合に出力能力に応じて無瞬断で接続・解列の選択ができることに魅力を感じている。PVとFCは元より、やはり普及してくるだろう電気自動車用を含む電力貯蔵用電池の間、さらにはAC→DC変換しての電力システムとの融通がとても簡単にできるようになる。極端にはスイッチとダイオードだけで出力制御と保護ができることから、AC連系の複雑さとは比較にならないほどである。ACを基調とすると電力システムの電圧波形を基準とせざるをえず、電力システムが停止した途端に出力不能に陥るばかりか、アンシラリーサービス<sup>脚注3)</sup>と称してその分の代

償を要求されてしまう。単なる電源の一つとして対等の関係とするにはDCが望ましい<sup>7)</sup>。

直流連系する場合に電源も負荷もできるだけ多くをまとめる方が、あらゆる面で合理的なシステムとなる。現在の電力システムが最たる仕組みであり、電気エネルギー供給に関しては、効率、経済性、信頼性がかなりのレベルにまで達したことで、現代人はそれら恩恵を享受している。けれども、巨大すぎることで画一性と硬直性を生じ、万一のときの脆弱性を露呈するに至った。特に我が国の地域独占体制は偏った主従関係をもたらし、比較的高い電気料金など様々な弊害が指摘されているところである。オール電化の極端な普及はこれらを助長する可能性が大で、総合的な観点では好ましいことではない。エネルギーは、複数の供給源を持つこと、それらが対等の関係であること、さらにユーザーもしくはこれに近い階層である程度の取り扱いができる規模において、自らが望むコンセプトに則るセキュリティの確保された、自立、自律、柔軟なシステムになりうる。ネットワーク化するとアグリゲーション効果で変動が相対的に小さくなり、その結果、供給源と必要バッファ容量が減らせ、運用制御もより容易になる。水素供給に関してはスケールメリットで必然的に、熱供給では範囲が限られるものの融通で余剰や不足が減少し、総合的に効率を始め運用制御性と経済性が向上する<sup>7,8)</sup>。これら、直流、水素、熱の三つのネットワークが、十～数百世帯程度のローカルでの範囲で構築され、電力システム、ガス・石油供給、再生可能エネルギーでお互い緊張感のある協調関係を築く。これが、筆者が理想とするエネルギーシステムである。

直流連系およびエネルギーネットワーク化において、“言うは易く行うは難し”であることは十分承知している。先のような主張をすると、DCはアーク発生や感電が危険ではないか、できあがってしまったシステムを変革するのは不可能との意見が必ずと言っていいほど出てくる。かつてDCで電気事業を始めたトーマス・エジソンが、ニコラ・テスラやジョージ・ウェスティングハウスが進めたAC化の台頭を阻むために行った、電流戦争での論拠のないキャンペーンと同じだ。結局は変えたくないのが本音に過ぎず、優れたところは認め、欠点は技術的に解消することを考えるのが科学技術に係わる者に求められる姿勢なのだ。何よりもエネルギー革命には思い切ったパラダイムシフトを要することを認識すべきであろう。人間とはいつでも自分が望む方向のための理由を後付けで考えるのである。既存のものをわざわざ更新することは確かに現実的ではないだろう。しかしながら、毎年、新

脚注2) 電極と電解質の界面に正負の荷電粒子が層状に対となって形成された状態で、電磁気学的にはコンデンサと等価である。

脚注3) 電力供給そのものの主サービスとは別に電力品質を維持するための、系統制御、スケジューリング、無効電力供給、電圧制御、周波数制御、瞬断・運転予備力等の副次的なサービスの総称。



築の建物はどれだけあるだろうか、そこを対策するだけでも意味はある。ましてや不幸にも被災した街は復興つまり革新のチャンスでもあり、単なる復旧にしてしまっ  
ては正に元の本阿弥と言わざるをえなくなる。

5. 統合エネルギーシステム開発プロジェクト

上記の考え方を実現する総合的なエネルギーシステムを構築したいと願い、あらゆる関連公募で提案していたのだが、散々空振りを繰り返した挙げ句、やっと平成21年度から大型プロジェクトとして実施する機会を得た。本学でも前例のない、生命環境科学研究科（藻類による

バイオマス燃料生産）、数理物質科学研究科（バイオマス由来オイルの改質触媒開発）、システム情報工学研究科（カーボンニュートラル対応エネルギーシステム（CNES: Carbon Neutral Energy System, シーネスと呼称）開発）の、完全な異分野三研究科（平成23年10月より教員所属が全学的に《研究科・専攻》から《系・域》へ組織改編）横断プロジェクトとして、文部科学省からの支援を得た。プロジェクト全体では、本学を中心として、国や自治体、研究機関、企業など広い範囲で連携して、次世代環境エネルギーに関する技術開発の国際研究教育拠点を目指す。CNESは、再生可能エネルギー源を最大限に取

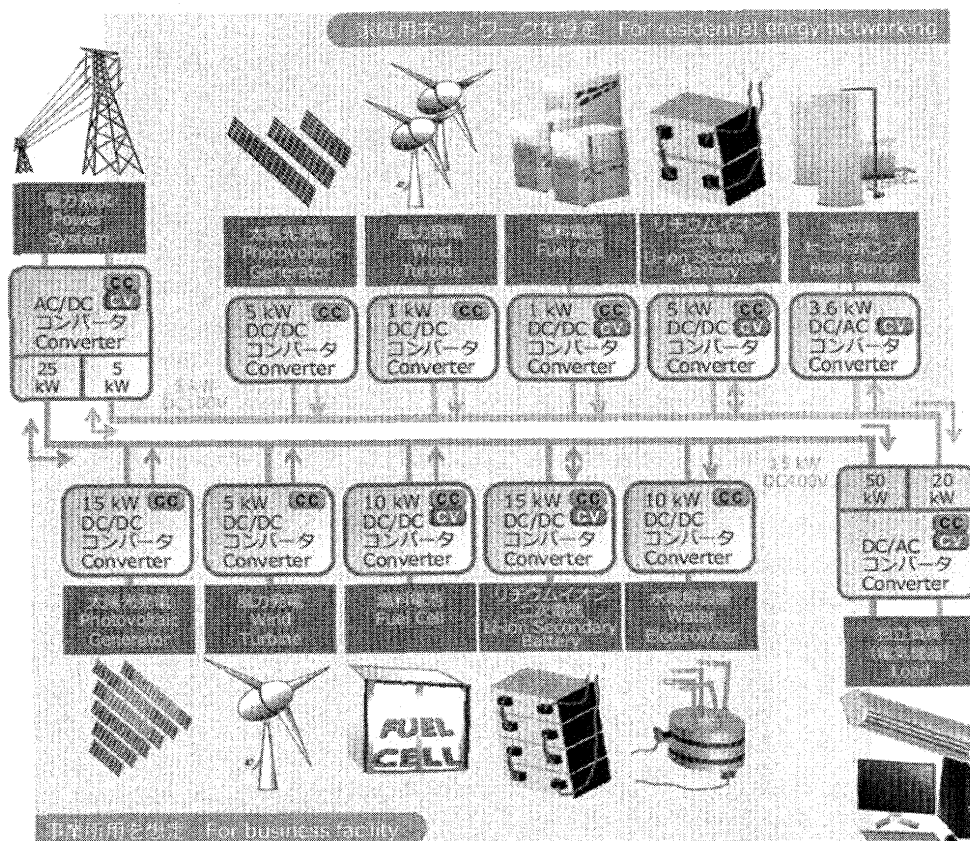
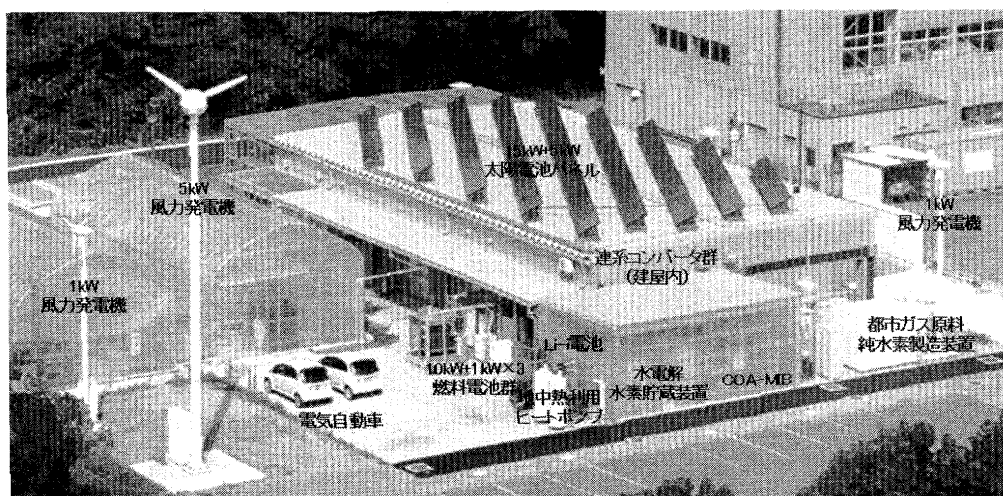


図5 カーボンニュートラル対応エネルギーシステム（CNES）の外観および構成模式図

り入れ、バイオマス燃料から転換した水素エネルギーを用いて、オンサイトで需給調整を行うベストミックスのエネルギーシステムを確立することが目標である。狙いは環境調和型エネルギー技術の大規模社会導入であり、従来の枠組みに囚われずに限りなくゼロエミッション化に近づけようとするものである。基本的には、先述した再生可能エネルギー利用電源を、主導的にHFC、補助的にリチウムイオン (Li-i) 電池で連系して、供給を安定化させることにある。その他のエネルギー貯蔵手段として、熱と酸素利用を併用する水電解・MH水素貯蔵、地中熱または排熱利用ヒートポンプによる温冷熱貯蔵を加えている。水素製造手段には都市ガスの水蒸気改質とPSAを装備し、バイオマス由来低質水素を効率良く精製するためのCOA-MIBプロセスも設けた。全景および設備構成を図5に示す。

直流連系と純水素のネットワークで構成されるCNES設備の特長を以下に改めて総括する。

- ①直流では電圧の調整のみで出入力の方向や流れを制御できるので、発電機器の選択や分担調整といった連系が容易で安定性が高く、供給信頼性が向上する（交流では電圧だけでなく、周波数、波形、位相もコントロールしなければならない）。
- ②PV、FC、Li-i電池など分散型エネルギー機器、そして負荷機器のほとんどは直流利用であるため、合理的システム設計により電力変換プロセスが削減でき、簡素化されるとともに損失が低減する。

- ③集中的に純水素を製造することで転換効率が高まり、FCでの改質装置が省略され燃料利用率をほぼ100%とすることが可能である。発電効率が大きく向上すると同時に、負荷追従の応答性が格段に上がる。
- ④燃料がバックアップする需給調整機能をFCに持たせることで、調整能力が大幅に拡張される。再生可能エネルギー起源の不安定出力電源の大量導入に資することが期待され、コージェネレーションと合わせて相乗的な環境負荷低減が見込める。
- ⑤純水素、直流電力、熱のネットワークを構成することで、負荷側で平準化とパターン化が進み、供給側では定格出力容量が減らせ運用制御がより楽になる。さらに自律分散制御を適用することでシステム変更の柔軟性が増し、災害発生等の非常時にも機能健全性を保つ確率が高い。

以上により、低環境負荷、高信頼性、低コストに加え、安全、安心を兼ね備えた究極のエネルギーシステム(図6)を実現することを意図する。エネルギーフローの距離感を加えた概念は図7で表される。同設備は平成23年3月に竣工したばかりであり、各要素機器の動作特性を把握しハード面での改良を加味しながら、運用や容量計画など、とりわけソフト面での開発が主体になる。設備から創り出される電気を始め、熱およびCO<sub>2</sub>は藻育成に還元することも想定している。平成22年度からは、経済産業省受託(日揮からの再委託)研究として、蓄電複合システム化技術開発(大型商用施設向け蓄電システムのEMS

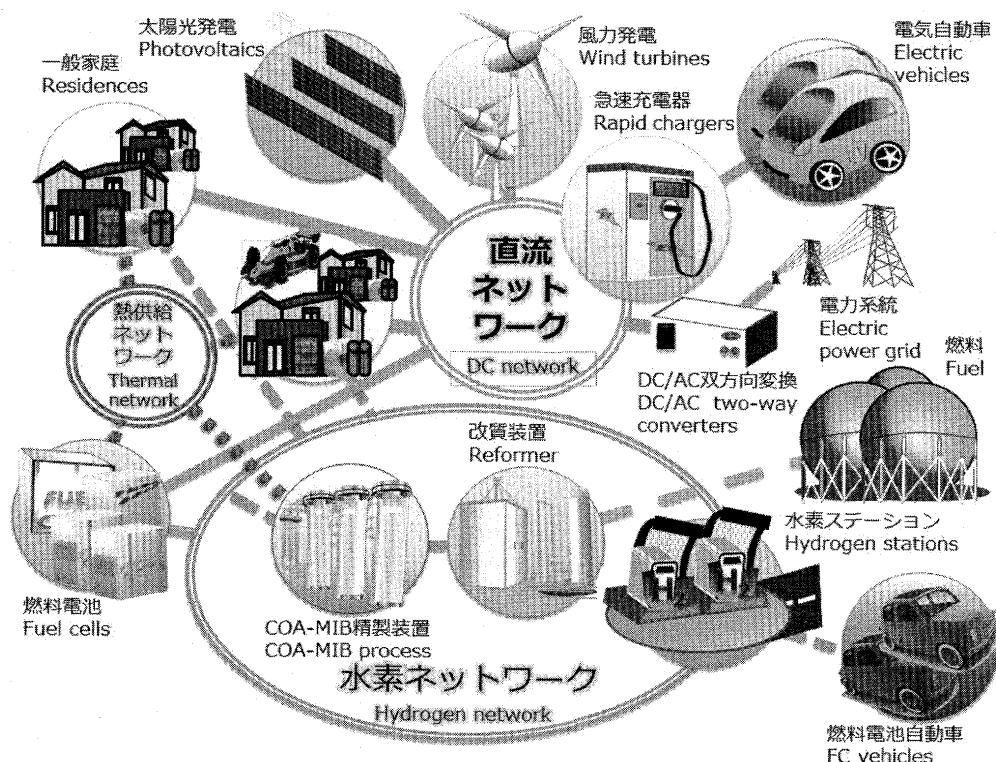


図6 エネルギーネットワークの実用イメージ



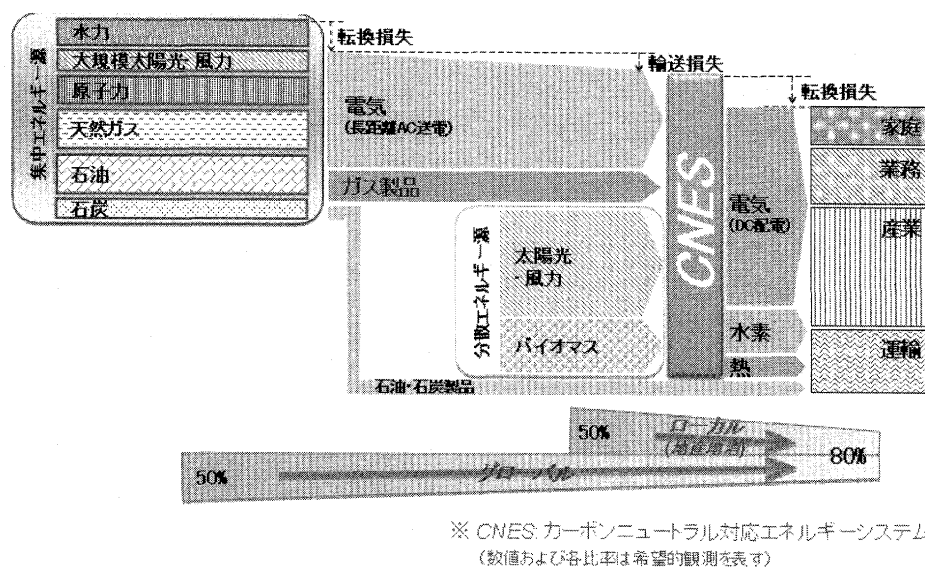


図7 地産地消を主とするエネルギーフローの概念

開発)も組み込んだ。当然ながら、受ける印象はいろいろあるだろう。それこそが頼もしいのだ。「ここはおかしい」、「自分ならこうする」、「一緒にやりたい」など、様々な想いを馳せ廻らせ考えてくれたのならしめたものである。緊張感を持ちつつ自由闊達に議論を戦わせることができるなら未来は明るいに違いない。

## 6. まとめ ～持続可能性を追求するために～

本稿は、エネルギー工学の研究開発ならびに教育に携わる筆者が、現在進めるCNES開発プロジェクトに至る考え方や経験を基に、これからのエネルギー技術がどうあるべきかを考えるそれぞれの契機になれば本望であるという思いで執筆した。いろいろ反論もあるであろうし、筆者の提案が唯一無二の方法であるとも思っていない。革新を狙うということは様々な壁との戦いであることを述べたかったのである。ACや燃料媒体等既得権、細分化された縦割り組織、ロードマップのように柔軟性の乏しい開発シナリオなど、変革を求めながらも革新性を受け入れるスキームは貧弱なのだ。新規性重視と言いながら、突飛なアイデアを提案すると、判断する能力もないのが実情である。初めて出会うものだから、海の物とも山の物ともつかないのが至極当たり前ではないか。提案審査も論文査読も同じであるが、最も通り易いのは現状の技術にちょっとしたオリジナリティを加えてレベルを多少高めたというような内容である。環境、資源、経済とも制約が認識されるようになった今、悠長に進めたり、ないものねだりをしたりしている場合ではない。誰もが勝負できるチャンスがある中で、できることを確実に実行していくことが大事である。

今回、「持続可能」という非常に難しいテーマを扱った。地球上では人間だけが環境を蝕むいわば癌細胞と言われ

ている。ジェームス・ワットが蒸気機関を発明して以来、エネルギーや動力を意のままに使い、一部である先進国は豊かな経済の恩恵を受けてきた。現経済は大量生産と大量廃棄で成り立っており、文明は栄えた原因が衰退の要因になる。CO<sub>2</sub>をはじめ汚染の反逆か生存力を無くしての自滅か分からないが、筆者は数百年後ましてや千年後以降の人類文明が現代以上のもの(かつて漫画で見た未来風景)となっていることが想像できない。現状で予想されるエネルギー資源が長くても数百年に満たないからである。核融合発電や宇宙太陽光発電(SSPS: Space Solar Power Systems)が実現して、無限のエネルギーを獲得できているのであろうか。ロボットが家事をし、空飛ぶ車が行き交い、皆が宇宙旅行をする、どれだけのエネルギーが要るのか想像を絶する。とにかく人類が生来エネルギー多消費志向なのは論を俟たない。技術には必ず超えなければならない壁があるように、自然界は決して人間の欲望にはフレンドリーではなく、むしろ試練を課す。一つ言えることは、技術開発も人間自身も自らのための近視眼的な我田引水をせずに、人類ひいては生きとし生けるもの全体のことを考えれば方向性を誤ることはないであろう。宗教じみた表現をすれば、他の不幸の上に成る幸福はない。生きるために必要なこと以上の贅沢をできる限り省くことが、本質的な「持続可能」なのだ。まさに「Holistic」の思想、言い換えれば全体最適化である。

しかし、極論へのハードランディングは現実的な解ではないので、これからの活躍を期待する若手研究開発者へ伝えたいことを列挙しておく。①自分が望む技術開発を進める、②否定要素がない限り諦めない、③仲間は大事(ただし、ムラ[互助会]化はNG)、④常に真理と普遍性を振り所とする、⑤初心を思い出しながらゴールを想像

する、⑥工学では実用不可なら失敗と銘ず、⑦生産性の高い仕事を優先する、ことである。技術だけに依存して“持続可能”を求めるのはあり得ず、経済のあり方を踏まえ社会活動そのものを見直す必要はあると思われる。一方、研究開発に従事する者は、皆から未来を託され、新しいことにチャレンジできる素晴らしい舞台を与えられているのであり、その意味ではいつも謙虚で感謝の念を持ちつつ世の中への貢献を意識していなければならない。技術開発に不可欠なことは“気概”と“執念”で、それを“持続可能”なものに繋げるのは“想像力”であり“思いやり”であると結論付けられよう。志ある者達よ、今こそ決起し、自ら思い描く美しく和やかな未来を創ろうではないか。

#### 7. おわりに

三百万年ともいわれるヒトの歴史の中で、エネルギー技術が享受できる時代および国にいることは奇跡に近い運命である。今を生きる者は、グローバルにだけではなく子孫ら後生に対しても責務を負っている。研究開発、経済活動、政策立案に携わる者、一般消費者を含め、それぞれの立場で日頃から努力を積むことが、“持続可能”な解を得る最も近道ではないかと思う。あらゆる面での“生きる力”を取り戻すことである。筆者自身も自らの願望ばかりを追いかけず、エネルギー工学の必要性や魅力を宣伝し、チャレンジする志望者を増やすことに努めたい。

失敗を恐れず思い切った提案ができ、夢があり自由でスケールの大きな研究開発を行える、そんな環境を整備する役割を担わなければならない人生のフェーズになったのかもしれないと感じた次第である。

筆を置くに当たり、日本エネルギー学会第9回エネルギー転換・利用に関わる若手研究者の勉強会での講演ならびに本稿執筆の機会を与えてくださった、産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門 倉本浩司氏、高木英行氏を始め幹事会各位に深く感謝の意を表したい。

#### 文 献：References

- 1) 石田政義, 燃料電池, 8(3), 125(2009)
- 2) 石田政義, 日エネ誌, 80(2), 48(2001)
- 3) 石田政義, 電気学会論文誌B, 121(8), 1036(2001)
- 4) 谷口行伸, 石田政義, 電気学会論文誌B, 126(12), 1267(2006)
- 5) 三浦真一, 藤澤彰利, 留川脩平, 石田政義, 第18回燃料電池シンポジウム講演予稿集, B16, 131(2011)
- 6) 土井雄介, 朴大欽, 石田政義, 藤澤彰利, 三浦真一, 電気学会論文誌B, 131(12), 2011年12月掲載予定
- 7) 周卓敏, 石田政義, 前田哲彦, 電気学会論文誌B, 131(8), 662(2011)
- 8) 石田政義, 再生可能エネルギーのすべて(電子材料7月号別冊, 工業調査会), 17(2010)