

3. 環境・エネルギー分野

3. 1 環境・エネルギー分野の概要

現状の我が国のエネルギー需給構造を把握するために、エネルギー・フロー (図1) を見ると、電力部門では、約9 EJ/年の一次エネルギー源から3.3 EJ/年の電力を得るに留まっており、発電や送配電における損失が大きい。電力への転換効率の改善が課題である。石油を燃料に転換する過程での損失も大きく、約1割が排熱となっている。一方、運輸部門ではとりわけ自動車における熱としてのエネルギー損失が大きい。暖房や給湯として使われる低位熱需要に対して多くの電力が使われている現状も改善の余地がある。そして、再生可能エネルギーは一次エネルギー源としては、いまだに4%と小さな割合を占めるに過ぎず、2012年7月にFITが開始されて以降、太陽光発電を中心に飛躍的に拡大しているが、FIT賦課金による国民負担の抑制も検討が求められている。この図から社会的課題から見る研究開発の方向性として図2の8点にフォーカスできる。

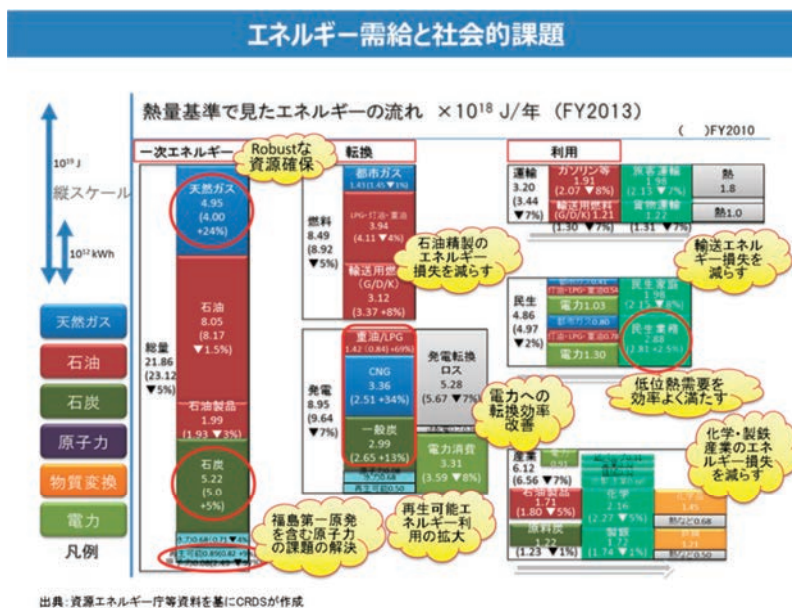


図 1

一方で、我が国は化石資源に乏しく、ほとんどのエネルギー源を海外からの輸入に依存している。一次エネルギー源の調達においては原油の中東依存度が約90%に及び、エネルギー供給体制には根本的な脆弱性を抱えている。地政学的リスクを踏まえ、ロバストな資源確保のための対策強化が必要である。また、2013年は約28兆円もの国富を費やして輸入したエネルギー資源(約22 EJ/年)が最終消費されるまでには、さまざまなエネルギー損失が生じ、有効に使用される割合は4割程度と見積られる。

以上のことから、「経済効率性の向上 (Economic Efficiency)」による低コストでのエネルギー供給のみならず、「安全性 (Safety)」を前提として、「エネルギーの安定供給 (Energy Security)」

を実現し、同時に「環境への適合（Environment）」を図る、いわゆる「3E+S」を同時に克服するための取り組みを進めることが重要であることは言うまでもない。

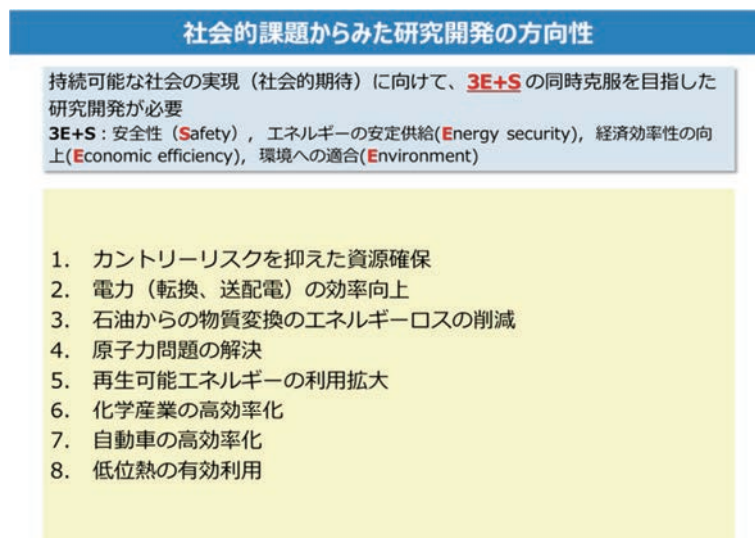


図 2

これらの研究開発の方向性に資する研究開発領域として、次の俯瞰報告書に向けたユニットの俯瞰活動では約 30 の領域を抽出しているが、それらの中から、昨今特に社会的に大きく注目され（動きがあり）、またはこれから問題が顕在化するであろう主要なものとして、下記の 3 つの研究開発領域に焦点を当て、現在のトレンドとトピックスを概説したい。テーマ①は、課題 1 や 5 に対応するものである。②は課題 6 に対応し、③は課題 5 をはじめ、電力自由化（発送電分離）や IoT の進展を見据えた将来への対応に向け新たな課題として取り上げた。

これらは COP21 パリ協定を受けて策定されている、抜本的な温室効果ガス排出削減のイノベーションに向けた「エネルギー・環境イノベーション戦略（案）」の 9 つの柱のうち、「水素等製造・貯蔵・利用」、「革新的生産プロセス」、「エネルギーシステム統合技術」にも対応し、将来の低炭素社会を実現するために必要な研究という意味でも取り上げた。

- ① 水素社会の実現に向けた水素の製造・輸送・貯蔵・利用
- ② シェールガス革命時代の化学プロセス（メタン利用のための触媒）
- ③ 電力自由化と再生可能エネルギー大量導入時代のエネルギーネットワーク

なお、以下に「研究開発の俯瞰報告書（2015 年）環境・エネルギー分野」における 3 章の各研究開発領域との関係について述べる。適宜あわせてこれらの内容も参照されたい。

テーマ①は「水素エネルギーの利用浸透」、「次世代自動車の利用拡大と高効率化」、「高効率固体酸化物形燃料電池」、「中温作動の固体電解質による新規プロセス」が関係する。ここではこれらに跨る研究開発を「水素社会」という大きな視点で捉え直し、トレンドとトピックスの抽出を試みた。

テーマ②は「新規石油化学製品製造ルート」と関連する。その中でもシェールガス革命以降に注目される C1、C2 ケミストリーについての科学技術の動向を記載した。

テーマ③は「分散電源と再生可能エネルギーとの融合システム」、「エネルギーネットワーク技術」、「エネルギー消費実態の把握」、「ネットワークとビッグデータの活用」、「需要側資源を活用したエネルギー需給マネジメントシステム」、「消費者行動に着目したエネルギー利用の高効率化」が関連する。これらに細分化して記載された要素を大きく「エネルギーネットワーク」という形で捉え直し、IT や IoT による新たな価値の創造に着目した「超スマート社会」の観点から現状と今後の展望について記載した。

3. 2 水素社会の実現に向けた水素の製造、輸送・貯蔵、利用

(1) テーマ名

水素社会の実現に向けた水素の製造、輸送・貯蔵、利用

(2) 概要

低炭素社会を実現する上で重要な再生可能エネルギーは、現時点ではまだ量的インパクトが小さく、さらなる利用拡大のための技術開発が望まれている。再生可能エネルギーは、エネルギーを生み出す場所と使う場所との時間・空間的なズレが大きく、そのシフトのために、一旦貯めて運んで使う技術が望まれている。その際には、電力のままに貯める二次電池などの方法と、水素などの化学品を介して運ぶ方法が提案されており、とりわけ長期間・長距離の輸送のための技術として、水素を何かの形の化合物に変換して（蓄えて）運ぶ技術が注目されており、我が国ではこれをエネルギーキャリアと呼んで、国による重点的な研究開発が進められている。

エネルギー自給率の低い我が国にとって、多層化・多様化した柔軟なエネルギー需給構造の構築は極めて重要であり、水素はその実現に向けた重要なエネルギー源である。エネルギー基本計画においても「“水素社会”の実現に向けた取り組みの加速」が明記されている。

利用の代表例である燃料電池は、燃料電池自動車、家庭用などの分散型高効率電源として、さらには複合サイクル発電などと組み合わせた発電の高効率化への応用も期待されている。水素の普及にあたっては利用側の技術開発をいっそう推進し、水素の大量利用を実現することが重要である。

世界的な水素の需要としては、現在アンモニア合成が 50%、石油精製が 35%、メタノール合成が 9%となっている。わが国では、これら工業用水素に加えて、水素利用技術としてエネファーム（家庭用燃料電池）ならびに FCV（燃料電池自動車）を中心に燃料電池の市場化が進められ、水素の製造・利用について注目が集まっている。

水素を作る方法として、炭化水素の水蒸気改質による水素製造、石炭ガス化からの水素製造、再生可能エネルギー由来電気による水素製造、太陽光を活用した光触媒・光電極触媒による水素製造、などが知られる。現在、世界中で天然ガス（メタン）改質が全水素製造の 48%、ナフサの水蒸気改質（含む石化脱水素）が同 30%を占める（残りは石炭ガス化・コークス炉ガスが 18%、電解が 4%である）。ナフサ水蒸気改質、ソーダ電解副生水素はいずれも 20 円程度/Nm³と比較的安価である。コークス炉ガスからの水素は濃度が低い（6 割弱）が、価格は 20 円弱/Nm³とやはり安価である。天然ガス水蒸気改質はこれを上回り 30 円程度/Nm³である。

一方で、低炭素社会の実現（化石資源からの脱却、再生可能エネルギー利用）という視点からは、再生可能電力による水分解や、光触媒による水分解、バイオマス資源からの水素製造などが期待されているが、現時点ではこれらによる水素は非常に高価なものとなっており、普及の足かせとなっている。

前述のエネファームは政府目標として 2030 年までに 530 万台、FCV は 2025 年までに 200 万台といった数字が挙げられている¹⁾。これらが導入された場合、エネファーム 530 万台は国内全エネルギー消費を 0.6%程度削減、FCV200 万台は国内全エネルギー消費を 1.4%程度削減する量に相当する。よって、全エネルギー消費の半分近い電力（発電）分野に、海外からの再生可能エネルギー由来水素が入ってこない限り、大きなインパクトとなりえないことは留意が必要である²⁾。

以下では、水素に関する研究開発を各チェーン（製造、輸送・貯蔵、利用）で概説する。

(3) 国内外における研究開発の動向

(3-1) 水素製造技術の国内外における研究開発動向

前述のとおり、現時点ではほとんどの工業的な水素製造は炭化水素の水蒸気改質などによるものであり、化石資源の消費（＝二酸化炭素の放出）を伴う。ここでは、今後も研究開発要素の大きい再生可能エネルギーの利用の観点から現在の水素製造技術の動向を整理し、今後の展望をまとめる。

① 再生可能エネルギー由来電力からの水素製造

再生可能エネルギーとしては、風力発電、太陽光発電、植物生育を介したバイオマス利用などが提案されている。風力の適地は、地上 80 m での平均風速が 9 m/s 以上の地域が南米パタゴニア、グリーンランド、欧州北部、アフリカ東端などにあり、また太陽光は適地が砂漠地域を中心に広く分布している。これらによって得られた再生可能エネルギーによる電力で、水を電気分解して水素を得ることが考えられている。再生可能エネルギー由来の水の電気分解の方法としては、アルカリ水電解、固体高分子形水電解、固体酸化物形水電解（SOEC）などを始め、電気化学的触媒反応などが展開されており、今後の展開が期待される。

現在は固体電解質の開発に注目が集まっており、水を表面に有する構造によるプロトンキャリア型材料、格子内の欠陥を利用した酸素イオン伝導型材料がそれぞれ精力的に検討され、固体電解質の温度空白域であった 300～500 °C のレンジを埋めつつある。この領域にて作動可能なイオン伝導材料が発見された時には、水素を絡めた多くの反応が実現可能になり、今後の研究の進展が期待される³⁾。

再生可能エネルギー由来の水素活用に関する海外の事例としては、ドイツにおける SolarFuel プロジェクト（私企業によるもの）や、米国 DOE の ARPA-E における Electrofuel プロジェクト（2010～2013、13 機関、約 45 億円）などが知られる⁴⁾。前者は、余剰となる再生可能エネルギー由来の電力と、工場などから回収した二酸化炭素から、化学反応によりメタンを生産し、従来からある都市ガスパイプラインに流す（Power to Gas と呼ばれる）ものである。2009 年 11 月に 25 kW の試作機を作り、再生可能電力と水と空気中の CO₂ から、メタンを 40% の効率で作ることに成功した。現在 20 MW クラスを目指してプロジェクトが進められている。後者は工場などで排出される二酸化炭素を回収した上で、再生可能エネルギー由来の電力から水を電気分解して得られた水素などを用いて、バクテリアと電極触媒を活かしてブタノールや C₈ 炭化水素（ガソリン類似化合物）を作る研究プロジェクトである。これが実現すると、従来の光合成に比べ、暗所で作動可能であり、土地・日照・人件費の制約が無いこと、施肥が不要であること、バイオハザードを閉鎖系で管理可能なこと、などがメリットとなり、光合成に比べ 10 倍程度の効率を狙うことが可能とされている。またドイツでは Hybrid Power Plant プロジェクトが進められており、石油・ガス・電力などがリンクして、クリーンな電力・熱・水素の同時供給を検討している。

② 光触媒・光電極触媒による水素製造

自然界では植物による光合成が進んでいるが、人工的には、本多-藤嶋効果⁵⁾に端を発する光触

媒による水分解、ならびにそれに関連して CO 生成反応、ギ酸生成反応がすでに実証されている⁶⁾。これら一連の反応を分解して考えると、本質的に重要な反応は光による水の分解反応である。水の分解には 1.23 eV 以上の光エネルギーが必要であり、波長から考えると 1000 nm 以下、すなわち紫外から近赤外の範囲が必要となる。更には、反応速度から考えると紫外と可視光の利用がメインとなろう。紫外光を用いた光触媒としては、 d^0 型光触媒 (Ti^{4+} , Zr^{4+} , Nb^{5+} , Ta^{5+} , W^{6+}) 並びに d^{10} 型 (Ga^{3+} , In^{3+} , Ge^{4+} , Sn^{4+} , Sb^{5+}) が知られる。可視光を用いた光触媒としては Rh ドープ $SrTiO_3$ やオキシナイトライドが日本の研究者によって発見され有名になっている^{7, 8)}。Z スキーム法という方法は、1 つの電子または正孔を 2 つの光子で 2 回に亘り励起し、1 分子の水素生成に 4 電子を用いるが、材料の選択範囲は広く、近赤外の利用も可能である。最近では光電極触媒についても精力的に研究されており、国内民間企業を中心に精力的な研究が進められている。人工光合成分野は我が国が世界トップグループを形成しており、今後の展開が大いに期待される場所である。

(3-2) エネルギーキャリア(水素変換・輸送技術)の国内外における研究開発動向

水素は気体であり密度が低いため、効率よく貯めて運ぶためのキャリア (エネルギーキャリア) 候補として、水素を冷やして液体にした液体水素、水素と窒素から作ることができるアンモニア、石油留分の一つである芳香環に水素を付加して運ぶ有機ヒドライド、の 3 つがある。

アンモニアは世界中で肥料などのために年間 1 億 6000 万 t が生産されている。エネルギーキャリアとして考えた場合、利点として、脱水素して用いることも直接燃焼して用いることもできる点、使用後に窒素になるため水素化する工場へ戻す必要がない (大気を介して循環できる) 点が、欠点として毒性、強烈な匂い、燃えにくさ、が挙げられる。燃えにくさについては、今後の研究開発により、アンモニア直接燃焼が高効率に進められることが期待される。ハーバー・ボッシュ法が確立しており、高温高压であるという制約があるものの、エネルギー効率は高い。現在のハーバー・ボッシュ法においては、消費エネルギーのほとんどは水素製造の過程で必要となっている。ハーバー・ボッシュ法によるエネルギー消費は、世界の全エネルギー消費の 1~2 % 程度を占めると言われ、化石資源の改質による水素製造から、水と空気と再生可能電力による電解合成へとシフトできれば大きな意義がある。今後も新規なアンモニア電解合成などの展開が期待される。

有機ヒドライドに関しては、近年、民間企業によるメチルシクロヘキサンという化合物を水素キャリアとして用いる方法が注目されている。これはガソリンにも含まれるトルエンという物質を水素化することによって得られる。内閣府が進めている SIP エネルギーキャリアプロジェクトにおいても、2020 年東京オリンピック・パラリンピックにおける水素インフラ整備をにらみ、メチルシクロヘキサンをキャリアとする水素ステーションの実証化を進めている。メチルシクロヘキサンは備蓄に適した物性を有し (常温で液体で安定)、エネルギーのほぼすべてを輸入に頼る我が国として、リスク回避の観点での現在の石油備蓄に代わる再生可能エネルギー備蓄材料として好適であると考えられる。今後の研究としては、脱水素に要する熱が、得られる水素の燃焼熱の 1/4 近いことから、吸熱反応の熱マネジメントによるエクセルギー回生と、そのための低温作動可能な高性能触媒開発、それも白金など貴金属を用いない触媒の開発が望まれる。

前述のとおり、現時点での我が国のエネルギーキャリア開発は液体水素、アンモニア、有機ヒドライドの 3 つに集約されているが、それ以外にも、ジメチルエーテル、メタノール、メタン、水加ヒドラジン、FT 合成燃料、ギ酸、シュウ酸、金属水素化物、金属酸化物などが知られ、それぞ

れ研究開発が進められている。

(3-3)水素利用技術の国内外における研究開発動向

燃料電池は、電解質膜やその中を通過するイオンの種類によってリン酸形（PAFC：Phosphoric Acid Fuel Cell）、熔融炭酸塩形（MCFC：Molten Carbonate Fuel Cell）、固体高分子形（PEFC：Polymer Electrolyte Fuel Cell）、固体酸化物形（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）の大きく4種類に分類される。

PEFCは高出力密度化や小型化が可能であり、室温付近で動作することから自動車や家庭用定置電源などにおいて有望な電池である。特に、2014年末にはトヨタ自動車から世界初の本格的な量産車「ミライ」が発売され、今後各社からも発売が予定されており、そのための量産技術開発や水素インフラ整備が加速されている。700～900℃付近の高温で作動するSOFCは、家庭向けのみならず、業務用・産業用や既存の複合サイクル発電と組み合わせて70%を超える超高効率発電の技術としても期待されている。天然ガスや石炭ガス化ガスなどの多様な燃料にも対応が可能であり、小型分散型から大規模火力代替システムまで広い適用性をもつことから実用化の期待が大きい。

経済産業省の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」（2014年6月）¹⁰では、2030年までの水素社会の構築の工程表を提示し、家庭用燃料電池や燃料電池自動車に加えて、クリーンな水素による発電を想定することで、より一層の低炭素高効率社会の実現を目指している。この中でPEFCは、さらに低コスト化と耐久性向上のための研究開発を実施し、乗用車のみならず商用車や鉄道・船舶・航空機などへ利用先を拡大することが期待されている。現在、家庭用燃料電池（通称「エネファーム」）の主流はPEFCであるが、より効率の高いSOFC型エネファームの商用化が2011年に始まり、業務産業用も2017年からの市販開始がロードマップに明記されている。

今後、本格普及のためには低コスト化と耐久性の両立が最大の課題となっている。一方、数kWから数100kWの中容量システムならびにそれ以上の大容量システムの開発も実施されているが、これらはまだ技術開発の途上にある。

家庭用燃料電池では、PEFCで総合効率が94～95%レベル（発電効率は40%程度）まで向上し、SOFCにおいては発電効率が45～46.5%での一般販売が開始されている。PEFCでは、定価200万円を切る普及機の販売が本格化するなど、低コスト化が着実に進んでいる。SOFCでも4万時間の耐久性を見通すことができるようになり、年間数千台規模の本格的な家庭用システムの市販が始まっている。両タイプを合わせた累積販売台数は10万台に到達しつつある。

燃料電池関連で大学を中心に実施されている代表的な研究開発課題としては下記のようなものが挙げられる。

- 1)電極触媒、電解質の原子・分子・ナノ構造制御およびその界面制御を行い、反応機構や劣化メカニズムを理解することで、低温作動用の高活性・高耐久性電極触媒層開発に向けた材料設計指針を構築
- 2)低コスト化を実現する非白金、低白金触媒の開発
- 3)中温（100～600℃）作動化や多様な燃料対応を可能にする高活性電極材料および機動性やコン

パクト化でメリットが出せる中温無加湿運転が可能な電解質の開発。

4)超高効率発電を実現し、高温作動における長時間安定性を有する、燃料電池のセル・スタック・システムの開発・実証

水素エネルギー利用技術の発展、例えば、白金フリー燃料電池の開発などにつながるものとして、九州大学を中心とする研究グループでは、自然界の水素活性化酵素であるニッケル-鉄ヒドロゲナーゼをモデルとして、新たなニッケル-鉄触媒の開発と、常温常圧で水素からの電子を電子受容体（フェロセニウムイオンやメチルビオロゲン等）に移動させることに成功している¹¹⁾。

水素貯蔵容器については、炭素繊維などによって強化・軽量化され、35 MPa と 70 MPa の充填圧のものが利用されているが、いずれも製造コストを大幅に低減するとともに、容器と充填の安全性に関わる国際基準調和を我が国が主導して推進する必要がある。また、水素供給ステーションに関しても、設置費用に約 4 億円を要するのが現状であり、それを半減することが目標とされている。ステーションでの水素供給に関わる課題については、水素供給・利用技術研究組合（HySUT）によって自動車メーカーとエネルギー企業が共同して行う実証事業を通じて解決が図られている。我が国では、4 大都市圏を中心に 2015 年までに 100 基のステーション設置が予定されており、諸外国の計画を大きく上回っている。しかしながら、これによって水素の供給によって営業収益を得ることは難しく、ステーションの維持費用も含めた国の支援が不可欠とされている。また、燃料コストについてもガソリン価格並みのレベルにまで低減しなければならない。さらに、このような新たな燃料の利用に当たっては、社会的な理解と受容性を促す官民の連携による努力も不可欠である。

(3-4)国際ベンチマーク

水素に関連したこれまでの国内プロジェクトとしては、1974 年からのサンシャイン計画（ならびにそれに引き続くニューサンシャイン計画）、1993 年から 2002 年まで実施された WE-NET（World Energy Network）、2002 年度から 2011 年度まで 2 期にわたって実施された JHFC（燃料電池の実証プロジェクト）、2004 年からの家庭用燃料電池・補機プロジェクト、2005 年からの FC-Cubic（固体高分子形燃料電池基盤研究センター）、2006 年からの Hydrogenius（水素材料先端科学研究センター）、2007 年からの HydroStar（水素貯蔵材料先端基盤研究事業）、2008 年からの HYPER-FC（山梨大燃料電池ナノ材料研究センター）、水素インフラを構築するために 2009 年に設立された水素供給・利用技術研究組合（HySUT）などが知られる¹²⁾。

日本で、2009 年度に世界で初めて家庭用燃料電池コジェネシステムが実用・販売開始されて以来、家庭用定置型電源・コジェネ利用において、我が国は世界を圧倒的にリードしている。

エネルギーキャリア関連に特化した政策としては、2013 年に経済産業省・文部科学省合同検討会の検討をベースに、METI「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」ならびに ALCA 特別重点プロジェクト「エネルギーキャリア」としてスタートした。その後、後者は 2014 年秋からは拡大して SIP（内閣府戦略的イノベーション創造プログラム）がスタートした。SIP は基礎研究から出口までを見据えた重点研究開発プログラムであり、エネルギーキャリアは 10 ある領域の一つとして取り上げられ、2014 年度は 11 グループに対して総額約 33 億円の予算が充てられている。これら研究開発は、2020 年東京オリンピック・パラリンピックでのショーケースとしての実

証を出口目標としている。また経済産業省「再生可能エネルギー輸送・貯蔵等技術開発」においては、低コスト水素製造技術開発（アルカリ水電解の高効率低コスト化＝25万円/Nm³/hの半減）などが進められている^{10,13)}。

2014年5月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、水素利用の推進が明記され、エネファームやFCVの普及拡大、未利用褐炭などの資源からの水素製造、水素発電の実用化などが盛り込まれた。

海外の動向としては、国ごとに大きな流れがある。EUは再生可能エネルギーから得られた電力を用いての水電解・電解合成に注力しており、北米はシェールガス産出を背景としたメタンからの水素製造と、CCSによって回収された二酸化炭素利用が、中国と豪州では石炭ガス化による水素製造が取り上げられている。EUでは、FP7（第7期プログラム）においてRelHyと呼ばれる新規電気化学法による水素製造、とりわけ固体酸化物形電気分解(SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell)による水からの水素製造が行われてきた。この分野ではドイツカールスルーエ大学などが先進的な研究をしている。再生可能エネルギーの水の電気分解からの燃料転換技術としては、ドイツにおける前述のSolarFuelプロジェクトなどが知られる。

水素の製造と利用の分野における我が国の科学技術の最近の動向としては、Scopus(2011-2016)によると、水素製造(キーワード Hydrogen Production)においては世界中で17144報の論文が報告されたうち、1位中国が4530報、2位米国が2882報、3位韓国が1037報、4位日本が979報、5位インド925報と続いている。また、機関別としては東大が78報で世界30位、34位京大(74報)、44位東北大(64報)が上位100傑に入っている。また水素利用(キーワード Hydrogen Utili~)においては世界中で2308報の論文のうち、1位中国が750報、2位米国が358報、3位日本が134報、4位ドイツが133報となっている。また、大学としては9位東北大(17報)、31位九州大(12報)、同東工大(12報)、38位北海道大(11報)などが上位に入っている。これらから鑑みて、大学の化学系におけるランキングと比べて本分野は世界的に見て優位なプレゼンスを示しているといえる。

(4) 参考資料

- 1) JST-CRDS 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野 CRDS-FY2013-FR-02、2013
- 2) 塩沢文朗、DND 研究所、2013
- 3) JST-CRDS 戦略プロポーザル 反応プロセス革新 CRDS-FY2014-SP-05、2015
- 4) JST-CRDS 戦略プロポーザル 再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの基盤技術 CRDS-FY2012-SP-08、2012
- 5) 藤嶋 昭、本多健一、菊池真一、工業化学雑誌、72, 108, 1969
- 6) 堂免一成、TRC ニュース 119号、2014
- 7) K. Domen *et al.*, Nature 440, 295, 2006
- 8) A. Kudo *et al.*, Chem. Soc. Rev., 38, 253-278, 2009
- 9) JST-CRDS 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2015年)

- 10) 経済産業省水素・燃料電池戦略ロードマップ
- 11) JST、九州大学プレス発表、2013年2月8日
- 12) 橘川武郎、エネルギー新時代におけるベストミックスのあり方、第一法規、2014
- 13) NEDO、エネルギー技術戦略ロードマップ、2014

3. 3 シェールガス革命と化学プロセス（メタン利用のための触媒）

(1) テーマ名

シェールガス革命と化学プロセス（メタン利用のための触媒）

(2) 概要

石油と天然ガスは、熟成時の地層の深さにより、1000 m 程度の浅さの場合石油に、それより深い場合は地中が高温高圧になるため有機物の分解が進み天然ガスとなる。それぞれは、平坦な資源の層を形成しているが、褶曲などで比重の違いにより石油やガスが上に移動して油やガスの溜まりを形成した場合、在来型の油田・ガス田として掘削される。一方、平坦な層のまま眠っている油・ガスは、これまでは掘削が出来ないと思われていたが、2009 年以降、水平坑井という技術と、水圧と化学的破砕による掘削（フラクチャリングと呼ばれる）技術が確立されたことにより、これら水平な層に眠る石油やガスを掘り出すことができるようになった。このようにして得られた石油がシェールオイル、天然ガスがシェールガスと呼ばれる。よって、シェールオイル・シェールガスの組成（成分）は、従来の油田やガス田から得られるものとは大きく変わらない。天然ガスの場合、分解しきった場合、最も小さい炭化水素分子であるメタンが、分解しきれなかった分子はそれより大きいエタンやプロパンといった飽和炭化水素分子として存在しており、これらが同時に噴出する。

このような背景の下に、米国を中心に多量の天然ガス（シェールガス）が産出され、米国ではガスの価格が大幅に低下し、ガスを熱源として用いる産業の競争力が増強し、投資・工業の成長・雇用の創出が促進されている。エタンを熱分解して化学基幹原料であるエチレンをつくるエタンクラッカーや、天然ガス主成分のメタンを水蒸気などと反応させた後にメタノール・アンモニアのような化学原料へと転換する製造プラントを新設する動きが活発である。またシェールガス増産による北米ガス価格の低下は、多くの石油化学製品・プラスチック・医薬品の低コスト化につながるため、世界的な産業構造の変化を引き起こしている^{1), 2)}。シェールガス採掘にともなう米国での天然ガス生産量は2010年時点で5 trillion であるが、2035年には13.6 trillion に伸びると推測されている。2010年時点で消費量が生産量より11%多い状況であったのに対し、2035年では生産量が消費量より5%ほど多くなると予測されている。これにより、アメリカにおける他国へのエネルギー依存性を大きく変化し、国内のエネルギー需要を天然ガスによって賄い得る可能性がある。さらにシェールガスによって精製炭化水素及び石油化学製品の製造部門へのコスト競争力が増すと考えられている。天然ガスの増大によって、当面の水素製造は水蒸気改質が主流な方法として用いられ続けていくと考えられる。シェールガスによる天然ガスの生産量増大は、脱石油依存の動きを加速させ、再生可能なエネルギー源への依存度を増やしていくことの一助を担っていくと考えられる。

このような変革の流れの中で、供給量が急増した天然ガスの主成分であるメタンを効率よく利用する技術が追いついていない問題がある。メタンは、これまでは都市ガスなどとして燃焼して用いられてきたが、前述の状況を受けて安価故にその利用法について研究が盛んに行われている。しかしメタンは、 $\text{CH}_3\text{-H}$ の結合エネルギーが439 kJ/mol と大きく非常に安定した化合物であるため、反応性に乏しい。メタンの利用法としては、燃焼などにより直接用いる方法として、発電による利用、圧縮天然ガス自動車による利用、製鉄などの利用があり、化学的に転換して用いる方法としては、間接的な転換利用法として、水素を製造し燃料電池などで用いる方法、水蒸気改質などで合成ガス（水素と一

酸化炭素の混合ガス）に転換し FT（フィッシャー・トロプシュ）合成（炭化水素の合成方法）やメタノールなどの燃料にする方法が、また、直接転換による利用法としては研究段階ではあるが OCM（酸化的カップリング）によるエチレン製造や酸化によるメタノール合成、芳香族合成などが知られる。以下、化学転換とその他に分けて、現状と今後を俯瞰する。

(3) 国内外における研究開発の動向

(3-1)メタンと軽質炭化水素(C2-C4)の国内外の研究開発動向

①メタンの化学的転換（メタン⇒合成ガス）

シェールガスや天然ガスの主成分であるメタンを、燃焼以外の利用として、化学的に転換して利用するために、工業化を目的とした様々な触媒プロセスが存在する。メタンの転換技術は大きく間接転換法と直接転換法に分類される。間接転換法はメタンを高温で触媒とともに水蒸気などと反応させ、一酸化炭素と水素を含む合成ガスを製造し、その合成ガスを原料としてメタノールや人造軽油などの化学品を合成するのが一般的である。メタンから合成ガスを製造するプロセスとしては、水蒸気改質（SR: Steam Reforming）、炭酸ガス改質（DR: Dry Reforming）、部分酸化（POx: Partial Oxidation）が主要なものである。

メタンの水蒸気改質はすでに 50 年以上の歴史を有し、大型のプロセスが世界中で多数稼働しており、大規模な用途としては熟成された技術である。水蒸気改質によって生成する水素の値段は 1 m³あたり 20~30 円ほどであり、ここ 80 年の間、アンモニア合成や石油精製のために多量に必要とされる水素を製造する主流の方法である。一方で、家庭用の燃料電池のために都市ガスから水素を作るような小規模なケースにおいては、今後さらなる技術開発が期待されている。課題は触媒への炭素の析出、反応プロセスの複雑さ（多段の熱交換に由来する）、高温に耐える材料（メタンの安定性故に反応温度が 700 °C を大きく上回る）などである。

メタンと炭酸ガスを反応させて合成ガスを得る方法（炭酸ガス改質）も既に知られている。炭酸ガス改質は温室効果ガスである CH₄ と CO₂ を同時に削減できることから、環境負荷の低減という観点からも注目されている。有効な触媒としては貴金属や Ni を担持させた触媒が知られているが、経済性の面から Ni 系触媒が望まれている。従来 of Ni 系の触媒では活性は高いものの、炭素析出によって劣化しやすいことが知られる。現在、集中排出源から回収（CCS）した二酸化炭素の利用法としても再び研究開発ブームが起こっている。

部分酸化反応は発熱反応であるため、総合的なエネルギー効率は 50%ほどと水蒸気改質に比べて劣るが、大きな吸熱反応である水蒸気改質と異なり熱を加え続ける必要がなく、シンプルで小型のプラントで合成ガスを製造することが可能である。触媒層の前部で大きな熱が生じるため熱回収が非常に重要である。有効な触媒としては SR・DR と同様に Ni 担持金属系触媒である。メタンを原料とした部分酸化（POM: Partial Oxidation of Methane）は多くの報告例がある。また、部分酸化反応による発熱を、水蒸気改質による吸熱分に補うように組み合わせるオートサーマルリフォーミング（Auto Thermal Reforming: ATR）によって効率を上げる手法がある。発熱反応と吸熱反応が同一反応器内で進行するため、触媒層の hot-spot の形成や炭素析出を抑制することができる。また原料である酸素と水の供給量を変えることで H₂/CO を調整することができるため優れたプロセスである。

これらプロセスによって得られた合成ガスは、フィッシャー・トロプシュ反応やメタノール合成反

応、ジメチルエーテル合成反応により、簡単に人造軽油やメタノール、ジメチルエーテルへと転換することができ、いずれも巨大プラントが世界中で既に稼働している。とりわけ人造軽油合成については、アパルトヘイトによる石油禁輸を背景とした石炭ガス由来の南アフリカ、その後天然ガス由来の合成ガスによるマレーシアやカタールでの巨大プラント稼働が進んでいる。

②メタン間接利用 (メタン⇒合成ガス⇒有用化合物)

間接的な転換方法としては、合成ガスから付加価値の高いメタノールやエチレングリコールなどの化学原料に転換する技術が数多く報告されている。一例として近年需要が急増している低級オレフィン (C_2 - C_4) を FT 合成にて合成するプロセスを紹介する。低級オレフィンは元々ナフサのクラッキングや流動接触分解 (Fluid Catalytic Cracking : FCC) によって合成されていたが、近年の原油価格の変動やカントリーリスクの観点から天然ガスへの原料シフトが望まれている。メタノールは、液体燃料としての用途、近年では DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) として電気エネルギーの取り出しへも利用されている。メタノールは MTG (Methanol to Gasoline) 技術が 1980 年代から注目され、燃料としての利用が知られてきたが、石油危機の影響が弱まると同時に忘れ去られていった。メタノールは主として天然ガスを改質して得られた合成ガスを、圧力 5~10 MPa、温度 473~573 K の条件下で Cu・Zn / Al_2O_3 系の触媒を用いて合成されている。近年のメタノール需要の増加に伴い、経済性の面からメタンを直接メタノールに転換する技術が求められている。

天然ガス生産量の増大に伴い、バイオマスと天然ガスを併用したプロセスも注目を集めている。現状ではバイオマス単体だと生成可能なエネルギー量に限りがあること、バイオマスを用いた FT 合成は低収率でコストが高いといった点が問題となっている。そこでシェールガスによって得られる天然ガスとバイオマスを組み合わせて効率良く合成ガス・液体燃料を作るプロセスが考えられている。

③メタン直接転換 (メタン⇒有用化合物)

メタンを直接化学的に利用する方法として、メタンの酸化カップリング、メタンのハロゲン化、メタンの芳香族化などが知られるが、いずれも生成物収量が低く効率が悪いため、工業化には程遠い状況にある。メタンを直接転換により付加価値の高いオレフィンやメタノールのような含酸素化合物を合成することができれば、コストの高い合成ガスを経ずに目的生成物が得られるため経済性の面で有利である。しかし直接転換には二つの問題がある。一つは直接酸化の場合原料である酸素を空気中から分離しなければならない点、もう一つは商業ラインに乗る収率を達成しているプロセスが未だにないことである。これは生成物の収率が非常に小さく one-pot のプロセスであるため、分離に多大なコストが必要であることが原因である。

メタンを直接部分酸化・脱水素して付加価値の高いエチレンを生成させるプロセスは、メタンの酸化カップリング (OCM : Oxidative Coupling of Methane) と呼ばれ長らく注目されてきた。この反応では、エタンやエチレンの反応性が原料であるメタンよりも高いために、逐次酸化を抑制することが困難である。これまで酸化物触媒に注目して Lunsford や Choudhary が様々な触媒を用いて OCM を行ったが、未だに C_2 収率が 30 % を超えた例は極めて少ない。^{3), 4)} 面白い例としては、近年需要が増加している水素に着目して、エチレンと水素の選択性が高い触媒としてノンストイキオメトリーな酸化物として知られている CuCe 系酸化物と CuZr 系酸化物を用いて OCM を行った結果、特に CuCe 系では 1123 K 下、メタン転化率が 25 %、 C_2 選択率が 92 % であったとの報告が知られる。⁵⁾

一方で、非酸化的なメタン転換として芳香族化が注目されている。BTX は非常に重要な化学原料であるため、天然ガスから合成することができれば大きな経済効果となる。しかし現状では Mo を担持させたマイクロ-ナノサイズの HZSM-5 触媒を用いた場合でも収率 7 % 程度である⁶⁾。

また、メタンとハロゲンを用いてハロゲン化炭化水素をつくる研究が 1980 年代から行われてきた。例えば、ハロゲン化メタンを合成する過程で、触媒として酸性質のゼオライトがよく用いられ、Oxyhydrohalogenation と呼ばれている。触媒として超酸担体上に Pt を担持した触媒がよく用いられている。これらは弱い発熱反応であり、選択性が非常に高い。ハロゲン単体を酸化的に再生する反応が効率よく行われればハロゲン化水素の分離や無害化が不必要となり、経済的である。これらプロセスでは、生成物に毒性や腐食の性質があるため、安全性の確保が第一となりコスト面での問題がある。腐食対策等の技術開発が進展し、低コスト化が実現できれば魅力的なプロセスである。

新しいメタン転換プロセスとして、ハロゲン化メタンからオレフィンや含酸素化合物を合成するプロセスが研究されている。SAPO-34 などの触媒を用いて、塩化物や臭化物を用いてメタンを一旦ハロゲン化し、それを重合や酸化することによりメタノールやジメチルエーテル、オレフィンなどを得ることができることが知られている。この場合は、ハロゲンによる反応器の腐食などが解決すべき課題として残っている。

④軽質炭化水素(C₂-C₄)の直接転換

天然ガス田には wet natural gas と呼ばれる C₂ 以上の成分を多く含むガス田が存在するため、メタン転換だけでなくより炭素数の多いアルカンの転換技術も求められている。以下に原料ガスの成分である C₂-C₄ の直接転換について述べる。

近年、ポリプロピレンやアクリル酸などのプロピレン系誘導品の需要がアジアを中心に高まっているが、プロピレンは従来ナフサのクラッキングによる副生成物として回収しているためその量が世界的に不足している。そこで天然ガスの成分からプロピレンを直接合成する技術が求められており、米国を中心に供給過剰となっているエチレンを原料としたプロピレン合成が精力的に行われている。プロピレンの合成法として、プロパンの脱水素やメタセシス反応、メタノール転換 (MTO : Methanol to Olefin) などの研究が行われている。メタノールは液体であり輸送が簡便なため、急増するプロピレン需要に対応することができる。

軽質炭化水素 (C₂-C₄) を用いて含酸素化合物を合成する研究も数は少ないが行われている。RhCl₃、NaCl、CuO を溶解させた CF₃COOH 中にてカルボニル化合物の合成が報告されており、酸素と一酸化炭素存在下で炭化水素鎖が短くなったカルボニル化合物が生成しやすい (例えば C₂ から HCOOH など) ことが見出された⁷⁾。

(3-2)国際ベンチマーク

米国 DOE では、ARPA-E の Electrofuel プロジェクト (2011~2014) では酵素反応を用いてメタンを転換する試みがいくつか行われてきた。ARPA-E の REBEL プロジェクト (2015-) でも、中温域の燃料電池関連の研究において、Georgia Tech Research Corporation が 500 °C 以下で作動するメタン転換型燃料電池を研究している。また、液体系燃料電池において、FuelCell Energy 社が中温域で作動するメタンからメタノールに転換しうる反応プロセスの開発を進めている。

EU では Horizon2020 の中で Power to Gas が進められ、従来型天然ガスと再生可能エネルギー由来天然ガスならびに水素の融合利用が検討されている。また、天然ガスが安価に手に入る中東においては、政府系機関が天然ガスの転換・液化に大型のファンディングをつけて研究開発が進められている。

商業展開のフェーズとしては、合成ガスを経由した石油系製品製造においては、これまで南アフリカの SASOL や Shell, BP による長年の技術開発が行われ、現在 14 万バレル/日級のプラントがカタールなどで稼働している。また、ガスから人造石油（軽油）まで転換するプロセスにおいて、マイクロリアクターなどの開発が進められており、米国 Velosys 社などは、反応部と熱交換部を交互に積層し伝熱を効率化、高活性な触媒を開発してきた。これを用いた洋上油田・小規模ガス田における改質・GTL やバイオマスからの燃料製造（BTL : Biomass to Liquid）への適用が検討されている。米国の Siluria Technologies 社は MIT から出たベンチャーであり、メタンの 2 量化を経由するプロセスを検討しており、メタンの酸化二量化を経由したエチレン製造、さらにはエチレン液化に特化した技術開発をおこなっている。ウイルスをテンプレートに用いたナノワイヤ触媒ではメタンからの C₂以上の炭化水素への選択性が向上し、エチレンの生成温度を従来の反応温度から 200 °C 程度低下させうることを示した。

メタン転換の科学技術の動向としては、Scopus（2011-2016、キーワード Methane Conversion）による論文の状況として、全 2904 報のうち 1 位中国が 720 報、2 位米国 468 報、3 位ドイツ 178 報、4 位韓国 156 報、5 位イラン 148 報、6 位日本 144 報、以下スペイン、フランスと続く。また、研究機関別では東工大が世界で 22 位（18 報）、東北大が 62 位（12 報）などが入っている。これらデータから見ると、メタン転換は国際的な比較としてみると大学ランキングなどのデータに比較して我が国は劣位にあるといえる。

(4) 参考資料

- 1) Editorials, Nature, 460, 551-552, 2009.
- 2) 関根 泰他, 触媒, 55(3), 130-135, 2013.
- 3) J. H. Lunsford, Angew. Chem. Int. Ed., 34, 970, 1995.
- 4) V. R. Choudhary and V. H. Rane, J. Catal., 130, 411-422, 1991.
- 5) M. Schmal *et al.*, Appl. Catal. A:Gen., 375, 205-212, 2010.
- 6) W. Zhang *et al.*, J. Catal., 188, 393-402, 1999.
- 7) E. G. Chepaikin *et al.*, Kinet. Catal., 51(5), 666-671, 2010.

3. 4 電力自由化と再生可能エネルギー大量導入時代のエネルギーネットワーク

(1) テーマ名

電力自由化と再生可能エネルギー大量導入時代のエネルギーネットワーク

(2) 概要

2016年4月から始まる電力自由化、さらには2020年を目処に行なわれる発電と送電を法的に分離するなど電力供給のシステムが大きく変わろうとしている。また、ガス市場も2017年に小売の完全自由化が行なわれる予定であり、我が国のエネルギー供給が大きく変化している^{1),2)}。

エネルギー基本計画³⁾で示したエネルギーベストミックスでは、2030年の電力供給における再生可能エネルギーの割合を22~24%としているが、変動電源と言われる太陽光は7%程度、風力は1.7%程度とされており、長期的にはこれらの変動電源の更なる導入、供給と需要一体となった双方向のエネルギーネットワークの構築によるエネルギーの安定供給が必要である。

また世界的にIoTが提唱され、よりダイナミックで自律的な情報のやり取りを実現するサービスプラットフォームをもつ社会の実現が期待されている。

こうした状況を受けて、これまで電力を中心として、供給者から需要者に対して一方向で供給されてきたエネルギーが、需要者から供給者へ情報さらにはエネルギーそのものを供給する、あるいは、需要者が能動的にエネルギーに関与する双方向のエネルギーシステムとなり、これにより、社会に新たな価値（サービス）を創出し、低炭素化、エネルギー効率向上、災害に強いレジリエントなシステムとなることが期待される。

我が国は、1964年に制定された電気事業法の下、発電から小売までを一貫して行う垂直統合型の電力会社10社が電力供給を行ってきた。バブル経済の崩壊後は、電気事業の高コスト構造や内外価格差の是正を目的とした制度改革が行われてきており、その結果、2013年度時点では販売電力量の家庭向けを除く60%が自由化対象になっているが、特定規模電気事業者（PPS）である新電力のシェアは4%にとどまっている。2011年3月の東日本大震災福島第一原子力発電所事故を受けて、①電力の安定供給の確保、②電気料金の最大限抑制、③需要家の選択肢や事業者の事業機会を拡大することを目的として、2013年4月に「電力システムに関する改革方針」が閣議決定された。この目的の下、①広域系統運用の拡大（2015年広域的運営推進機関設立）、②小売及び発電の全面自由化（2016年目処）、③法的分離の方式による送配電部門の中立性の一層の確保（2018年~2020年）、との内容の電力改革を行うこととしている。2015年4月に広域的運営推進機関が設立され、2016年4月より電力市場の完全自由化が始まる。このような状況の中、電力会社だけではなく、ガス会社、石油会社などのエネルギー関連企業、さらには情報系企業が発電業者や電力小売業者として申請を行ない、サービスを含めた競争が激化している。

欧米では1990年半ば頃より電力自由化が行なわれ、その後再生可能エネルギー導入が進められてきたが、我が国では2013年7月に開始されたFIT（Feed in Tariff：固定価格買取制度）により太陽光発電を中心に再生可能エネルギーの導入が進められており、同時に電力自由化を進めるなど世界に類のない取り組みを進めている。

スマートグリッドの概念は1990年代より提唱され、現在はスマートシティ、マイクログリッドな

ど様々な広がりを見せている。米国では、発・送電設備のインフラ不足、大停電事故、ピーク需要の削減や老朽化した電力網更新などを目的とした、電力供給の信頼性向上・強化型、欧州では、風力発電や太陽光発電の大量導入、大停電事故、低炭素型の街づくりを目的とした再生可能エネルギー大量導入型として捉えることができる。我が国は欧州と同様、発電・送電系と需要家を含む配電系を一体的に捉え、再生可能エネルギーの導入を促進する再生可能エネルギー大量導入型といわれている⁴⁾。

欧米でも様々な研究プロジェクトが実施されており、我が国においても実証試験を初めとして多くのプロジェクトが実施されているが、スマートグリッドは需要者を中心として、電力供給では低電圧の配電システムのスマート化、省エネ化を目的としたものが中心である。

ここでは、供給から利用まで含めたエネルギーネットワークの研究開発の現状と展望について概説する。

(3) 国内外における研究開発の動向

(3-1) エネルギーネットワークの国内外の研究開発動向

① 電力システムの現状と技術開発動向

我が国の電力は、総括原価方式により電力価格が設定され、電力会社が電力安定供給の責任を果たしてきた。電気は貯蔵することができず、発電から消費までを同時同量で制御することで、電力システムの安定性を保つためのシステムが構築されている。我が国の電力システム構成は、直列に接続されたくし型と称され原則、各電力間は1点で接続され、各電力会社管内で需給バランスを取ることを基本としている。一方、欧州では各国の電力システムをつないだメッシュ型と称され、大きな各国電力間の系統連係容量を有しているが、ドイツや英国では電力自由化、再生可能エネルギー導入により電力価格の高騰が課題となっている。また、米国では電力自由化や規制緩和により電力品質低下、電力会社の経営状況の悪化、多くの発電所設置による電力システムの複雑化が起きている。

我が国では、電力完全自由化、発送電分離、再生可能エネルギー導入拡大ともこれからであり、FITによる再生可能エネルギー大量導入に対して、東北電力、九州電力管内では電力システムの安定性に対する課題が顕在化し始めている。

我が国でも、電力システムの技術として以下の研究開発が行われている。

- 超高压送電 (Ultra High Voltage 送電)、超高压直流送電、超電導技術、太陽電池や風力電の変動に耐える送電網の安定運用のための状態監視技術 (Synchrophasor などの活用)、電源および送電網の機器の最適制御技術
- 周波数制御領域、ランプ変動の制御を含めた、電力需給に係るあらゆる構成要素の最適活用と個別技術と全体最適のための組合せ、活用技術
- 従来電源の特性改善、太陽電池などの抑制・調整力、エネルギー貯蔵要素による需要の能動化調整、送電網の拡大・増強
- 需要と発電予測技術、準リアルタイムの起動停止計画に代表される運用計画技術の高度化

また、今後の研究開発項目として以下があげられる。

- 既存の火力発電の調整機能活用技術 (全負荷帯高効率化、負荷変動速度)
- 揚水発電 (特に可変速揚水)、二次電池、エネルギーキャリア等、各種エネルギー貯蔵技術そ

それぞれの特性に応じた最大活用技術

- 分散電源などのきわめて多数の小規模な対象を効率的、効果的に需給調整に活用するためのアグリゲーション技術
- 送電網、連系線の混雑管理と最大活用技術需要予測、発電予測技術、予測誤差の定量情報提供
- 起動停止計画、シミュレーション技術、実際の電力システムの運用技術

②スマートグリッドの現状と技術開発動向

電力自由化により需要家がより安価、環境に優しいな電力を選ぶ、さらには、FIT に代表されるように需要家自身が発電し電力を売る状況に変化しており、これまで供給から消費の一方向システムから、需要側からも供給側にエネルギーや情報を供給する双方向のシステムが構築されていこうとしている。

スマートメータの設置や EMS（Energy Management System）、需要側の能動化技術である DR（Demand Response）、電気自動車との関係、電力小売業者であるアグリゲータ、送電・配電系統側の周波数制御や電圧制御、また各種系統や発電所故障時に対処するための予備電力確保に価値をつけるアンシラリーサービス、複数の小規模な自家発電設備や電力の需要抑制を統合し 1 つの発電所とする仮想発電所（VPP：Virtual Power Plant）、需要家の節約により余剰となった電力を発電したことと同等にみなすネガワットなど、様々な検討が行われている。

このような状況の下、将来的にエネルギーの安定供給、低コスト化、低炭素化を達成するためには、電力のみではなく、熱エネルギーを含めたエネルギー全体システムの最適化が必要である。例えば、昼間や晴天時に発電する太陽光、風が吹くときに発電する風力など変動の制御、余剰に発電した電力の貯蔵（蓄電池、水素変換を代表とする化学的貯蔵、熱貯蔵等）など、エネルギーシステムとしての時間的、空間的な最適化が必要となっている。

長期的な視点での研究開発として、エネルギーネットワーク全体の評価モデル開発、高速取引市場・トランザクティブエネルギー、センサーNWからのビッグデータ解析・最適化計算、リアルタイム計測・制御、超高速アルゴリズム、サイバーセキュリティ、電気の大域性を緩和するためのモジュール化技術（配電系を中心とした電力潮流制御、中央集中型の更なる高速制御、電力パケット、パルス送電、P2P 分散協調制御型、回線交換方式など）等があげられる。

(3-2)国際ベンチマーク

①日本

第 5 期科学技術基本計画では、ネットワークや IoT を活用し、「超スマート社会」を未来の姿とし共有し、「Society 5.0」として深化することが示され、超スマート社会サービスプラットフォームのドメインとしてエネルギーバリューチェーンも含まれている⁵⁾。

経済産業省を中心に下記の取組みが行われており、官民一体の取組みとして、スマートコミュニティ・アライアンスの設立、米国グリッドワイズアライアンスとの協定を締結している。

- ・低炭素電力システム研究会
- ・次世代送配電ネットワーク研究会
- ・蓄電池システム産業戦略研究会
- ・次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に関する研究会

- ・次世代エネルギー・社会システム協議会
- ・エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス・フォーラム

スマートグリッドに関する研究開発の代表例として以下が進められている。

- ・スマートコミュニティ実証事業
- ・分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業
- ・電力系統出力変動対策技術研究開発
- ・次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究
- ・高温超電導実用化促進技術開発
- ・スマートグリッドの通信インタフェース標準化推進事業
- ・分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開
- ・COI 九州大学・共進化社会システム創成

また、スマートグリッドの構成技術となる、パワーエレクトロニクス、エネルギーキャリア、蓄電池、太陽電池の研究開発などが内閣府、経済産業省、文部科学省で行われている。

海外では電力自由化、再生可能エネルギー導入が進んでいる欧米を中心に様々な検討、研究が行われている⁶⁾。

②欧州

欧州では、EU 再生可能エネルギー電力促進指令（2001）により、電力分野への再生可能エネルギーの導入量を各国に規定しており、需要家側エネルギー効率エネルギーサービス指令（2006）によるスマートメータ導入の義務化、EU 再生可能エネルギー促進指令（2009）では、2020年までに最終エネルギー消費に占める再生可能エネルギーの割合を20%にすることを目指している。また、ETP Smart Grids、European Smart Metering Alliance（ESMA）、Smart Domestic Appliances in Sustainable Energy（Smart-A）等が組織されているETP Smart Gridsでは、「戦略研究アジェンダ(Strategic Research Agenda：以下SRA)」として、2006年にビジョン24をまとめている。2007年には技術戦略（SRA）25を発表、2008年9月にSRAの具体的な展開優先順位付け、展開スケジュールを定めたSDD26のドラフトを発表している。

Horizon 2020では、再生可能エネルギーからの水素・電力網がテーマとして挙げられており、2010年にスマート、持続可能かつ包括的な成長という視点の実現を目指した成長戦略「欧州2020」の実行プログラムとして位置付けられている。また、FP7の下、e-Highwayが行なわれている。これは2020年～2050年のEUの変換ネットワーク計画をサポートするための方法論開発を目的とし、再エネ供給の信頼性向上と市場との融合を確実にするため、可能性のあるEUの基本的な電力供給網開発計画や様々な将来の電力システムシナリオに基づく完全なEUグリッド構造のオプションを導くものである⁷⁾。また、2013年～2015年、送配電システムの新たな運用パラダイムの開発を目的としたSuSTAINABLE ProjectにEU9カ国より8パートナーが参画し、プロジェクトマネジメント(WP)と8つのWPの構成のもと、コンセプトの検討と実証試験が行われた⁸⁾。エネルギー分野の基本的フレームワークとして2010年に公表された欧州戦略的エネルギー技術計画(SET-PLAN)は、再生可能エネルギー利用拡大、CCS、送電網、燃料電池・水素、高効率エネルギー利用にフォーカスして策

定された。また、欧州標準化委員会（CEN）、欧州電気標準化委員会（CENELEC）、欧州電気通信標準化機構（ETSI）が、エネルギーシステムの構造、標準リスト、標準群更新のための手法の一つとして、スマートグリッドリファレンスアーキテクチャーを纏めている⁹⁾。

ドイツでは、Energiewendeとして、2010年にエネルギー供給のスマートな構造改革を掲げたハイテク戦略2020、2014年に持続可能なエネルギーの生産、消費を掲げた新ハイテク戦略を発表している^{10) 11)}。2011年に、「第6次連邦政府エネルギー研究プログラム、環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給のための研究」¹²⁾において、エネルギー効率、エネルギー貯蔵、送配電、炭素回収&貯蔵、燃料電池の開発、再生可能エネルギーの開発、横断的研究、送電網（伝送損失の低減、電力変動や伝送障害への迅速対応、情報通信技術を活用した電力需要管理の最適化など）、エネルギー貯蔵（熱的貯蔵、電気化学的貯蔵、力学的貯蔵、化学的貯蔵など）の研究開発を行なうこととしている。また、再エネ導入促進、CO₂排出量削減、電力自由化促進、EV普及の4大目的に向け、ICT導入による電力システム最適化を進めるプロジェクトE-Energy German Smart Grid Projects構想が2006年に発表され、2008年実証開始、2012年に評価および標準化を行なっている¹³⁾。さらに、再エネの余剰電力で水を電気分解して水素製造・利活用するPower to Gas Project¹⁴⁾などが行なわれている。

③米国

米国では、DOEの「戦略計画2014～2018年（2014年4月）」においても3つの戦略目標の一つとしてエネルギーインフラの経済競争力、環境配慮、安定かつ回復力の強化支援—電力グリッドの近代化技術開発を取上げ、DOEの事故管理能力強化、戦略的石油備蓄（SPR）、電力システムを含むエネルギーネットワークに関する課題を提言している。また、DOEによる「4年毎のエネルギー計画見直し（QER）」（2015年4月）の中でもエネルギーインフラに焦点を当て、どのように近代化していくべきかの問題を検討している。具体的には、エネルギーインフラのレジリエンス、配電網の近代化、SPR利用などの非常時対応の検討、共用のエネルギー輸送インフラの改善、北米エネルギー市場の統合、エネルギーインフラの立地と許可についての提言している^{15)~18)}。また、2003年に「Grid 2030」A National Vision for Electricity's Second 100 Yearsを発表し、今後の100年間を見据えた電力網の構築を目指し、「ICTを用いて電力システムの運用・制御を効率化する」というスマートグリッドのコンセプトを打立て、効率的で信頼性の高い電力網の構築を求めている¹⁹⁾。2015年から10年計画として示されたGrid Modernization Initiativeに対応して、DOEの研究所によるグリッド近代化コンソーシアムを組織し、従来の活動を1本化し、専門家や設備の統合や、DOE各部門（EERE、OE、EPISA）のグリッド近代化関連の予算を1本化した配分を行っている。さらに、NRELにエネルギーシステム統合設備を設置し²⁰⁾、EU、ドイツと同様に将来のエネルギーネットワークのプラットフォームとして、スマートグリッドアーキテクチャーを整理している。また、商取引できるエネルギーTE（Transactive Energy）が提唱され、DOEファンドの下、GridWise Olympic Peninsula Project、Pacific Northwest Demonstration Project、GridSMART Programなどの実証試験が行われている²¹⁾。

ARPA-Eでは、電力グリッド技術の研究開発支援を行っており、2つのプログラムGENI（柔軟で効率的な電力技術：伝送網のエネルギー効率、信頼性、再生可能エネルギー統合機能などを高めるためのハード及びソフトウェア）、ADEPT（再生可能エネルギーを統合した伝送網：高効率電力変換を可能にする方策、そのための回路、トランジスタ、インダクタ、変圧器、キャパシタなど）で29のプロジェクトを実施しており、包括型提案募集プログラムによる伝送技術に関する14プロジェク

トが含まれている。また、2つの新しいプログラム NODES、GRID DATA についても 2016 年に開始された。

IEA では、供給と需要双方向の情報による、電力システムを最適化、高効率化し安定供給、低炭素化を達成するためのスマート電力システムのロードマップを纏めており、発電、変換、送配電、産業、サービス、消費のバリューチェーンにおいて、スマート電力システムとして 8 つの研究開発領域でハードウェアおよびシステム、ソフトウェアの必要な研究開発項目を示している^{22)・23)}。

特許庁では、「次世代エネルギーシステムに関わる国際標準化に関する研究会」（経済産業省）の 7 つの構成技術を参考に、3 つの電力系統側技術、①送電系統広域監視システム、②配電網の管理、③分散型電源の系統連系、5 つの需要家側技術、④デマンドレスポンス、⑤EMS、⑥需要家用分散型電源システム、⑦EV の充放電システム、⑧AMI システム、さらに、これらの技術がネットワークとして繋がっていくことから、⑨スマートグリッド関連サービス、の 9 つの技術分野に分類して分析を行なっている²⁴⁾。1995 年～2012 年の論文発表は 3,086 件あり、1 位欧州 859 報、2 位米国 691 報、3 位日本 367 報、4 位中国 195 報、5 位韓国 89 報、その他 984 報（含むカナダ、インド）となっている。いずれも増加傾向にあるが、欧州では 2000 年代初めから伸びており、米国でも 2010 年以降急増している。日本でも 2006 年頃から増加しているものの、その伸びは小さい。分野別では、送電系統広域監視システム、分散型電源の系統連系に関する件数が最も多く、2004 年頃から分散型電源の系統連系に関する件数が急増し、2010 年頃から、EMS、EV の充放電システムの件数が増加傾向にある。我が国では、産を中心に電力系統側技術、需要家側技術、学を中心に需要家側技術の研究開発が行われているが、欧州、米国に対して電力自由化、発送電分離が 10 年以上遅れており、欧米で進められているシステム化技術が遅れている。今後、基礎技術とシステム化技術を統合し、超長期のエネルギーネットワークのあり方を明確にして進める必要がある²⁵⁾。

(4) 参考資料

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁、電力小売市場の自由化について、2013 年 10 月
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁、電力システムに関する改革方針（参考資料）、2013 年 4 月
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁、エネルギー基本計画、2014 年 3 月
- 4) 横山明彦、新スマートグリッド 電力自由化時代のネットワークビジョン、日本電気協会新聞部、2015 年 2 月
- 5) 総合科学技術・イノベーション会議、科学技術基本計画（案）他、第 15 回総合科学技術・イノベーション会議資料、2016 年 1 月
- 6) CRDS 研究開発の俯瞰報告書 主要国の研究開発戦略(2015 年) CRDS-FY2014-FR-01
- 7) e-Highway2050 HP, <http://www.e-highway2050.eu/e-highway2050/>
- 8) www.sense.tu-berlin.de, <http://www.sustainableproject.eu/> HP 他
- 9) CRDS-FY2014-FR-01 研究開発の俯瞰報告書「主要国の研究開発戦略(2015 年)」, CRDS, 2015 年 3 月
- 10) CRDS-FY2014-OR-01 科学技術・イノベーション動向報告～ドイツ～, CRDS, 2015 年 3 月

- 11) DE20140916 ドイツの科学技術ノベーション政策 新ハイテク戦略, CRDS, 2014年9月
- 12) Research for an environmentally sound, Reliable and affordable energy supply, 6th Energy Research Programme of the Federal Government, Nov. 2011, Federal Ministry of Economics (BMWi)
- 13) E-Energy German Smart Grid Projects Overview, June 2010, e-energy HP, www.e-energy.de 他
- 14) Hydrogenics HP, <http://www.hydrogenics.com/> 他
- 15) NEDO 海外レポート NO.1107 2014.5.27 米国エネルギー省戦略計画 2014~2018年(抜粋)
<http://www.nedo.go.jp/content/100559932.pdf>
- 16) 平成 23 年度作業技術調査事業 海外主要国における研究開発活動の動向に関する調査
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2012fy/E002537.pdf
- 17) JSPS ワシントン事務所、「2016 年度米大統領予算教書における研究開発関連予算案の概要」
http://jspsusa.org/wp/wp-content/uploads/2014/08/150310_The-Presidents-Budget-for-Fiscal-Year-2016.pdf
- 18) EPA Strategic Plan FY2014-2018
http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-09/documents/epa_strategic_plan_fy14-18.pdf
- 19) “GRID 2030” A NATIONAL VISION FOR ELECTRICITY’S SECOND 100 YEARS
http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Electric_Vision_Document.pdf
- 20) NREL、Energy System Integration、2015年6月
<http://www.nedo.go.jp/content/100750424.pdf>
- 21) カリフォルニア州公共ユーティリティ委員会政策計画部レポート、2014年10月
- 22) Technology Roadmap Smart Grids、IEA、2011年
- 23) Smart Grid Reference Architecture, CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group, Nov. 2012
- 24) 平成 24 年度特許出願技術動向調査ースマートグリッドを実現するための管理・監視技術一、特許庁、平成 25 年 4 月
- 25) CRDS 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2015年）CRDS-FY2015-FR-02