

3.7 使用済燃料等の処理処分・廃止措置

（１）研究開発領域の簡潔な説明

原子力発電所等で発生した使用済燃料の処理技術、放射性廃棄物の処理処分技術、廃止措置に関する技術に加えて、これらの安全性評価に関する技術の開発動向についての研究開発領域である

（２）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

放射性廃棄物の問題は、1950年代の原子力利用の黎明期から、その重要性が認識されていた^{1,2)}。当初は、地上や海洋での処分が検討されたが、地上施設における高レベル廃液の漏洩事故や海洋投棄を禁止する国際条約（ロンドン条約）の制定を受けて、アメリカやヨーロッパにおいて、地層処分が技術的に実現性の高いオプションとして推奨されるようになり、その処分概念の具体化が進められた。また、原子力施設の運転中及び廃止措置時に多種類の低レベル放射性廃棄物が発生する。特に廃止措置時には、その数%を固体の低レベル放射性廃棄物として処理処分する必要があり、最終的には浅地中処分が選択されている。このため、これらの安全な処理処分を行う技術が不可欠となっている。

[動向（歴史）]

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

原子力施設においては、運転中及び廃止措置時に大量の廃棄物が発生する。これら発生する低レベル放射性廃棄物は、処分の前に固型化する必要がある、セメント固化法、アスファルト（ビチューメン）固化法およびプラスチック固化法がある。また、処分時には、放射性廃棄物の放射能濃度を決定する必要がある。

国内では、運転中に発生する低レベル廃棄物の処分施設が供用中であるが、解体廃棄物の処分施設が必要である。特に、炉内等廃棄物に対する中深度処分に関して、現在、原子力規制委員会で規制制度の検討が進められている³⁾。

国外では、原子力利用を進めてきた幾つかの国で、原子力施設（原子力発電所、核燃料サイクル施設等）の廃止措置が進められている。また、原子力開発に使用された原子力サイト（軍事利用を含む）などで放射能汚染した土壌の処理などを含む環境修復も進められている⁴⁾。

● 高レベル放射性廃棄物（HLW）の管理・処分

HLWの管理・処分に関しては、人間が設計・敷設する複数の工学的なバリア（人工バリア）と周囲の環境に内在する放射性核種の移行抑制と保持の機能（天然バリア）からなる多重バリアシステムがHLW地層処分の安全性確保における基本的な考え方として示され、要素技術の開発が進められた。我が国においても、1976年の原子力委員会で、地層処分を重点的に研究する方向性が示された。その後、我が国における地層処分の成立性を示すための研究開発が進められ、その成果が第一次取りまとめ「地層処分の技術的可能性」（'92）⁵⁾、第二次取りまとめ「地層処分の技術的信頼性」（'99）⁶⁾としてまとめられた。そして、2000年には、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（特廃法）が制定され、

HLW 処分の実施主体として、原子力発電環境整備機構（NUMO）が設立された⁷⁾。

わが国では、エネルギーを長期的かつ安定に確保し、放射性廃棄物を適切に処理・処分する観点から、使用済燃料を再処理し、回収したウランやプルトニウムを再び燃料として利用する核燃料サイクルが原子力政策における基本方針とされてきた。2013年3月の時点で、日本国内には約17,000トンの使用済燃料が存在している⁸⁾。この他、約2,200本のガラス固化体に相当する使用済燃料がフランスやイギリスの再処理事業者の工場に運ばれ、再処理が行われた⁹⁾。再処理に伴い発生したガラス固化体はわが国に返還されることになっており、フランスからの返還は2008年に終了している。これらを含めた再処理後のガラス固化体は、国内外に約2,500本貯蔵されている⁸⁾。さらに2013年3月までに貯蔵されている使用済燃料をすべて再処理した場合、既存のガラス固化体と合わせて合計約25,000本のガラス固化体に相当する。

NUMOでは、2020年前後までの原子力発電に相当する高レベル廃棄物（ガラス固化体4万本以上）を地層処分することを想定している¹⁰⁾。処分施設建設候補地の公募を続けているが、現時点で候補地の応募はなく、社会的受容性の面において課題が残っている。このような状況の中、場所を指定しないジェネリックな処分場に対して、長期的な環境変遷を考慮した安全評価をもって安全性の見通しの検討が進められてきた。

放射性廃棄物の処分に係る環境負荷の低減や、処分の効率化を目指すために、分離・変換技術の研究開発が進められてきた。長寿命放射性核種の核変換は発電用原子炉サイクルを用いて核変換を行う方法と、加速器駆動システムのような核変換に最適化された専用システムを用いる階層型サイクルに基づく方法の2種類に大別され、それぞれに適する分離技術及び核変換技術の研究開発が、並行して進められている¹¹⁾。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

廃止措置終了確認における、サイト解放についての法制度化が今後予定されている。この際の評価手法の開発が重要である。

また、放射性廃棄物処分場の安全確保のために、埋設後施設解放までの管理期間のモニタリングは重要であり、効率的なモニタリング手法の開発が重要である。

処分後の長期評価は放射性廃棄物処分の特徴であり、より現実的かつ信頼性を向上させるための研究開発が重要であり、国際的にも各種解析手法の開発ならびにデータベースの拡充が期待される。

また、廃止措置及び放射性廃棄物処理処分は長期のプロジェクトであり、知識の維持、次世代への継承の手法を開発していくことが重要である。

廃止措置及び放射性廃棄物の処理処分（低レベル）は基本的には既存技術で対応が可能と考えられてきたが、廃止措置の費用評価、環境影響評価などに関する検討は引き続き実施されている。他方、廃止措置が必要となる施設が今後増加することが予想されることを背景に、これまでの技術を見直し、より安全で効率的な廃止措置を目指す技術開発の動きも見逃すことはできない¹²⁾。

超ウラン元素の廃棄物処分については、2000年に「TRU 廃棄物処分概念検討書（第1次 TRU レポート）」¹³⁾が、2005年には「TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—」がとりまとめられた¹⁴⁾。これらの技術報告書を通して、超ウラン元素の廃棄物処分の技術的成立性や安全性の見通しについて理解が深まってきている。一方、2007年の特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（特廃法）の改正によって、超ウラン元素の廃棄物の一部が、高レベル放射性廃棄物の処分同様、地層処分対象となり、実施主体である原子力発電環境整備機構（NUMO）が関連する研究機関と連携して技術開発を進めている⁵⁾。

● 高レベル放射性廃棄物の管理・処分

高レベル廃棄物の処分の実現に向けては社会的合意形成が不可欠であるが、原子力エネルギーを利用する国民一人一人が意思決定に参加するための土台が必要である。その土台とは、国民の理解やそのための客観的な情報の提供、政府や事業者の信頼の獲得、多様な立場・価値観を持つ国民から構成される社会での意思決定の枠組み等である。また超長期に及ぶリスクに係る安全規制制度の構築のためには、世代間倫理を含めた考え方を明確にすることが求められる。

このような中、技術的には、処分の安全評価の信頼性の確保を継続して追求する必要がある。例えば、日本原子力研究開発機構では、処分場環境での核種の振る舞いを理解する上で重要なデータを熱力学・収着・拡散データベース等にまとめてきた。しかし、これらは、ばらばらの実験条件で個別に取得されたデータの集約であり、これらを分析して系統的に理解する試みはあるものの、多様な環境条件の変化に対して核種の挙動を予測できるほど網羅されていない。また、知見を拡充するにも、処分候補地が挙がっていない現状では、データ取得条件を絞り込めない。現状では場所を指定しないジェネリックな安全評価解析も、候補地が挙げると具体的な評価を実施することとなる。調査が段階的に進むにつれて増していくデータとともに、安全評価の解析体系をより具体的に発展させていく必要がある、この段階的調査全体を通した安全評価手法の確立が必要である。ネックとなっている最終処分場については、科学的有望地を2016年10月以降に、国が提示することになっている¹⁵⁾。さらに、廃棄物輸送時の安全性確保の観点から、沿岸部、特に、沿岸海底下への地層処分に関する技術的課題の整理が始められている¹⁶⁾。

また、福島第一原発の燃料デブリの処分に関しては、廃棄体としての性状がガラス固化体とは異なる可能性が高いことから、従来の処分概念にとらわれない柔軟な研究開発が重要となる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

廃止措置における知識継承を目的として、原子炉施設の知識マネジメントシステムの開発がJAEAで実施されている¹⁷⁾。また、国外では、3Dシミュレーションを用いた廃止措置の計画検討のためのツール開発が行われている¹⁸⁾。

● 高レベル放射性廃棄物の管理・処分

国内においては、革新的研究開発推進プログラムにおいて「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」のプロジェクトが進められている。ここでは、高レベル

放射性廃棄物の低減を目指して、分離変換技術の研究開発が進められている¹⁹⁾。

フィンランドでは、2015年11月、処分実施主体のポシヴァ社に処分場の建設許可を発給され、高レベル放射性廃棄物の地層処分場サイトが世界で初めて最終決定された。2020年代初めに処分を開始する計画である。これまでの経緯としては、地元自治体の承認を経て、2000年末には政府により地層処分場をオルキルオトにおいて建設する原則方針が決定²⁰⁾、2001年5月に議会により承認、2004年から地下特性調査施設（ONKALO）の建設が開始され、2012年に処分場の建設許可申請が行われ、2015年に政府が処分場建設を許可した。また、フィンランドの安全規制機関である放射線・原子力安全センター（STUK）^{21, 22)}は、最終処分の安全性を含め、原子力施設の安全性等に関する5件の安全規則を策定し、2016年1月1日より施行した。この規則では使用済燃料処分場における重大事故に関する規則も導入されている。

米国では、2009年に発足したオバマ政権が、ユッカマウンテン計画を中止し、代替案を検討する方針を示し、特別委員会（ブルーリボン委員会）で放射性廃棄物管理を含むバックエンド対策の代替案が検討された。ブルーリボン委員会の2012年1月の最終報告書において、「特に再利用の可能性が全く無い廃棄物の一部の代替処分オプション」として、大深度ボーリング孔の活用可能性を研究することが勧告された。この勧告を受け、DOEが超深孔処分のフィールド試験の計画を進めている²³⁾。しかし、現状では、フィールド試験候補地の立地に苦戦している。

（4）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

原子力施設から発生した放射性廃棄物については、レベルや核種等によって数種類に分類され、処分についての規制要求及び技術基準が順次整備されてきているが、炉心等廃棄物の中深度処分、ウラン廃棄物の処分など、まだ多くの対象についての整備が完了されておらず、具体的な固型化技術、廃棄体評価技術、処分後の安全評価技術についても検討の余地が大きい。

廃止措置については、長期にわたるプロジェクトの最適化、戦略シナリオ決定手法を含むプロジェクトマネジメント及び遠隔自動化技術において検討課題がある。特に、ソフトウェア技術を適用した、特性評価、最適計画検討、意思決定などに係る技術開発は廃止措置及び放射性廃棄物処理処分を合理的に進める上で重要である。

● 高レベル放射性廃棄物の管理・処分

高レベル放射性廃棄物の処分に関する課題は、社会的意思決定、福島第一原発における燃料デブリの管理・処分方法の検討、安全評価の信頼性向上等に課題がある。

また、可逆性・回収可能性と世代間倫理の考え方を明確にし、規制制度における長期的なリスクの考え方を整理することが求められる。長期に渡る地質環境の変化の予測には限界があり、多大な不確実性を伴う。この不確実性への対応は長期的リスクの考え方と密接に関わるため、安全評価の信頼性向上に加え、安全規制の制度設計が求められる。

[今後取り組むべき研究テーマ]

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

放射性廃棄物については、炉心等廃棄物等の処理技術の開発および処分後の安全性評価等が挙げられる。また、ウランを含む放射性廃棄物の合理的な処分に向けての技術開発や政策に係る検討も求められる。テーマとしては、人工バリア材中及び深部地下環境中における¹²⁹Iや¹⁴Cの主要な動態を把握及びこれら廃棄物の安全評価の信頼性向上等がある。加えて、超ウラン元素処分場の最適化も重要である。安全評価の結果を処分場の設計やバリア材料の開発にフィードバックさせ、TRU処分システム、あるいは、高レベル放射性廃棄物との併置処分の場合は、両者を合わせた処分システム全体としての最適化もテーマとして挙げられる。

また、廃止措置においては、費用評価を含む全体の最適化及び知識継承のためのマネジメント手法の確立が必要である。これらにはソフトウェア技術を有効に活用することが求められる。

● 高レベル放射性廃棄物の管理・処分

社会的意思決定手法の開発、福島第一原発における燃料デブリの管理・処分方法の検討、処分候補地に対する具体的な安全評価に関する研究開発が挙げられる。分離変換技術に関しては、分離技術・核変換技術の開発だけではなく、これらの技術を想定した場合の、既存の概念と異なる処分概念の構築やそれに基づく基礎的な安全評価が、その有効性を判断するために必要である。

また、地層処分の安全評価では、10万年から100万年にも及ぶ評価期間が設定されうるが、時間とともに、その不確実性は確実に増加する。また、安全評価で用いられる様々なモデルやパラメータにも、常に、不確実性が付随する。このような質的にも、そして、その程度においても大きく異なる不確実を安全評価に反映するための考え方、計算技術の整備が求められている。特に、非常に長期の評価では、被ばく線量に代わる、相対的に環境の長期変遷の影響を受けにくい指標の選定なども求められる。

バリアシステムに関しては、異なるバリア材同士の相互作用や熱や地下水流動、応力、化学反応など異なるプロセスの重畳が、処分システムの長期変遷とそこでの核種の移行を考える上で重要になる。したがって、処分場近傍の空間スケールにおいて、異なるプロセスを連成させ、バリアシステム全体を扱うことのできる統合的な計算モデルの開発が求められる。特に、短い時間スケール、小さな空間スケールを対象とする機構論的なモデルを、処分場から地表まで含めた広域スケールに展開するためのアップスケール技術の確立も求められる。

多様な環境を想定した処分システムの確立も必要となる。我が国の地下には、特徴的な地質環境も存在し、また、沿岸の海底下のように陸域とは異なる地下環境への処分の可能性もある¹⁶⁾。これらの様々な地質環境では、処分場の建設や設計、安全評価のために必要となる情報の整備状況が大きく異なるため、必要な知見、データを収集していくべきである。安全評価とその結果に基づく処分概念・処分場設計の最適化を繰り返していくことで、ロバストな処分システムを構築していくことも欠かせない。

（5）政策的課題

● 廃止措置と低レベル放射性廃棄物の処理処分

規制制度に関しては、中裕深度処分等について未整備である。今後の廃止措置の進展に伴い、解体によって発生するすべての廃棄物の処分先、再利用先を確保することによって円滑な廃止措置実施を可能とするため、処分施設の立地とクリアランス物の再利用が重要な課題であり、このための社会的受容を醸成する政策が期待される。また、廃止措置で発生する放射能レベルの極めて低いものの処理・有効利用を含む廃止措置・放射性廃棄物処理のビジネスとしての展開を可能にする取り組みも求められる。

● 高レベル放射性廃棄物の管理・処分

分離変換技術の開発には、地層処分の処分概念や処分サイトの選択肢の拡大可能性、大きな不確実性を含む超長期の安全確保の説明性向上、処分場面積低減などの合理化等において、その効果が期待される。ただし、分離変換技術を導入した場合でも、高レベル放射性廃棄物の潜在的有害度がゼロになる訳ではないため、地層処分施設が必要となることに変わりはない。また、再処理や群分離に伴って低レベル廃棄物も副産物として生成されるが、この低レベル廃棄物による被ばくリスクも高レベル廃棄物による被ばくリスクに加えて総合的に評価しなければならない。廃棄物処分に対する分離変換技術の効果を的確に評価するためには、分離変換技術を導入した新しい核燃料サイクルから生じる新しい廃棄物に対して処分概念を再構築した上で、様々な観点から総合的に評価することが必要であり、今後の課題である。特に処分の安全性については、廃棄物の低減だけに留まらず、見直された処分概念における長期的な安全評価を実施することが求められる。

また、将来の電源構成の推移次第では、使用済み燃料を全量再処理することが非合理的になることも想定される。エネルギーセキュリティに関わるリスク、再処理によるプルトニウムの抽出による核拡散リスク、地上施設での使用済み燃料の長期保管によるリスクなどを総合的に評価し、一部の使用済み燃料を直接処分するなど、柔軟かつ合理的な政策が求められる²⁴⁾。

● 総合的な廃棄物政策の展開

我が国の放射性廃棄物対策は、発生元（事業者）に応じて区分されている。例えば、福島第一原子力発電所の事故で発生した除染廃棄物（オフサイト）は、同発電所サイト内の廃棄物とは区別して取り扱われる。また、研究所等で発生する廃棄物は、原子力発電所で発生する廃棄物とは区別されている。本来、放射性廃棄物は人間や環境に対するリスクを基本として分類し、その処理処分方策を進めることが合理的である。我が国の放射性廃棄物の処理処分方策を見直し、安全で合理性のある政策を構築することが重要と思われる。

（6）キーワード

低レベル放射性廃棄物、高レベル放射性廃棄物、超ウラン元素、廃止措置、地層処分、マネジメント、最適化、知識継承、社会的受容、安全性評価、ソフトウェア技術、社会的意思決定、安全評価の信頼性、長期的リスクと安全規制制度、再処理、使用済み燃料

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 廃止措置技術及び低レベル廃棄物処理は基礎研究の段階ではない。 ● 放射性廃棄物処分に關しては、大学や研究機関において基礎研究が継続的に実施されている。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 個別の施設等を対象として、コスト低減、被ばく低減、安全向上等を目的に、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分等の開発が実施されている²⁵⁾。 ● 特にレーザーによる除染や切断技術について精力的な研究が実施されている²⁶⁾。 ● また、シナリオ評価技術等、廃止措置全体のマネジメントに関する技術開発が行われている²⁷⁾。 ● サイト解放に關する検討が今後進められる予定である²⁸⁾。 ● 高レベル放射性廃棄物では、応用面での研究開発が進められるも、処分場選定が進まないため、国際的に顕著な成果が上がっているとは言い難い。 ● 超ウラン元素に關しては、高レベル放射性廃棄物に比べて未成熟な点も多い。 ● 比較的放射能レベルの高い廃棄物の処分に關しては、原子力規制庁から一部、規制方針が示されている。
米国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 廃止措置技術及び低レベル廃棄物処理は、基礎研究の段階ではない。 ● 高レベル放射性廃棄物は、個々の要素技術や概念に關して、大学や研究期間で世界トップレベルの研究が継続されている。ユッカマウンテン計画の中止後のバックエンド対策の代替案の検討を行ったブルーリボン委員会の勧告に対応した基礎研究も継続されている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 低レベル放射性廃棄物に關して、GTCCについてはWCS社が受け入れ貯蔵の認可取得、A-Cレベルは既に操業中である²⁹⁾。 ● 廃止措置の効率向上のため、冷戦の遺産である施設を対象とした浄化に伴う、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分等の技術開発が盛んに実施されてきている¹²⁾。 ● 高レベル放射性廃棄物の処分に關して、坑道型の地層処分に加え、超深孔処分についても研究開発を進めるべきとしたブルーリボン委員会の勧告を受け、DOEが超深孔処分のフィールド試験の計画を進めている²³⁾。 ● 現在稼働している唯一の地層処分場であるWaste Isolation Pilot Plant (WIPP、兵器開発の過程で発生した超ウラン元素を含む廃棄物の処分場)の操業を通じたノウハウが蓄積されている。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 廃止措置技術及び低レベル廃棄物処理は、基礎研究の段階ではない。 ● 高レベル放射性廃棄物は、EU圏内の人的・物的リソースを用いて、大学や研究機関において、大規模かつ集約的な基礎研究が展開されている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 低レベル放射性廃棄物においては、英、仏、スペイン、スロバキア等多くの国で処分施設が運用されている。 ● また、フランスでは、短寿命・低中レベルの廃棄物の処分場を操業しており、ラ・マンシュサイトでは、処分場を閉鎖し、300年間の監視を始めている。 ● 廃止措置の効率向上のため、特性評価、測定、解体、除染、減容化、処分等の開発が各国で実施されている¹²⁾。 ● フィンランドでは、2015年11月、処分実施主体のポシヴァ社に処分場の建設許可を發給され、高レベル放射性廃棄物の地層処分場サイトが世界で初めて最終決定された。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 廃止措置技術及び低レベル廃棄物処理は、基礎研究の段階ではない。 ● 高レベル放射性廃棄物は、米国や欧州、日本で研究開発の経験を積んだ研究者を中心に、大学や研究機関で精力的な研究が展開されるようになってきている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 低レベル放射性廃棄物処分場は、地方ごとに浅地中の埋設処分することが決められており、2ヶ所の処分場が操業を開始している。 ● 一部研究炉の廃止措置研究が進んでいるが、商業炉の廃止措置についての研究・開発は進んでいないと思われる³⁰⁾。 ● 高レベル放射性廃棄物については、複数のサイト調査地域が選定されたものの、原子炉導入を積極的に進めているフェーズにあり、HLW処分の応用面での技術開発における成熟度は高くない。

韓国	基礎研究	○	→	● 廃止措置技術及び低レベル廃棄物処理は、基礎研究の段階ではない。 ● 乾式再処理を前提とした処分に関する研究を中心に、大学や研究期間で研究が精力的に行われている。
	応用研究・開発	○	↑	● いくつかの高経年の発電所を対象に、廃止措置を想定した検討や研究開発が進みつつある。 ● 中・低レベル放射性廃棄物に関して、処分施設が供用されている ³¹⁾ 。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 増田純男, 佐久間秀樹, 梅木博之, 地層処分の変遷 第1回地層処分黎明期 (1950年代~1980年代中頃), 日本原子力学会誌 57, 325-330 (2015).
- 2) 安俊弘, 高レベル放射性廃棄物処分: 概念発展史と今日の課題, 科学 83, 1152-1163 (2013).
- 3) 原子力規制委員会. 炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について (案). 2016年5月
- 4) IAEA, OVERCOMING BARRIERS IN THE IMPLEMENTATION OF ENVIRONMENTAL REMEDIATION PROJECTS, IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NW-T-3.4, 2013
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団, 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告—平成3年度—, PNC TN 1410 92-081 (1992).
- 6) 核燃料サイクル開発機構, 我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-, JNC TN1400 99-020 (1999).
- 7) 増田純男, 佐久間秀樹, 梅木博之, 地層処分の変遷 第3回地層処分黎明期 (2000年頃以降), 日本原子力学会誌 57, 480-485 (2015).
- 8) 「原子力政策をめぐる最近の動向」、経済産業省資源エネルギー庁、総合資源エネルギー調査会総合部会第2回会合資料4、2013年4月。
- 9) 「高レベル放射性廃棄物貯蔵管理事業」、日本原燃(株)、
<http://www.jnfl.co.jp/recruit/business/chozou.html>.
- 10) 「地層処分事業の安全確保 (2010年度版) —確かな技術による安全な地層処分の実現のために—」、原子力発電環境整備機構、NUMO-TR-11-01、2011年9月。
- 11) 「核燃料サイクル」、日本原子力学会、再処理・リサイクル部会、
(<http://www.aesj.or.jp/~recycle/nfctxt/nfctxt.html>)、2015年6月。
- 12) OECD/NEA, R&D and Innovation Needs for Decommissioning Nuclear Facilities, NEA No. 7191, 2014
- 13) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分概念検討書 (第1次 TRU レポート)、JNC TY1400 2000-001, TRU TR2-2000-01, (2000).
- 14) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構、TRU 廃棄物処分技術検討書 (第2次 TRU レポート)、JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).

- 15) 資源エネルギー庁、科学的有望地の要件・基準についての基本的考え方、地層処分技術 WG の検討について、総合資源エネルギー調査会放射性廃棄物ワーキンググループ、第 13 回会合資料 http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/houshasei_haiki_butsu_wg/pdf/013_01_00.pdf
- 16) 経済産業省、沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会（第 3 回）配布資料 http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/engan_kaiteika/003_haifu.html
- 17) Y. Iguchi, et. al. Integration of Knowledge Management System for the Decommissioning of Nuclear Facilities. JSME, Vol.3, No.3. 2016 年 6 月
- 18) Istvan Szoke et.al, J.Nucl.Sci.Tech. 2015, Vol52, No.3, 371-387
- 19) <http://www.jst.go.jp/impact/program/08.html>
- 20) Nuclear Waste Management at Olkiluoto and Loviisa Power Plants, Review of Current Status and Future Plans for 2010 –2012, Posiva, TKS-2009, 2010.
- 21) Erja Kainulainen, Regulatory oversight of nuclear safety in Finland, Annual Report 2015, STUK, STUK-B 203, 2016.
- 22) Finnish report on nuclear safety, Finnish 7th national report as referred to in Article 5 of the Convention on Nuclear Safety, STUK, STUK-B 205, 2016.
- 23) <http://www.energy.gov/ne/downloads/research-development-and-demonstration-roadmap-deep-borehole-disposal>
- 24) 日本原子力研究開発機構、わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価 - 直接処分第 1 次取りまとめ-、JAEA-Research 2015-016 (2015).
- 25) (財)原子力発電技術機構廃止措置総合調査委員会編. 廃止措置技術ハンドブック 除染・解体・再利用編. 2007 年 5 月
- 26) 大道 博行. Laser Review. 原子炉廃止措置における光・レーザー技術の適用可能性 (レーザー学会創立 40 周年記念) -- (「原子力施設の保守安全,廃止措置のためのレーザー技術」特集号). 2013 年 11 月
- 27) 芝原 雄司他. 原子力施設の廃止措置における大型機器解体シナリオの最適化に関わる検討. 日本原子力学会和文論文誌. 2013 年 9 月
- 28) 原子力規制庁. 総合規制評価サービス (IRRS) において明らかになった課題への対応について. 2016 年 3 月
- 29) National Report for Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. USA. 2014 年 10 月
- 30) National Report for Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. China. 2014 年 10 月
- 31) National Report for Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Korea. 2014 年 10 月

3.8 太陽光発電

（1）研究開発領域の簡潔な説明

太陽光発電は、太陽の光エネルギーを直接電気に変換する発電方式である。ここでは、シリコン系、有機系、有機無機ハイブリッド型ペロブスカイト系、コロイド状量子ドット系、レアメタルフリー薄膜系、集光用化合物系などの太陽電池材料や発電システムに関する研究開発を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

近年の地球温暖化問題の顕在化、さらにはエネルギーセキュリティの確保の観点から、現在世界中でエネルギー政策の見直しが進んでいる。低炭素エネルギーのひとつとして再生可能エネルギー、特に、太陽光発電の導入が世界的潮流となる中、日本国内でも固定価格買取制度の後押しを受け太陽光発電の普及が進んでいる。2030年度長期エネルギー需給見通しでは、再生可能エネルギー発電の電源構成比率目標値は22～24%（水力8.8～9.2%程度、太陽光7.0%程度、バイオマス3.7～4.6%程度、風力1.7%程度、地熱1.0～1.1%）となっており、太陽光発電への期待は大きい。

太陽光発電の普及拡大には、引き続き発電コストの低減を進める研究開発を行うと同時に、長期に亘って持続的に太陽光発電システムを国家の基幹電源として浸透させるための長期持続循環型の太陽光発電システム技術開発が期待される。様々な課題に広く取り組むことが必要であり、高効率・低コストの革新的太陽電池の開発（ペロブスカイト、コロイド状量子ドット、薄膜タンデム、III-V族集光セルなど）に加え、地球規模での太陽電池普及を支えるための「レアメタルフリー薄膜太陽電池の開発（Sn系、Fe系をベースとする新規材料）、太陽光発電と他エネルギー形態（エネルギーキャリアである水素、数百度を利用する熱発電）を融合した太陽電池のハイブリッドエネルギー利用の基盤技術研究などが求められている。

[動向（歴史）]

太陽光発電に利用されるシリコン太陽電池は1954年に、アメリカのベル電話研究所でアソン、フラー、シャピンという3人の研究者によって発明され、1958年に世界で初めて実用化されたが、当時の太陽電池は大変高価であったため、当初は太陽電池でなければ電力を供給できない場所で使われた。1970年代には、第一次石油危機を契機に、日本は石油に依存しすぎる産業構造やエネルギー調達手段に対して再考を迫られ、当時の通産省が策定したサンシャイン計画を推進した。1980年代には、官・学・産が一体となった太陽光エネルギー開発体制が整い、同時にソーラーシステム普及の支援制度が設けられ、シリコン太陽電池の普及が始まった。

近年、結晶Si、薄膜Si、CIGS [Cu(InGa)Se₂]、CdTe、GaAs系集光型の太陽電池では、実用化が進み、より低コスト、より高効率を目指した開発が産学連携により行われている。太陽電池モジュールの価格は順調に低下しており、大規模なメガソーラから中規模なシステムでは、システム価格に占めるモジュール価格の割合は3～4割程度にまで低下してきた。今後のさらなる普及拡大と低価格化には、最もシェアの大きい結晶Si系においてもセルの高

効率化を含めたモジュールの高効率化により、整地・架台・配線・施工等の BOS（Balance Of System）コストあたりの設置量を増やすことが求められる。これは、国際的に普及が進む低価格結晶 Si 系モジュールとの差別化においても重要な方向性となる。また太陽光発電システムとしての利用技術・標準化・規格化技術なども普及拡大につれ重要度を増している。

結晶 Si 系太陽電池では、1999 年から 15 年間にわたり単結晶 Si 太陽電池の変換効率の最高値とされてきた 25%の壁が突破された。Panasonic 社は、高品質なアモルファス Si 層により接合を形成する「ヘテロ接合」の進化と、電極を全て裏面に形成する「バックコンタクト型」を組み合わせることにより、実用サイズ（セル面積 143.7cm²）のセルで変換効率 25.6%を達成している²⁾。SHARP も、コンソーシアム形式のプロジェクトである NEDO 委託研究「極限シリコン結晶太陽電池の研究開発」の成果を活用することにより、同様のセル構造で小面積（セル面積 3.72cm²）ではあるが、変換効率 25.1%を達成した。また、米国 SunPower 社も 121 cm²のバックコンタクト型セルで 25.0%を達成している。このように、高効率化セルの開発競争においては、日本企業の高い技術力が改めて示されたといえる。一方で、従来の拡散型の発展系である PERL セルでも中国 Trina Solar 社が 22%を超える高効率を達成している。

薄膜 Si 系太陽電池は、バルク結晶 Si 系モジュールの低価格化に押され苦しい市場状況が続いており、その結果、大学等における基礎研究、産業界での量産技術開発とも、縮小傾向にある。しかし、今後のさらなる生産量増大が必須の太陽光発電市場において、材料の安定供給の面での優位性を考えると、中長期的な研究開発の継続が重要な分野と言える。またその特徴からエナジーハーベストデバイスとしての活用も期待される。

CIGS 太陽電池は、ソーラーフロンティア社が年産 1GW の生産能力を有し、小面積セルでも世界最高水準の 22.3%を誇り³⁾、日本が世界を牽引している。CdTe 太陽電池では First Solar 社が年産 2.7GW と世界を牽引する生産能力を有している。一方で、後述のとおり環境負荷が小さく豊富な元素を使った新材料（Cu₂ZnSnS₄、Cu₂O、Cu₂SnS₃、SnS、ZnSnP₂、FeS₂などの鉄系半導体）などの研究開発が注目される。

集光型太陽光発電は、太陽電池の使用量が圧倒的に少量化できるため、低コスト化のための新技術として注目されており、プレーヤーが増加してきている。集光型太陽電池の関連技術は毎年、着々と進歩しており、集光用の超高効率セルで 46%、集光型太陽電池モジュールで 35%、集光型太陽光発電システムで 30%にまで伸びてきている。これらの効率向上のレーニングカーブより、2025 年には、セルで 50%超、モジュールで 45%、システムで 40%にまで効率が向上することが予測されており、今後のさらなる発展に期待できる。また、直達日射量の多い地域では、今後ニーズが増えることが予想される。2016 年には住友電工がモロッコに 1MW の集光型太陽光発電システムを設置することが決まり⁴⁾、高日照地域への今後ますますの進出が期待される。集光型太陽光発電は、太陽光発電の中で最も高い効率を有することより、その応用についても近年盛んに研究開発されている。たとえば、超高効率集光型太陽光発電からの電力で水を電気分解して水素を得る効率（Solar to hydrogen: STH）において、東京大学と宮崎大学は世界最高の 24.4%を報告している⁵⁾。また、集光することにより高温が得られることを利用し、太陽光発電と太陽熱のハイブリッド発電についての研究も、近年注目を集めている。熱としての利用価値の高い数百度の熱をとりだすため、太陽電池も数百度で駆動させ、太陽電池と熱のトータルでの太陽光エネルギー利用効率で 45%程度が得

られている⁶⁾。

日本は Si、CIGS、GaAs 系全てに高い技術を持っているが、欧州、米国も高い技術開発力を維持しており、実用技術分野では研究機関に試作生産ラインを整備し、新材料や設備開発などの周辺産業を含む技術革新に貢献している。日本では、結晶 Si 太陽電池は企業主体で研究開発し高い技術水準を維持している。CIGS 太陽電池では企業が高度な製造技術を有し、これを支える形で大学・国立研究所が学術的知見の蓄積・提供と新たな高効率化要素技術の開発を行っており、世界最高水準の技術を有している。多接合や量子ドットといった超高効率太陽電池などの次世代技術への研究開発も米国、日本、欧州で進められているが、先進諸国の太陽電池企業の多くは中国、韓国など新興国や CdTe 太陽電池との低コスト競争により停滞傾向にあり、産業の基幹である結晶 Si 系太陽電池の生産はすでに新興国に追い越された。性能と信頼性、ブランド面で日本製は優位ではあるが、いつまで優位性を維持できるか不安がある。

一方、革新的太陽電池としては、材料としては、有機系、有機無機ハイブリッド型、コロイド状量子ドット系、レアメタルフリー薄膜系が将来を有する候補として考えられている。これまで、有機系太陽電池においては膨大な研究が実施されており、各種の新規材料開発によって高効率化が達成されてきた。その結果、有機薄膜太陽電池では 10%以上、色素増感太陽電池では 12%以上の変換効率が得られている。ペロブスカイト太陽電池では発明からわずか 7 年で 22.1%⁷⁾の変換効率が達成されおり、急激な変換効率の上昇に伴い日本、米国、欧州、中国、韓国等、世界中で熾烈な研究開発競争がなされている。そのため、ペロブスカイト太陽電池は日本発の革新的太陽電池にもかかわらず、研究開発では世界の後塵を拝する結果となっている。コロイド状量子ドット系では 11.6%の変換効率が達成されている⁸⁾。コロイド状量子ドットは GaAs 系の真空技術を用いる量子ドットではなく低コストで形成可能な溶液プロセスで形成できるコロイドを用いた量子ドットであり塗布プロセスを利用できる低コストかつ高効率が期待できる。ただし、現状の 10%を超えるものは PbS、Zn-Cu-In-Se 合金などの環境負荷の大きな元素あるいはレアメタルを利用しており、これを代替することと高効率化が求められている。

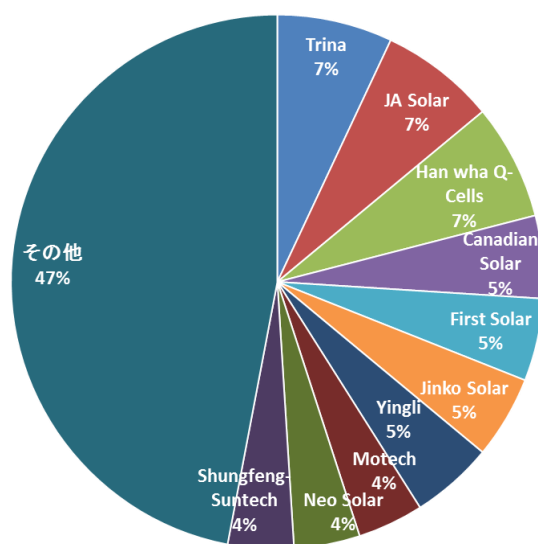
さらに、レアメタルフリー無機薄膜系では、Cu₂ZnSnS₄系では 12.6%⁹⁾、Cu₂O では 8.1%¹⁰⁾、Cu₂SnS₃系では 6.7%¹¹⁾が報告されている。特に Cu₂ZnSnS₄系は日本発の材料であり IBM (米)の10%近い変換効率の報告を契機に世界中で研究されている。また、SnS、ZnSnP₂、鉄系半導体薄膜 (FeS₂ など) では 5%を超える変換効率は現状では報告されていないが、バルク結晶作製と物性評価、薄膜形成技術などの太陽電池応用に欠かせない重要な基礎研究が進んでおり、中・長期的な太陽電池新材料として大きく期待できる。

さらに、革新的太陽電池として、構造としては、すでに 20%以上の高効率を実証されている太陽電池同士を組み合わせたタンデム型太陽電池が将来を有する候補として考えられる。禁制帯幅 (E_g) の広い太陽電池 (1.5~2.0eV 程度、トップセル) と狭い太陽電池 (0.9~1.2eV 程度、ボトムセル) を積層させることで 30%以上の変換効率が期待できる。製造プロセスや材料使用量低減の観点からコスト的に有利な薄膜型タンデム (トップセルには広 E_g 組成の CIGS、ペロブスカイト、CdTe など、ボトムセルには低 E_g 組成の CIGS) や、主流である結晶 Si ウェハに薄膜太陽電池を積層させるウェハ型タンデム (トップセルは上記と同様。ボトムセルは結晶 Si 太陽電池) が有力である。また、中・長期的には、上記の有機系、レアメ

タルフリー薄膜系などの革新的太陽電池同士を組み合わせた革新的タンデム型太陽電池も重要な研究テーマである。

太陽光発電システム技術の研究開発は、実用化された太陽電池の技術革新を含め、主として日本、欧州、米国の3極で進められており、中国、韓国における研究開発は現段階では実用化された分野の開発成果の吸収・国産化に主眼が置かれている。しかし、今後中国勢の台頭が一層顕著になると予想される。大規模なシステムの直流側のシステム電圧は主として米国で1500V化の動きが盛んであり、モジュールのPID（電圧誘起劣化）耐性の向上とあわせて、システム設計の最適化技術開発が求められている。

太陽電池セルの世界市場動向をみると、2015年の太陽電池セル（発電素子）の世界出荷量は前年比29%増の50.8GWで、上位10メーカーの総出荷量は全体の53%を占め、中国系メーカーが多くなっている（図3-5）¹⁸⁾。2015年の太陽電池セル出荷量の第1位は、2年連続中国トリナ・ソーラー（Trina Solar）で、出荷量は3.63GW、世界シェアは7%であった。第2位は、中国JAソーラー（JA Solar）で、出荷量は3.62GW、トリナ・ソーラーとの差はわずか14MWであった。同社はセル出荷量を2014年から29%増やし、トリナ・ソーラーとの差を縮めている。日本メーカーは、2014年に京セラがトップ10入りしたが、2015年では、シャープ、パナソニック、三菱電機と、どの日本メーカーもトップ10入りできなかった。



（出所：SPV Market Research「Annual Photovoltaic Manufacturer Shipment report」）

図3-5 世界市場における太陽電池セルメーカーシェア上位10（2015年 年間出荷量）¹⁸⁾

（3）注目動向

[新たな技術動向]

- レアメタルフリー薄膜

世界最高水準の研究が展開されており、光吸収層の高品質化のみならず、p型光吸収層とn型バッファ層界面のバンド設計（キャリア再結合ロスを低減するための伝導帯接続）が積極的に活用されている¹²⁾。硫黄系では、Cu₂SnS₃（Ge添加）で豊田中研が6.7%¹¹⁾、SnSで

立命館が 2.5%¹³⁾、リン系では京都大学・立命館大学が ZnSnP_2 で世界初の 1% 超え¹⁴⁾、究極の材料として期待される Fe 系では、奈良先端科学技術大学院大学 (NAIST) が発電には至っていないもの FeS_2 の物性制御 (導電型、キャリア濃度)・デバイス設計に取り組んでいる¹⁵⁾。また、CdTe 太陽電池でも進められているように、薄膜ではなく、理想な半導体材料に近いバルク結晶を作製して、基礎物性測定、物性制御、太陽電池構成層とのマッチング、デバイス化といった、基礎に立ち返った研究が、CZTS¹⁶⁾や ZnSnP_2 ¹⁷⁾で進められており、今後の研究のトレンドになると思われる。

- ペロブスカイト太陽電池

韓国化学技術研究所 (KRICT) は、小面積 (4mm 角) で 22.1% の変換効率を達成している⁷⁾。また、スイスのローザンヌ工科大学では、透明導電膜の表面を緻密な酸化スズでピンホール無く覆うことで 20% を超える認証値を得ている。ペロブスカイト結晶を均一平坦な膜に成膜するために、JST 戦略的創造研究推進事業において、京都大学では鉛化合物の高純度化及び合成中間物質の検証を行い、良質なペロブスカイト結晶薄膜の作製に成功し 20% を超える変換効率を達成している。物質・材料研究機構は、電子輸送層とホール輸送層に使用する材料を無機材料に変更し、それぞれに Li イオンや Nb イオンを添加し導電性を向上させて、面積 1cm^2 以上で 18.2% を達成すると共に疑似太陽光 (1sun) 連続照射、1000 時間の耐久試験をクリアしている。華中科技大学のグレッツェルセンターでは、有機ホール輸送材を使用せずに、カーボン電極や電子輸送層をスクリーン印刷で作製し、12.8% の変換効率を達成し、太陽光連続照射下で 1000 時間の耐久試験をクリアしている。

- コロイド状量子ドット

コロイド状の量子ドットを用いた太陽電池は主に電解液を使う増感型とナノヘテロ接合固体型の二種類があげられる。コロイド状の量子ドット増感太陽電池の光電極の表面パッシベーションが効率向上の鍵であった。2007 - 2008 年に、電通大では ZnS パッシベーションにより CdSe コロイド状量子ドット増感太陽電池の変換効率を 0.1% 以下より 2% 以上に向上させた。これを契機に、量子ドット増感太陽電池は世界的に注目され研究が活発になってきた。量子ドット増感太陽電池では、すでに CdS 、 CdSe 、 CdTe 、 PbS 、 Sb_2S_3 、 CuInS_2 、 CdSeTe 、 $\text{CuInSe}_{1-x}\text{S}_x$ と ZnCuInSe など様々なコロイド状の量子ドット、または core-shell 構造コロイド状の量子ドット CdSe/CdTe 、 ZnTe/CdSe 、 CdS/CdSe 、 PbS/CdS などが適用されてきた。中国の大学とスペインの大学および電通大との共同研究により、2014 年に CIS 量子ドット増感太陽電池で 6.66%、2015 年に CdSeTe/CdS core-shell 構造量子ドット増感太陽電池で 9% 以上、2016 年に Zn-Cu-In-Se 合金量子ドット増感太陽電池で 11.6%⁸⁾ が達成されている。

一方、固体型ヘテロ接合量子ドット太陽電池は、n 型の ZnO や TiO_2 ナノ構造とコロイド状の p 型の PbS や PbSe 量子ドット層 (塗布で形成) から構成される。この系では、固体の量子ドット層を形成する際に置換した量子ドット表面のリガンドと各ヘテロ界面の制御とパッシベーションはその高効率化と安定性の鍵となる。これまでに、様々な有機分子や無機分子を量子ドット表面パッシベーションのためのリガンドとして適用されてきた。また、n 型層としては、ナノワイヤーの配列やメソポーラスナノ粒子薄膜など様々なナノ構造を用いている。日本では東京大学と電通大は効率向上の指針を得るために、積極的に基礎研究を行っている。現在では、MIT やトロント大学がリードしており、 PbS 量子ドットヘテロ接合太陽電池の最高効率は 11.3%⁷⁾ である。

- 集光型太陽光発電

集光型太陽光発電の高効率を活かしたアプリケーションとして、太陽電池から発生した電力を用いて水を電気分解し水素を発生させるという技術が開発されている。東京大学、宮崎大学、住友電工の共同研究により、Solar to Hydrogen の効率において 24.4%の世界最高効率を達成したことが報告されている⁵⁾。

集光型太陽電池と集光太陽熱のハイブリッド利用において、高温で太陽電池を動作させるという研究が報告されている⁶⁾。これは、400°C程度の高温を熱回収・利用したいため、太陽電池も 400°C程度で動作させてしまおうという試みである。100 倍集光下において、多接合型太陽電池を 400°Cで動作させると、太陽電池の変換効率は 22%程度にまで低下するが、400°Cの熱エネルギーも 23%程度で利用できるため、システムトータルとしては 45%ほどの効率が見込めるという試算が報告されている。

- 太陽光発電システム

システムの発電コスト低減に向けた各構成機器の長寿命化技術開発と、発電電力量の最大化に向けた運用技術の開発が進んでいる。維持管理技術としては、モニタリング技術、不具合箇所発見のための診断技術の開発が盛んである。モニタリングでは、セントラルインバータの出力をモニタリングするのみでなくストリング監視が広く用いられているが、低コストでのモジュール毎監視技術として、各モジュールの端子箱に電力線通信が可能な電圧センサを組み込むものが開発されている。故障診断では、モジュールの電気的特性のみではなく、屋外におけるエレクトロルミネッセンス（EL）やフォトルミネッセンス（PL）画像撮影、赤外線（IR）画像撮影と、これらを大規模システムにおいてドローンを用いて半自動で行うシステム等の開発が進んでいる。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

結晶 Si 系太陽電池に関しては、2015 年より NEDO プロジェクトで、世界最高レベルの競争力を有する結晶 Si 太陽電池の実現を目指し、先端複合技術 Si 太陽電池の共通基盤に関するコンソーシアム型の研究開発が開始された。豊田工大を中心とする 6 大学コンソーシアム体制により、ヘテロ接合太陽電池など次世代型セルのオープンイノベーションプラットフォームの構築が進んでいる。産業技術総合研究所では、再生可能エネルギー研究所において、次世代薄型結晶 Si モジュールの研究開発が進められている。また、同じ研究所内で実施されているシリコンナノワイヤー太陽電池の開発に特化した「革新的エネルギー研究開発拠点形成事業」では、プロジェクトの後期において、テーマの選択と集中が進んでいる。

NEDO プロジェクトで、ソーラーフロンティア、産業技術総合研究所と複数の大学からなるオールジャパン体制で CIGS 太陽電池の高効率化・物性評価をより一層進める研究がスタートし、材料設計・分析・高効率セル作製を重点的に行っている。CZTS については、日本発の材料であり、JST の CREST でも研究が進められている。

JST の ALCA では、ペロブスカイト/結晶 Si タンデム型太陽電池、フォトニックナノ構造を利用した光マネジメント、窒化物半導体、Si 系クラスレート、多元系混晶、資源戦略性に優れた薄膜太陽電池技術など挑戦的な課題が実施されてきたが、研究成果の社会還元を加速化するために、実用技術化プロジェクトへの再編が進められている。中でも新たな取り組みとして、ペロブスカイト太陽電池では、JST のさきがけ研究者を結集した横断プロジェクト

の成果が期待される。

2011年6月より、集光型太陽光発電に関する日欧の共同研究開発が始まり、欧米においても集光型太陽光発電システムの重要性が再認識されている。本プロジェクトでは、日本における超高効率太陽電池・材料、集光モジュール、およびシステムに関する研究開発が活発に行われており、ヨーロッパ諸国との連携を強化している。2015年7月より、超高効率・低コストIII-V化合物太陽電池モジュールの研究開発がNEDOプロジェクトとして開始されており、超高効率太陽電池モジュールの開発を実施している。

（4）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

レアメタルフリー薄膜太陽電池では、CZTS、 Cu_2SnS_3 、SnS、 Cu_2O 、 ZnSnP_2 、Fe系材料（ FeS_2 、 CuFeS_2 ）などの様々な材料の研究が進められている。課題は大きく分けて界面と光吸収層の2点がある。薄膜太陽電池は極微領域の薄膜界面の品質に大きく性能を左右されるため界面の設計が重要であるが、薄膜の表面敏感さや界面の元素ミキシングによって界面の電子構造評価には高度な技術を要する。特に、光吸収層とバッファ層との界面設計（具体的にはそれぞれのバンド設計）が必須であるものの、最適設計・デバイス作製は十分ではない。また、光吸収層の課題としては当該の材料が真に太陽電池に適しているかどうかは現時点では明確に判断する方法がなく、 E_g によって材料を選定し、デバイスを作製して性能を評価するというトライアルアンドエラーを積み重ねているという問題がある。さらに、薄膜は様々な成長方法や条件があり、ある方法で作製した薄膜が限界まで高品質化されているかどうかの判断は困難である。よってCdTe太陽電池でも行われているように理想に近いバルク結晶を作製し、基礎物性・物性制御法・適したデバイス構造の検討などの、基礎に立ち返った研究が必要とされている。この手法で適切な材料を選定し、低コスト化に向けた薄膜作製技術を開発することが望まれる。

ペロブスカイト太陽電池は鉛を使用している為、製造や廃棄に特別な管理が必要となり製造コスト等の上昇につながると共に、環境上のリスクも大きく安全面においても実用化への大きな障害となっている。鉛フリー化が必要であるが、鉛代替になる材料も少なくまだ十分な特性が得られていない。

コロイド状量子ドット系では、高効率化が進んでいるものの依然としてPbSやZnCuInSeなどの環境負荷の大きな元素あるいはレアメタルに頼っている。これはイオン性の高いII-VI族をベースとする半導体がコロイド形成しやすいという合成上の利点があるためである。ただし、太陽電池に適した E_g を持つII-VI族半導体は概ねPbやCdなどの環境負荷の高い元素を含んでいる。

発電システムでは更なる発電コストの低減と長期的に基幹電源として運用するための技術開発が課題である。発電コスト低減に向けては、太陽電池モジュールの高効率化や高温環境下でも発電効率の低下が少ない太陽電池の開発のほか、施工コスト低減や設置可能性向上に向け、軽量、フレキシブルな太陽電池開発が求められる。これらの技術は、小面積や垂直面、曲面など、電力需要地と近接した場所への設置を可能とする事から、太陽光発電大量導入時に重要となる自家消費率の向上にも有効な技術となる。長寿命化技術開発では、異なる寿命

を持つシステムの各構成機器の内、交換が必要なものを適切に検出し、交換・修理等を行うことで、システム全体としては常に健全性を維持し長期的に運用を継続するための、より高精度な不具合検出技術や点検技術、発電データのビッグデータ解析等による不具合の予兆検出等も必要となる。これらを発電量予測や EMS と組み合わせることにより、より信頼性の高い長期安定電源としての運用が可能となる。

超高効率集光型太陽光発電では、集光用多接合型化合物太陽電池の変換効率が日々向上しているため、さらなる超高効率化が約束されている。集光にはレンズ等の光学系を用いているが、現状の光学効率は 85%程度にとどまっている。また、光学系の追尾誤差許容角度（どれくらい太陽光追尾がずれても光学系が光を太陽電池に集光できるか）は現状、1 度弱であり、かなり正確な太陽追尾が必要となる。以上のことより、光学効率の向上、光学系の追尾誤差許容角度の増大、正確で安価な追尾架台の開発が、集光型太陽光発電を飛躍的に高効率化することにつながる。さらに、太陽光発電と太陽熱を同時利用するハイブリッド発電においては、利用価値の高い数百度の太陽電池駆動が必要となるため、数百度の温度に耐える太陽電池開発が、魅力的かつ重要な開発項目となる。

有機薄膜太陽電池は、比較的高い効率が達成されている一方で、基本的な動作原理について未だ不明な部分も多い。特に、材料のバンドギャップに比べて得られる電圧が他の種類の太陽電池よりも低く、この問題を解決することがさらなる効率向上の鍵となる。最近の新規な材料開発によって、この電圧ロスが小さな値を示す材料が見つかってきているが、本質的な原因を究明して材料設計に活かすための基礎的な研究が求められている。

[今後取り組むべき研究テーマ]

高効率太陽光発電の大規模広域普及に向けた基盤技術研究では、汎用太陽電池モジュールの変換効率を現在の 20%程度から 40%程度に高め、それによって大規模広域普及を可能にするための基盤技術研究を総合的に進める。具体的には、(i)新構造太陽電池の研究開発 [多接合型（接合界面の解明とプロセス技術開発）、量子ナノ構造型（量子ドット表面制御技術、量子ドットのサイズ・配列の制御、環境負荷の小さい元素からなる半導体で豊富な資源量のある CZTS、CTS、SnS、FeS₂ のコロイド形成技術確立）、ホットキャリア型、多励起子生成型、有機薄膜型太陽電池の基礎的動作原理解明、有機無機ハイブリッド（ペロブスカイト）型（耐久性及び含有 Pb フリー化、大面積塗布プロセス）など]、(ii)低コスト高効率化を可能にする光物理研究開発（新集光システム、集光レンズ、光マネジメント、波長変換技術、アップコンバージョン、ダウンコンバージョンなど）、(iii)その他の新規概念太陽電池開発などを推進する。

ペロブスカイト太陽電池については、鉛フリーの新材料の開発も急務である。本電池は塗布・低温プロセスでの作製が可能であるが、その反面常温での耐久性に難がある。劣化の原因は、水分・光・熱などがあり材料やプロセスの改良等で耐久性の向上がなされているが、まだ十分とは言えない。水分や光は、電子輸送層やホール輸送層の最適化が必要となる熱安定性に関しては、ペロブスカイト結晶構造が起因する為、高い耐熱性を持つペロブスカイト構造を開発しなければならない。

レアメタルフリー薄膜太陽電池では、CZTS、Cu₂SnS₃、SnS、Cu₂O、ZnSnP₂、Fe 系材料などの様々な材料について、基礎物性が明確となった効果的に高効率化が図れるバルク結

晶作製、半導体物性評価（特にキャリアダイナミクス評価）、デバイス構造最適化（特に構成層のバンド接続設計）が必要とされている。目標となる電子物性値、デバイス性能を明らかにした上で、低コスト製造に必須な薄膜形成プロセスの開発を行うべきである。

発電システムでは、長期持続循環型の太陽光発電システムの実現に向け、異なる寿命を持つモジュール、インバータ、架台、ケーブルなどを適宜交換しながら、発電設備としてシステムを50年、100年と持続的に環境負荷を減らしながら維持していくための技術開発が重要となる。そのためには、各構成機器の長寿命化に加え、不具合検出技術と不具合の予兆検出としての点検技術や発電データの解析技術が求められる。また、交換を前提としたシステム構造やモジュール構造、低コストで交換可能な施工技術や、交換後の機器のリサイクル技術開発も求められる。太陽電池モジュールの高効率化や軽量化については継続的な技術開発を行い、機器更新時に最も適切な技術を用いて設備更新を行うことにより、発電コスト低減や環境負荷低減を実現する。

超高効率集光型太陽光発電では、光学効率の向上、光学系の追尾誤差許容角度の増大、正確で安価な追尾架台の開発が、集光型太陽光発電を飛躍的に高効率化することにつながる。太陽光発電と太陽熱を同時利用するハイブリッド発電においては、数百度の温度に耐える太陽電池開発が、魅力的かつ重要な開発項目となる。短中期的には、光学系の光学効率向上や追尾誤差許容角度の増大のための最適化設計が取り組むべきテーマとなる。これにより、集光型太陽光発電の効率を一気に向上させることが重要である。中長期的には、上記で効率を向上させた集光型太陽光発電から安定して高い出力を得るために、正確で安価な追尾架台の開発が取り組むべきテーマとなる。また、ハイブリッド発電においては、短期的に、高温で駆動可能な太陽電池を開発し、中長期的に、それらの熱発電とのハイブリッド化を進めるべきである。

（5）政策的課題

太陽電池の研究開発は、世界的な競争にさらされている。日本は太陽電池の研究水準・生産技術ともに世界トップレベルにある。これは従来の国家プロジェクトによって、企業・大学・研究所に、戦略的にファンディングが行われてきた成果である。今後、日本の優位性を確保するには、基礎研究段階からプロジェクト形式でより一層の産官学連携を実施することが重要である。特に、市場が拡大していく中で研究開発を加速するためにも、出口（生産）の見える太陽電池（結晶 Si や CIS）については、オールジャパンともいえる大学の叡智を結集して科学的知見を厳密に煮詰めながら、企業の研究開発・生産につなげていく必要がある。このオールジャパンを形成する際には、中心的な有名国立・私立大学のみならず、地方の大学にも優れた研究の種と力量があることを忘れてはならない。また、オールジャパン体制というプロジェクトそのものには重点的にファンディングしつつ、その体制の中で複数の大学に広くファンディングすることによって、未来の太陽電池界を支える若手人材の育成にも大いに役立てるべきである。太陽電池の研究開発を進めていく上では、基礎研究段階からプロジェクト形式で産学連携を実施することが重要である。研究内容が多岐に亘るため、単独の企業が独自に取り組むと研究投資に対する費用対効果が悪くなる。

さらに、太陽光発電を国家的に持続的に普及させるには、①初期導入のバリアの低下、②継続的な運用・保守（O&M）、③運用後のリユース・リサイクル、に関連する技術について、政策的なファンディング・標準化・ガイドラインの制定を行う必要がある。①については上記のような太陽電池の研究開発による低コストな太陽光発電システムの実現、固定価格買取制度（FIT）による投資回収率の向上などが、③についてはリサイクル技術の開発などが挙げられ、その取り組みが従来行われており、今後の継続が望まれる。②については太陽光発電システムのモニタリング技術、リペア技術、発電量予測技術などの O&M 関連技術が挙げられ、その技術開発はもとより業界としての O&M の実施項目のガイドラインの明確化も今後重要になる。

エネルギー分野では基礎は「学」、実用化は「産」という役割分担は効率的ではなく、双方の融合が必須である。政府主導で実用化研究を進めるためのプロジェクト研究拠点を構築し、共同研究（研究開発部分）と役割分担（市場化部分）を適切に進めながら、ファンディングを充実させた上で、そこに産学の研究人材を投入することも有効と考えられる。また、中長期の集中研究拠点を核とし国際的な人材獲得も視野に入れた革新的な基礎研究の強化と、その成果の迅速な応用展開に向けたネットワーク連携が重要な鍵となる。そのためには国策としての総合的な研究開発戦略の企画推進力強化が不可欠である。世界の太陽電池産業全体が過酷な価格競争に巻き込まれている中で、高性能太陽電池の開発を企業だけに任せることは、国際競争上も好ましくない。諸外国でも太陽光発電の技術開発に多額の国費が投入されている現状を見ると、日本政府もこのような研究開発に重点投資することが期待される。

太陽光発電導入による電力系統への影響問題については、各国で太陽光発電の普及拡大が進む中、ドイツなどでは太陽光発電導入量が電力系統に対する連系許容限界に近づいており、特定の日を見ると風力と併せた再生可能エネルギーが半分以上の電力を供給している時間帯もある。そのため、電力系統の安定運用に向け、発電量予測技術の重要性が高まっている。翌日～リアルタイムまで予測のニーズは広く、衛星画像と地上観測データを用いて広域で正確に予測する技術の開発が進んでいる。日本国内においても同様の取り組みは進んでいるが、地上における気象庁の日射計測地点数が減少傾向にあることや、導入済の太陽電池のアレイ構成（方位など）がデータベース化されていないことから、予測の高精度化に向けて早急に取り組むべき課題は多い。また、逆潮流への対応、電力の広域融通に対応した変電・送電設備強化、さらに周波数や電圧変動の許容範囲を機器に影響しない範囲で緩和することによる変動発電源に対する許容性拡大など、電力系統自体を太陽光などの再生可能発電源に対応して改良する対応も必要である。ただし、太陽光からの発電量平準化に関しては、発電サイトや変電所に大規模蓄電設備を設置して出力を平準化することも可能であり、電力系統の強化と大規模蓄電設備の導入との間でコストパフォーマンスを熟慮した選択が重要である。

（6）キーワード

シリコン系太陽電池、薄膜太陽電池、有機系太陽電池、軽量太陽電池、ペロブスカイト太陽電池、レアメタルフリー、コロイド状量子ドット、低コスト化、高効率化、分子設計、プロセス技術、劣化機構の解明、建材一体型太陽電池、BIPV、ZEB、ZEH、超高効率太陽電池、タンデム、量子ドット

（7）国際比較

結晶 Si 太陽電池

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	● 個別の企業が次世代技術の基礎研究開発を実施することが、太陽電池産業が新興国との厳しい価格競争にあることから困難となる中、公的支援に基づく共通基盤技術の開発、オープンイノベーションプラットフォームの構築が着実に進められている。NEDOプロジェクトを受託した6大学コンソーシアム、産総研、JAISTと企業群が緊密な連携の下で、先端技術を複合した高性能太陽電池や、Siの理論限界を超える技術について研究されている。
	応用研究・開発	◎	→	● 結晶Si系の技術開発は、原料技術からモジュールに至る各要素技術、実用サイズでの効率記録などの高性能化技術において世界トップレベルにある。特に、パナソニック社が世界最高効率25.6%を報告し、15年ぶりに実用サイズのセルで更新することで、その技術力の高さを改めて世界に示した。SHARP社、カネカ社も、相次いで変換効率25.1%を達成している。
米国	基礎研究	○	→	● NREL、MIT、アリゾナ州立大学などで、結晶Siの欠陥および不純物制御に関する実用太陽電池の高効率化を支援する基礎研究や、ペロブスカイトとのタンデム化など新規な取り組みが実施されている。
	応用研究・開発	○	↗	● SunPower社は、裏面接合型の高効率結晶Si太陽電池で、Panasonic社のヘテロ接合型太陽電池と結晶Si系の実用太陽電池における最高効率を競っており25.2%を達成した。Si基板に関連する周辺産業でも技術開発力が高いベンチャー企業が多く、融液からの直接成長やエピタキシャル基板など新しいアイデアが生まれている。
欧州	基礎研究	◎	→	● 結晶Si系の要素技術についての基礎研究は、非常に高い研究水準を維持している。独Fraunhofer研究所、Konstanz大、ISFH、オランダECN、ベルギーIMEC、仏INES、ノルウェーNTNUなど、各国の研究機関が中核的研究機関として学界・産業界をリードしている。トンネルバッシンションコンタクトや、キャリア選択性の新材料を利用したヘテロ接合セルなど新規な取り組みで多くの成果が報告されている。有機薄膜太陽電池の研究者の参入も多くみられる。
	応用研究・開発	◎	→	● 企業での開発の中心は、生産技術であり、研究機関との研究コンソーシアム体制が有効に機能している。装置メーカーによるターンキー製造装置の高度化も進んでおり、Roth&Rau社はPERCセルやヘテロ接合セルなど多様なセル構造に対するラインを提供している。ヘテロ接合セルは24%以上が可能としている。また、利用技術の開発や標準化、規格化では幅広い検討が行われている。
中国	基礎研究	△	↗	● 産業として急速な発展を遂げており、国家計画の下で、公的研究機関・大学が研究開発を推進している。研究員は、先進国への留学生が戻って活躍するケースや半導体分野からの転身が多い。現時点では、海外の研究機関等の追跡研究が主体であり、独創的な研究は限定的であるが、研究水準は上昇傾向にある。
	応用研究・開発	○	↗	● 企業は国外の大学や研究機関、製造装置メーカー等と連携して先端技術を導入・活用することで、高性能太陽電池の実現や、低コスト化などへの取り組みをみせている。企業間での技術情報に関する障壁が低いとため、導入された先端技術が、国内全体へ拡散する速度は非常に早い。Trina Solar社は多結晶のPERCセルで21.3%を達成したことを報告している。
韓国	基礎研究	△	↘	● 韓国政府は、半導体や液晶分野に続く産業として、太陽光発電産業として育成しようと研究開発を支援している。現実的な技術を中心として、原材料からセル、システムまで研究開発が進められている。
	応用研究・開発	○	↘	● Samsungグループ、LGグループ、Hyundaiグループなど、財閥系企業が太陽電池製造に参入し、技術開発を進めてきた。卓越した半導体技術を背景として技術水準は着実に上昇傾向にある。LG電子社は、バックコンタクトヘテロ構造セルで23.4%の変換効率を報告している。

化合物薄膜太陽電池（CIS、CdTe、レアメタルフリーなど）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● CIS太陽電池では、NEDOプロジェクトでオールジャパン体制（ソーラーフロンティア社、産業技術総合研究所、東京工業大学、立命館大学、東京理科大学、筑波大学、鹿児島大、龍谷大学）でコンソーシアムを形成して高効率化、材料設計、材料分析の研究を行っている。ソーラーフロンティア社が小面積セルで効率22.3%（認証機関測定）を達成している。また、自社測定ながら22.8%という世界最高効率を達成している。認証機関測定の世界最高効率は22.6%でドイツのZSWが報告している。 ● レアメタルフリー材料の研究水準が高く、ソーラーフロンティア社、産業技術総合研究所がCZTSSeでは世界最高レベル、豊田中央研究所がCu₂(Sn,Ge)S₃では世界最高効率の6%を達成している。また、Cu₂O、SnS、ZnSnP₂、Fe系などの様々な材料でも世界最高水準の研究が進められている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● CIS太陽電池では、ソーラーフロンティア社が7cm角のサブモジュールで効率18.6%を達成。モジュール生産では1GW/年を稼動。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● CdTe太陽電池では、First Solar社が小面積セルで世界最高効率22.1%を達成している。アリゾナ州立大学は単結晶CdTeを用いて効率20.3%を達成し、かつ非常に高い開放電圧（1.12V）を報告している。単結晶材料を用いた有効なドーパント選定や効率限界への挑戦などの研究が進んでいる。 ● NRELがCIS・CZTS太陽電池ともに世界最高水準の研究を行っている。 ● ワシントン大学ではペロブスカイト/CISのタンデム型太陽電池で17.4%（4端子構造）を達成している。 ● ハーバード大、MITがSnS太陽電池で世界最高水準の研究を行っている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● First Solar社がCdTe太陽電池の製造でトップ技術を有しており、技術革新により近年変換効率が著しく向上している。モジュール効率でも18.2%という高い効率を実現している。 ● 中国のHanergyが米国のMiasoleを傘下に置き、CIS太陽電池モジュールの開発・製造を行っている。
欧州	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● CIS太陽電池ではドイツのZSWが22.6%（認証機関測定）という世界最高の変換効率を達成している。スイスのEMPAが見出したカリウムをCIS表面に添加する方法で良好なpn接合を形成している。本技術をベースに、世界各国でも高効率化が進んでいる。 ● EPFLとEMPA（共にスイス）がペロブスカイト/CISのタンデム型太陽電池を開発し、効率21.4%（4端子構造）を達成している。 ● CZTSなどのレアメタルフリー材料の基礎的な研究が活発に進んでいる。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 中国のHanergyがドイツのSolibroを、中国のCNBMがドイツのAVANCISを傘下に置き、CIS太陽電池モジュールの開発・製造を行っている。
中国	基礎研究	△	→	● —
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 中国のHanergyがドイツのSolibroと米国のMiasoleを、中国のCNBMがドイツのAVANCISを傘下におき、CIS太陽電池モジュールの開発・製造を行っている。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● CIS太陽電池の研究活動は見られるが、まだ研究水準は高くない。CZTSなどのレアメタルフリー材料については研究が進んでいるものの顕著な成果は見られない。
	応用研究・開発	×	→	● —

有機薄膜型太陽電池

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↘	●有機半導体デバイスの基礎研究者が参入し、大学を中心に研究者が増加した。応用物理学会でも有機分子・バイオエレクトロニクスの方科に「有機太陽電池」の分類が新設されるなど、新たなトレンドとなった。また、化学の分野においては新規な有機半導体材料の合成研究が盛んになった。最近ではファンディングや企業との共同研究が減少傾向にある。
	応用研究・開発	◎	→	●三菱化学が世界に先駆けて実用化に向けた生産技術の開発などを進めている。また、東芝が高い効率とモジュール化などを報告している。一方で、その他の企業の研究のトライアルはすでに一巡し、開発の様子を見定めている現状である。
米国	基礎研究	◎	→	●カリフォルニア大学サンタバーバラ校やスタンフォード大学など西海岸を中心に、この分野の基礎的な研究を牽引している。とくに物理と化学分野の交流による共同研究が盛んに行われている。
	応用研究・開発	○	→	●Solarmer、Polyeraなど大学発のベンチャー企業による新規材料開発が盛んに行われているが、Konarkaの破綻後は太陽電池の生産を大規模に目指す動きはあまり見られない。
欧州	基礎研究	○	→	●大学を中心に、特にデバイス物理に係わる基礎的な研究が盛んに行われている。
	応用研究・開発	◎	→	●Heliatek、infinityPVなど、ロールトゥロールによって作成した有機薄膜型太陽電池を製品化することを目的としたベンチャー企業が複数存在している。
中国	基礎研究	○	↗	●新規な有機材料開発に関しては、大学を中心に人数をかけることで膨大な量の材料を合成しており、大量の論文を発表している。学術的には新規性の高い研究は少ないが、世界における変換効率の競争を牽引している。
	応用研究・開発	△	→	●有機系太陽電池の生産など応用に向けた取り組みはまだ見られない。
韓国	基礎研究	○	→	●大学を中心に研究が進められている。
	応用研究・開発	△	→	●有機系太陽電池の生産など応用に向けた取り組みはまだ見られない。

超高効率集光型（GaAs系など）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	●集光型太陽電池・化合物太陽電池の研究水準は、世界トップレベルにあるが、欧米との開発競争が激化している。ナノワイヤー・量子ドットなどの新概念太陽電池を対象とするプロジェクトが、JSTやNEDOの事業として行われている。
	応用研究・開発	◎	↗	●住友電工が、現状、世界で最もアクティブな集光型太陽光発電のメーカーとなっている。集光型太陽光発電とレドックスフローバッテリーを組み合わせた自立型システムの開発や、集光型太陽光発電と水電解による水素生成効率世界最高等、世界をリードしている。
米国	基礎研究	◎	↗	●NRELを中心に、超高効率多接合型太陽電池の研究が進んでいる。
	応用研究・開発	○	↘	●かつては、Amonixが世界最大の集光型太陽光発電システムメーカーとなっていたが、事業大幅縮小。
欧州	基礎研究	◎	↗	●ドイツではFraunhoferISEを、スペインではマドリッド工大を中心に、超高効率多接合型太陽電池の研究や集光型太陽電池モジュールの開発が進んでいる。
	応用研究・開発	◎	↗	●欧州では、大規模ではないが、集光型太陽光発電システムの会社が立ち上がっており、着々と世界各地で施工を進めている状況。
中国	基礎研究	×	→	●—

	応用研究・開発	△	→	● 追尾架台メーカーの活動のみが見られる。
韓国	基礎研究	×	→	● —
	応用研究・開発	×	→	● —

ペロブスカイト太陽電池

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↗	● ペロブスカイト太陽電池は日本発の革新的太陽電池にもかかわらず、研究開発に於いては世界の後塵を拝する結果となっている。ただ、JSTやNEDOのプロジェクトを始めとした国の主導的な取り組みが始まっており、今後の成果が期待される。特に、従来に無い全く新たな試みとしては、分野横断的なさきがけ横断プロジェクトが挙げられる。
	応用研究・開発	△	→	● ペロブスカイト太陽電池は欧米では既にベンチャー企業が創設され始めているが、我が国ではまだ基礎研究段階である。
米国	基礎研究	○	→	● ペロブスカイト太陽電池に関しては多くの大学で研究されているが、カリフォルニア大学バークレー校、ノースウエスタン大学がその先頭を走っている。この内、カリフォルニア大学バークレー校は非公式ながら19.3%の変換効率を達成している。ノースウエスタン大学は鉛フリーペロブスカイト太陽電池の研究開発で高い研究水準を有している。
	応用研究・開発	△	→	● スタンフォード大学やNRELでは、SiやCIGSをボトムセル層に使用したタンデム型太陽電池への応用開発が進んでいる。
欧州	基礎研究	◎	↗	● ペロブスカイト太陽電池では固体化セルを開発したオックスフォード大学、色素増感型太陽電池のメッカであるEPFL（ハグフェルト研）が世界の研究開発の中心となっている。
	応用研究・開発	○	↗	● ペロブスカイト太陽電池では同じく英国のベンチャー企業Oxford PhotovoltaicsとドイツのFraunhofer研究所が先陣を切っている。 ● オランダのSollianceは、塗布プロセスで効率10%の15cm角モジュールを試作している。Sollianceは、ペロブスカイト太陽電池モジュールの研究開発に米Nano-C、米Solardeck、豪dysol、日Panasonicが参加している。また、英specific社、豪CSIRO社など、セルモジュール開発を始めている。
中国	基礎研究	○	↗	● 有機系太陽電池の研究が激減し、それに代わってペロブスカイト太陽電池について多くの大学が研究開発を推進している。華中科技大学のグレッツェルセンターでは、有機ホール輸送材を使用せずにカーボン電極を使用し、12.8%の変換効率を達成し、太陽光連続照射下で1000時間の耐久試験をクリアしている。
	応用研究・開発	—	—	● —
韓国	基礎研究	◎	↗	● ペロブスカイト太陽電池の研究開発では世界のトップレベルを走っており、韓国化学研究所(KRICT)が世界最高変換効率19.7%（Newport認証）小面積(4mm ²)で22.1%を達成している。
	応用研究・開発	△	→	● 韓国GISTとオーストラリアCSIROが共同で、slot dieコーターをもいいたプラスチック基板でのRoll to Roll製造を試作している。

太陽光発電システム

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	↑	● 産総研を中心に、主としてNEDOプロジェクトにおいて新型太陽電池に対応した標準測定手法の開発、結晶シリコン系太陽電池モジュールの劣化機構の解明や、発電量定格の策定に向けた各種太陽電池の屋外発電特性評価などが実施されている。
	応用研究・開発	○	↑	● 産総研らによるNEDOプロジェクトにおいて参照用モジュールを用いた屋外における発電性能の高度測定手法開発が実施されているほか、EMSにおいてもJST CRESTにて太陽光発電大量導入を可能とするEMSに関する研究が実施されている。
米国	基礎研究	○	→	● NRELを中心にPV Module Reliability Workshopにおいて国際的に信頼性に関する知見を交換する取り組みが行われている。
	応用研究・開発	○	→	● Sandia国立研究所を中心にPV Performance Modeling Collaborativeにおいて太陽光発電の発電量評価に関するモデリングや評価手法開発における国際連携プロジェクトが行われている。
欧州	基礎研究	○	↑	● Fraunhofer ISEでは高効率化に向けた結晶シリコン太陽電池の新たな配線方法の研究などが行われている
	応用研究・開発	◎	↑	● EU PV Clusterにおいて、Innovative installations(Cluster 5)のもと、さまざまな設置方式に適応した太陽電池開発やコスト低減に向けたシステム関連技術開発が行われているほか、Fraunhofer ISEのTestLabでは、EL、PL等を用いた太陽電池の非破壊検査方法の開発が進んでいる。
中国	基礎研究	—	—	● —
	応用研究・開発	△	→	● 研究活動は見られるが、産業界における技術開発が中心である。
韓国	基礎研究	—	—	● —
	応用研究・開発	△	→	● 研究活動は見られるが、産業界における技術開発が中心である。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 長期エネルギー需給見通し。経済産業省。2015年7月。
- 2) <http://news.panasonic.com/jp/topics/2014/38429.html>
- 3) <http://www.solar-frontier.com/jpn/news/2015/C051170.html>
- 4) <http://www.sei.co.jp/company/press/2016/05/prs034.html>
- 5) Nakamura, Y. Ota, K. Koike, Y. Hidaka, K. Nishioka, M. Sugiyama, K. Fujii, A 24.4% solar to hydrogen energy conversion efficiency by combining concentrator photovoltaic modules and electrochemical cells, Appl. Phys. Express 8 (2015) 107101.
- 6) R. France, Multijunction Solar Cells for High-temperature Operation in Hybrid CPV-CSP Systems, presented at 12th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems,

- Freiburg, Germany, April 25-27, 2016.
- 7) http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
 - 8) J. Du, Z. Du, J.-S. Hu, Z. Pan, Q. Shen, J. Sun, D. Long, H. Dong, L. Sun, X. Zhong, L.-J. Wan, Zn-Cu-In-Se quantum dot solar cells with a certified power conversion efficiency of 11.6%, *J. Am. Chem. Soc.* 138 (2016) 4201.
 - 9) W. Wang , M. T. Winkler , O. Gunawan , T. Gokmen , T. K. Todorov , Y. Zhu , D. B. Mitzi, Device Characteristics of CZTSSe Thin-Film Solar Cells with 12.6% Efficiency, *Adv. Energy Mater.* 4 (2013) 1301465.
 - 10) T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, Efficiency enhancement using a $Zn_{1-x}Ge_xO$ thin film as an n-type window layer in Cu_2O -based heterojunction solar cells, *Appl. Phys. Express* 9 (2016) 052301.
 - 11) M. Umehara, S. Tajima, Y. Aoki, Y. Takeda, T. Motohiro, $Cu_2Sn_{1-x}Ge_xS_3$ solar cells fabricated with a graded bandgap structure, *Appl. Phys. Express* 9 (2016) 072301.
 - 12) T. Minemoto, T. Matsui, H. Takakura ,Y. Hamakawa,T. Negami, Y. Hashimoto, T. Uenoyama, M. Kitagawa, Theoretical analysis of the effect of conduction band offset of window/CIS layers on performance of CIS solar cells using device simulation, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 67 (2001) 83.
 - 13) Y. Kawano, J. Chantana, T. Minemoto, Impact of growth temperature on the properties of SnS film prepared by thermal evaporation and its photovoltaic performance, *Curr. Appl. Phys.* 15 (2015) 897.
 - 14) S.Nakatsuka, N. Yuzawa, S. Akari, T. Minemoto, Y. Nose, Fabrication of solar cells based on $ZnSnP_2$ bulk crystals, presented at 20th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (Halle, Germany, September 5-8).
 - 15) 内山俊祐、石河泰明、浦岡行治、 FeS_2 薄膜太陽電池実現に向けたシミュレーションによる素子構造の探索、175 委員会第 13 回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム、C-27.
 - 16) Nagaoka, K. Yoshino, H. Taniguchi, T. Taniyama, H. Miyake, Preparation of Cu_2ZnSnS_4 single crystals from Sn solutions, *J. Crystal Growth* 341 (2012) 38.
 - 17) S. Nakatsuka, H. Nakamoto, Y. Nose, T. Uda, Y. Shirai, Bulk crystal growth and characterization of $ZnSnP_2$ compound semiconductor by flux method, *phys. status solidi C* 12 (2015) 520.
 - 18) 日経テクノロジーonline. <http://techon.nikkeibp.co.jp/atcl/column/15/286991/041900018/>

3.9 風力発電

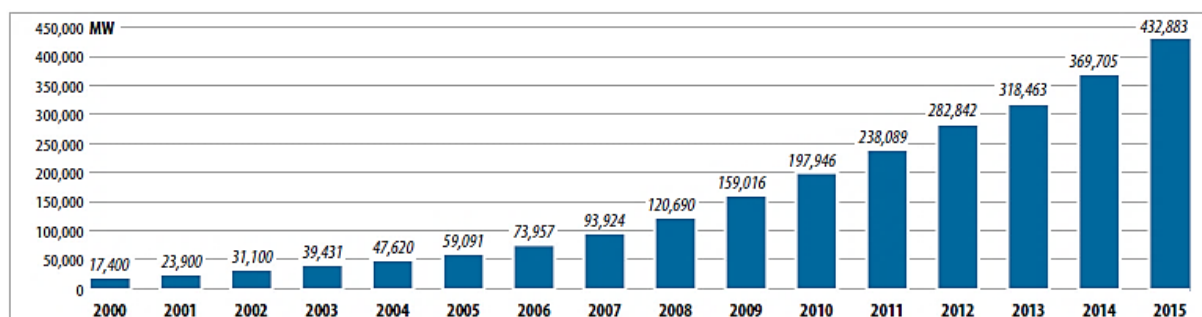
（1）研究開発領域の簡潔な説明

風力発電は、風の運動エネルギーを風車（風力タービン）により回転力に変換し、歯車（増速機）などで増速した後、発電機により電気エネルギーに変換する発電方式である。設置する場所で陸上風力、洋上風力（浮体式、着床式）に分かれる。ここでは、風力発電に係る各要素技術、周辺技術、さらにシステム全体を最適化する基盤技術などを対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

近年の地球温暖化問題の顕在化、さらにはエネルギーセキュリティの確保の観点から、現在世界中でエネルギー政策の見直しが進んでいる。低炭素エネルギーのひとつとして再生可能エネルギーの導入が世界的潮流となる中、世界の風力発電の導入量は 2015 年末で、累計 433GW（1GW＝百万 kW）・約 30 万台、新規 63.0GW・約 3 万台・約 10 兆円/年に達している（図 3-6）¹⁾。日本国内でも風力発電の普及が進みつつあるが、我が国の 2015 年までの累計導入量（括弧書きは 2014 年までの導入量）は 3038(2794)MW で世界の 0.70(0.76)%、19(19)位、新規導入量は 260(130)MW で世界の 0.39(0.25)%、22(25)位に低迷している²⁾。一方、我が国の 2030 年度長期エネルギー需給見通しでは、再生可能エネルギー発電の電源構成比率目標値は 22～24%（水力 8.8～9.2%程度、太陽光 7.0%程度、バイオマス 3.7～4.6%程度、風力 1.7%程度、地熱 1.0～1.1%）となっており³⁾、風力発電の導入も進めていく必要がある。風力発電は産業としてのポテンシャルも大きく、風力発電拡大により、相当の経済・雇用効果が期待できる。例えば、大型風車は精密加工が必要な歯車や軸受、高効率な発電機やパワーエレクトロニクス変換器など、約 1 万点の部品から成る回転機械であり、我が国のものづくり技術を生かせる格好の機械製品であるとともに、その産業の普及や雇用創生に対する効果も大きい。そこで、風力発電の普及拡大には、さらなる高効率化、低コスト化、大型化、洋上化などに向けた研究開発ならびに基盤技術研究などが求められている。



（出典：Global Wind Report 2015. GWEC 2016 年 4 月）

図 3-6 世界の風力発電の累積導入量の推移¹⁾

[動向（歴史）]⁴⁾

地形が平坦で安定した偏西風が吹く欧州では中世から、麦の粉挽き、灌漑、製材など様々な動力源として風車が活用された。風車による発電は 1897 年に英国と米国で独立して誕生

した。1891年にデンマークの Poul la Cour が、風洞実験に基づく高速揚力型を採用し、回転数調整装置を持つ近代設計の風車を実用化して、後の発展の基となった（図 3-7）。1918年には農村の自家発電（独立電源）として改良型の Agrico 風車（定格出力 20～30kW）が 120 ヶ所（合計 3MW）に建設され、当時のデンマーク国内の電力需要の 3%強を供給した。

第二次世界大戦中には、エネルギー不足から風力発電への期待が高まった。1941～1945年の米国の Grandpa's Knob 風車（1250kW）は、交流発電機を用いて送電網に連系した世界初の風車である。ステンレス製 2 枚翼ブレードの取付部の疲労強度が足りず、故障が頻発する結果に終わった。デンマークでは la Cour の弟子の J Juul が 1947 年頃から風車の連系試験を始めた。それを後継した Gedser 風車（200kW）は 1957～1967 年の 10 年に渡って安定して運転された。この他にも 100kW 以上の大型風車の研究開発は、各国で 10 件以上行われたが、デンマークの Gedser 風車と西ドイツの Huetter の 100kW 風車の 2 例以外は全て不成功に終わった。日本では 1938（昭和 13）年に山田基博による国産風車が北海道稚内に設置された。この「山田風車」は木製 2～3 枚翼で出力は 200～300W、簡便・剛健で自家発電に適していた。第二次大戦前に 200 台以上、昭和 30 年代までに 1 万台以上が作られ、農村電化に役立った。しかし結局、初期の発電用風車は、素朴な機械式制御と金属や木製の重くて剛性の弱いブレードという技術的な制約があり、経済的な電源とは言えず、商用電力網が整備されていくと、水力発電や火力発電との競争に敗れて、一旦、風力発電は下火になった。

1973 年と 1978 年の 2 度のオイルショックと、その後の 1980 年代の米国カリフォルニアの風力発電ブームが次の転機になった。この頃には、風車の自動運転を可能とする電気制御技術と、軽くて丈夫な複合材料（GFRP：ガラス繊維強化プラスチック）製ブレードを安価に量産する石油化学技術が実用化されていた。カリフォルニアにおける数千台の風車ブームに便乗した民間風車メーカーの多くは、元々は農家向けに農機具や日用品を製作していたデンマークの零細企業だった。高級な設計解析ではなく、愚直な試行錯誤による改良を積み重ねることで、徐々に淘汰洗練されて、現代に繋がる水平軸プロペラ式 3 枚翼鋼製モノポールタワーという風車形式（ストール式出力制御も加えて「デンマークモデル」と呼称）が確立した。



図 3-7 Poul la Cour の風車

同時期に各国で政府主導の MW 級大型風車開発が行われた（表 3-1）。航空機の知見を転用し、2枚翼をヒンジ構造で軸につないで（ツイータードハブ）、高速回転させる先端的な設計が試みられたが、そのほとんどが運転後短時間で深刻なトラブルに見舞われて失敗に終わった。当時の流体力学の知見とコンピュータの解析能力では天然の風の挙動を十分に把握できず、風車に作用する変動荷重を過小評価して疲労強度が不足したことが失敗の主原因である。またタワーの風下側（ダウンウィンド）でロータを回転させると、タワーの影の低風速の乱流領域（タワーウェイク）をブレードが通過することになり、風車が大きな変動荷重を被ると共に大きな騒音を発生させることも判明した。このため今の大型風車では、タワーの風上側でロータを回すアップウィンド式が主流である。アップウィンド式では風見鶏効果による自動風向追従は期待できないため、風車ナセル上の風向計の指示に従って電動モータで風車の向きを風向に合わせるアクチブヨー制御が標準採用されるようになった。

表 3-1 大型風車の開発例

年	1981年	1981年	1982年	1982年	1984年	1987年	1987年
名称	Mod-2	MTS-3	WTS-75	Growian	WTS-4	Mod-5B	LS-1
定格出力	2.5MW	3MW	2MW	3MW	4MW	3.2MW	3MW
国	米国	スウェーデン	スウェーデン	ドイツ	米国	米国	英国
開発者	DOE& NASA (Boeing)	Hamilton Standard	Hamilton Standard	Huetter	Hamilton Standard	DOE& NASA	エネルギー省 & 北部水力電力省
ロータ径	91m	78m	75m	100m	78m	99m	60m
ハブ高さ (タワー)	61m	80m	77m	100m	80m	61m	45m
ロータ配置	アップウィンド	ダウンウィンド	アップウィンド	ダウンウィンド	ダウンウィンド	アップウィンド	アップウィンド
翼枚数	2枚翼	2枚翼	2枚翼	2枚翼	2枚翼	2枚翼	2枚翼
翼の固定方法	ツイータードハブ	ツイータードハブ	ツイータードハブ	ツイータードハブ	ツイータードハブ	ツイータードハブ	ツイータードハブ
発電機形式	同期	同期	誘導	誘導	同期	同期	同期

近年の風力発電の研究開発のトレンドは大型化である。風力発電の発電量は、受風面積（ロータの面積）と風速の3乗に比例する。地表の凹凸による減速の影響を受けない上空程、風速が速くなり（Wind shear：高度の1/5～1/7乗に比例）、ロータ直径が大きく背の高い大型の風車ほど発電量が大きくなるため、経済性向上のニーズから、1990年代後半から急激に風車の大型化が進んでいる（図 3-8）。

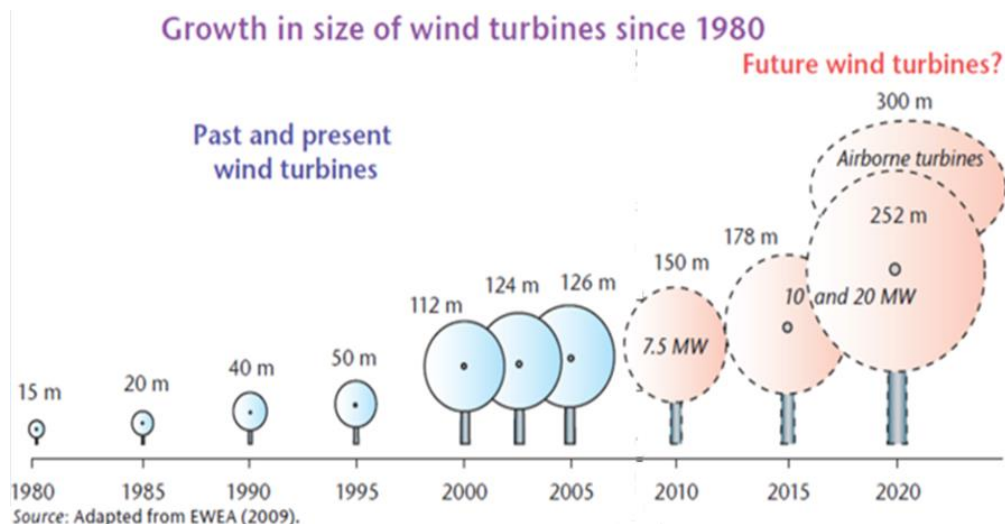


図 3-8 風車の大型化⁵⁾

風車の大型化によって1機当たりの発電出力を増大させるとともに、さらに複数機配置によってウィンドファーム全体の出力を増大させることができる。発電容量を大きくできるメリットがある一方で、大型化や洋上化は、設置の難しさや構造上の耐久性の観点から設置コストや各部の重量、強度について新たな課題も伴う。これらの課題を解決するべく国内外で大型風力発電機開発プロジェクトが実施されている。従来の陸上風力発電機においては、増速器方式の風車が主流であるが、歯車とベアリングで構成される複雑な機構で、重量がかさむことやメンテナンス頻度が多く、更に大きなロータ径を用いる場合にはロータの回転数が低くなり、発電機への回転速度の倍率を大きくする必要が生じることから、増速機を用いないダイレクトドライブ方式の風力発電機や、油圧ポンプを用いて高圧の油圧エネルギーに変換し油圧モータを駆動させ発電させる風力発電機も開発されている¹³⁾。

風車の洋上化については、風速が比較的高い、風の乱れ強度が低い、風速の鉛直方向の差が小さい、風速が安定しているなどのメリットがあり、その導入がヨーロッパを中心に急速に増加しており、2014年末で世界の導入量が1052万kWに達している¹⁴⁾。一方で、洋上風力には陸上風力と比較して、建設が困難かつコストが高い（特に基礎部分）、維持・管理が困難かつ高コスト、塩害の影響を受けやすい、陸上まで長距離の海底送電ケーブルで送電しなければならない等のデメリットもあり、採算性を確保するためには1基当たりの発電量を増加することが必要である。このため、最近では1基当たりの出力が平均で3~4MWと大型になっており、中には最大で8MWの超大型風車も開発されている¹⁵⁾。ウィンドファームの総出力も100MWを超えるものが増えてきており、最大はイギリスのロンドン・アレイ発電所の644.4MW(3.6MW×179基, 2013年稼働)¹⁶⁾である。また、ウィンドファームの大型化とともに陸上からの離岸距離も長くなり、100kmに達するものも現れ、それに伴い設置場所の水深も深くなり、50mに及ぶものも出てきている。これらの問題を解決するため、これまでの交流ケーブルに代わり長距離送電に有利な高圧直流送電方式採用や、メンテナンスコスト削減を目的とした上述のダイレクトドライブ（ギアレス）風車導入が増加している。陸上風力においては、風車へのアクセスが容易なため、ギヤのメンテナンスはあまり問題にならないが、洋上風力においては作業船のレンタル料や故障機器の修理に伴う人件費などに

よって高コストとなる。そのため、ブレードや発電機を改良しながら増速機のギヤ比を最適化することでコストや総重量を抑えたり、また増速機を用いないダイレクトドライブ方式を採用したりする傾向が強まっている。ダイレクトドライブ方式では、増速機を用いずに低速で発電できる多極発電機を用いるため、従来の増速機を用いる方式に比べて生産コストが高いなどの欠点はあるが、増速機のコスト削減、故障リスクの回避やメンテナンスコストの削減に加え、増速機による伝達ロス削減、重量の削減などの利点も有している。更には、深水域への設置を可能とする浮体式洋上風力の開発が我が国を筆頭に進められており、また発電機の軽量化・大容量化を目指した次世代の超電導風力発電機などの開発も進められている。

また、風車のオペレーション&メンテナンス（O&M：Operation and Maintenance）に係るコストは年々増加傾向にあり、その課題が明らかになってきており、O&Mに関する研究開発も国内外で進みつつある。風力発電機は約1万点におよぶ機械部品からなり、安全に運用するためには、適切なメンテナンスが必要である。特に、日本のように複雑な地形が多いサイトにおいては、乱流、台風、雷など気象条件の厳しい環境に起因する故障やトラブルが多く発生し、風車の稼働率の減少、メンテナンスコストの増大などが問題となっている。伝達系、増速機などの大きな部品については、部品調達と交換に係る時間（ダウンタイム）とコストが大きくなり、風力発電事業に対するインパクトが大きくなってしまふ。今後の洋上風力発電を考えた場合には、さらに海況により風車設備へのアクセスが制限されるようになることから、風力発電機器の信頼性向上、メンテナンスの容易性なども重要なキーファクターと予想されている。

電力系統技術開発も重要とされている。風力発電は風によって出力が大きく変動することから、大量に導入された場合、発電出力変動の増大に対応すべき周波数調整能力が不足し、周波数変動が拡大する可能性があり、国内でも各電力会社の調整力の大きさに応じた導入量に制約が発生している。欧州では TWENTIES プロジェクトにおいて、風力発電の大量導入時の系統連系制御に係る技術開発が進められており、系統連系制御に係る技術の利点と効果の検証が進められている。スペインでは、CECRE（再生可能エネルギーコントロールセンター）が設置され、GEMAS と呼ばれる制御・監視システムを用いて、リアルタイムで監視・制御し、風力発電の発電電力を最大限に活用しつつ、各種電力を制御している。スペインでは、これらの集中制御システムとともに、発電量予測を併用している。FP7 においても重点開発項目の一つとして発電量予測技術の高精度化を目指した SAFEWIND プロジェクトが実施されている。国内でも系統安定化を目的にした風力発電量予測高度化、系統安定運用技術開発プロジェクトが進められている。

風力発電の技術的な展望とともに、社会受容性の問題も重要な研究とされている。風力発電による騒音問題、バードストライク問題や景観の問題など風力発電の設置に伴う周辺環境への影響、地域への受容性についても国内外で多く取り上げられている。昨今、風車からの音の発生メカニズムやその予測についての研究開発やバードストライクを回避するための対策技術開発、風車が設置されることによる影響の定量的予測推定技術の開発、ブレードの風切音や増速機の機械音の低騒音化、電波障害への対策（Stealth Blade）、バードストライクへの配慮、等の技術開発もなども進められている。

これらの技術開発と並行して、特に洋上風力の市場では企業間の M&A が急激に進みつつあり、SIEMENS、MHI-Vestas、GE の 3 極に統合される可能性が高い。それに伴い風車に

関する応用技術開発はこれらの動向の影響を受けることが予想される。参考までに、風車メーカーの 2015 年の世界と日本の新規シェアを図 3-9 に示す。従来はデンマークの風車メーカー Vestas が 1 位を維持し、米国の GE がそれを追う展開だったが、2015 年は中国市場好況を受けて中国 Goldwind が初めて世界シェア 1 位を獲得した。なお、2016 年にドイツ Siemens がスペイン Gamesa を合併したため、次の世界シェア 1 位は合併後の Siemens になると予測されている。

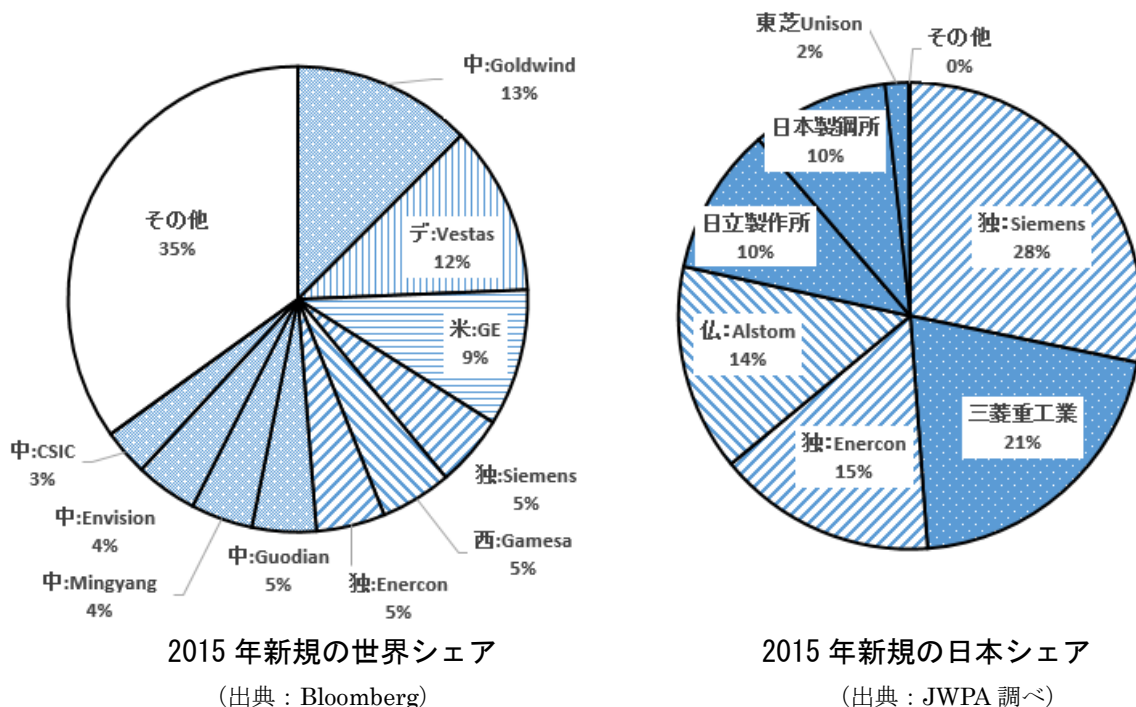


図 3-9 風車メーカーの市場シェア

なお大型風車は、国際標準 IEC61400 シリーズ (JIS C 1400 が対応) に則って開発と量産が行われ、DNV/GL 等の認証機関による風車の型式認証取得がビジネス上の必須要件 (特に融資審査) になっている。同標準では風の強弱に応じて風車をいくつかの種別に分類している (表 3-2)。同標準は約 3~5 年毎に改訂が行われており、次回の第 4 回改訂では、日本の IEC 委員会からの提案により、台風と山岳部の乱流に応じた新種別 (赤文字部分) が追加される予定である。この改訂は、平成 17~19 年度に NEDO によって実施された「日本型風力発電のガイドライン」策定事業の成果に準拠した内容になっている⁶⁾。

表 3-2 IEDC61400-1 の第 4 版における Wind Class⁷⁾

Class	I (高風速)	II (中風速)	III (低風速)	T (台風)	S (特注)
瞬間耐風速 [m/s]	70	59.5	52.5	80	設計者が 規定する (例: 洋上で風況が Class I を越える)
基準風速 Vref [m/s]	50	42.5	37.5	57	
平均風速 Vave [m/s]	10	8.5	7.5	10	
				8.5	
				7.5	
乱れ強度 Iref	A+	0.18 (極めて強い 例: 山岳)			
	A	0.16 (乱れが強い 例: 丘陵)			
	B	0.14 (乱れは中間 例: 平野)			
	C	0.12 (乱れが弱い 例: 洋上)			

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

最近の風力発電は、立地が多様化してきている。寒冷地等の特殊仕様、Class III の低風速地域向け風車、洋上風力発電などの技術動向が挙げられる。

まず海岸沿いの平野部を安定した偏西風が吹き、送電網と輸送のインフラが整っている欧州と、その他の地域とでは、気候や地形が異なるため、風車に求められる技術仕様も変化してきている。(2) の表 3-2 で示した台風対応もその好例である。他では、標高 3000m を越える高標高や、-40°C より低い寒冷地 (CWP: Cold Waether Package) 向けの特殊仕様の風車にもニーズが生じている。日本でも駒井ハルテックが、NEDO の支援を受けて CWP 仕様改良した 300kW 風車 3 台をロシアのカムチャッカ半島に納入している⁸⁾。

2000 年以前は風車の大半は Class I の高風速地域に建てられていたが、風力発電の普及拡大に伴って好風況の適地には風車が建て尽くされていった。新規の風車の立地先は Class II へと移行し、最近では Class III (表 3-2、平均風速 7.5m/s) が主流になってきている。Class III の風車は具体的には、定格出力 (搭載する発電機の容量) はほぼ同じままで、ブレード長を伸ばしてロータ径を拡大し、より広い範囲の風を捉えて発電する華奢なタイプになる。例えば米国では 2006 年から 2015 年の 9 年間で、定格出力は 1.6MW から 2MW に 25% 増加、ロータ径は 77m から 101m へと 31% 増 (受風面積は 72% 増) となっている⁹⁾。また、ドイツではロータ径の拡大に加えて、コンクリート製や鋼製トラス構造の高高度タワーの普及により、ハブ高の延伸によって上空の高速風を捕まえる工夫が採られている。2014 年にドイツに新規設置された風車の平均ハブ高は 116m に達している¹⁰⁾。ドイツに倣って、米国においても鋼管とコンクリートのハイブリッド構造のタワー等を開発して、ハブ高拡大による風力発電の普及拡大を狙った報告書が発行されている¹¹⁾。

陸上の新規立地が難しくなってきた西欧では、浅い水深の海域に風車を立てる洋上風力発電 (着床式、図 3-10) が 1991 年から試行され 2010 年頃から技術開発が本格化 (約 1GW/年) している。2015 年は洋上風力発電の当たり年で、累計は 12.1GW (風力発電全体の 2.8%)、新規は 3.8GW/年 (同 5.4%) にまで成長した²⁾。大水深 (100m 以上) 向けの浮体式洋上風

力発電も、ノルウェー、ポルトガル、日本で技術実証試験が進められている。

このように最近の風力発電技術の研究開発のターゲットは洋上風力に向いており、大型の風力発電システムの開発がキーポイントとなる。洋上風力用等の大型風力発電で主力となる大出力ダイレクトドライブ同期発電機は、低速・大トルク・大型となるため、特に出力 10MW 以上で超電導発電機の導入可能性が検討されている¹⁷⁾。

超電導風力発電機の研究開発状況として、まず米国では、American Superconductor 社（AMSC 社）による 12 MVA の超電導風力発電機、Convertteam 社（後に GE Energy 社に買収）による 8 MW 超電導風力発電機、GE Global Research 社による MRI 超電導技術を活用した低温超電導線材適用の超電導風力発電機、米国 AML 社による全超電導風力発電機等の研究開発が進めてられてきた。欧州でも幾つかのプロジェクトが実施されており、MgB₂ 線材を利用し、高信頼性・軽量・ロバストな 10 MW 級洋上風力発電機の開発を目指す Suprapower プロジェクト、10～20 MW 級の洋上風力発電機の開発を目指す INNWIND プロジェクト、更に 3MW クラスの風車による実証研究を開始した EcoSwing プロジェクト¹⁸⁾ 等である。我が国では 2013～2014 年度の NEDO の風力発電高度実用化研究開発事業「10MW 超級風車の調査研究」において、鉄心を積極的に利用した超電導風力発電機の検討が進められ、高温超電導線材を使用した界磁超電導機で、固定子・回転子共に鉄心を有効に使った構造でいくつかの設計が行われた。以上のように大型超電導風力発電機の研究開発が進められており、超電導発電機として標準的な構造である空隙電機子巻線を有する界磁超電導発電機¹⁹⁾の他、鉄心を積極的に利用した突極形界磁超電導発電機と全超電導発電機が有望な発電機タイプと見られている。

2015 年時点では、陸用風車で定格出力 2～3.3MW、ロータ径 80～130m、最高部高さ 120～170m、洋上風車では定格出力 3.3～8MW、ロータ径 112～164m、最高部高さ 140～190m が主流になっている。商用風車で世界最大のものはデンマークの Vestas 社の V164 風車（定格出力 8MW、ロータ径 164m）である（表 3-3）。



図 3-10 スウェーデンの Lillgrund 洋上風力発電所（2006 年運開、2.3MW 風車 × 48 台）

表 3-3 最近の発電用風車の例

立地	メーカー名・機種名	仕様（定格出力・ロータ径）
陸上用	デンマーク Vestas V112-3.3	3.3MW・φ 112m
	中国 Goldwind 2.5	2.5MW・φ 112m
	米国 GE 2.85	2.85MW・φ 103m
	ドイツ Siemens SWT-3.0-101	3MW・φ 101m
	ドイツ Enercon E115	3MW・φ 115m
	日立製作所 HTW2.1-80A	2.1MW・φ 80m
	日本製鋼所 J100	3MW・φ 100m
駒井ハルテック KWT300	300 kW・φ 33m	
洋上用	デンマーク Vestas V164-8.0	8MW・φ 164m
	ドイツ Siemens SWT-8.0-154	8MW・φ 154m
	米国 GE/Alstom Haliade 150	6MW・φ 150m
	日立製作所 HTW5.0-126	5MW・φ 126m

[注目すべき国内外のプロジェクト]

日本の風車工業の大型軸受技術は世界的に強い競争力を有している。NEDO「風力発電高度実用化研究開発」では、日本の軸受メーカー（NTN、JTEKT、NSK）と東京大学等が参加して、風車の設備利用率向上を目指した軸受の故障予測の遠隔監視システム（CMS）の技術研究開発を進めており、今後の産業競争力向上に繋がると期待されている。但し海外大手風車メーカーに比べて、商用運転中の風車の運転データの過去の蓄積量に大きな差異があるので、これを埋めていく工夫が求められる。さらに、開発した故障予測手法を広く世界に宣伝普及して、国際標準化を図っていく必要がある。

大幅な立地拡大を期待できる将来技術として、浮体式洋上風力発電、更には空中風力発電（AWT：Air borne Wind Turbine）も研究開発が進められている。特に浮体式洋上風力発電では日本が世界をリードしており、2016年3月末時点で世界にて運転中の実証機5台中の3台は日本にある（表3-4）。環境省の長崎県五島列島沖の2MW浮体式洋上風車は、より人口の多い福江島に移設された後、研究終了と共に五島市に移管（O&Mは戸田建設が担当）され、2016年3月から営業運転を開始した。浮体式洋上風車の移設と営業運転は共に世界で初のケースである。経済産業省の福島県檜葉沖のプロジェクトでは、2台目の三菱重工業製7MW風車「ふくしま新風」（浮体式では世界最大）が発電を開始しており、3台目の日立製作所製5MW風車「ふくしま浜風」も7月20日に係留作業を完了して2016年内に発電を開始する予定である。日立製作所が採用しているダウンウィンド式の風車は、風荷重で傾いてもロータ面を垂直に維持できるため、浮体式洋上風力発電との技術的なマッチングは良い。さらにNEDOが北九州市沖でコスト削減を狙った次の浮体式洋上開発を計画している。

こうした日本の動きに対抗して、欧州では、フレームワーク計画（FP）にて国家横断的な技術開発が行われてきた。風車設計に係る基礎研究は、FP1（1984～1988年）から開始されており、将来的な風車設計技術の確立に向けた風車後流（ウエイク）や乱流に関する研究、フィールド試験やシミュレーション技術、風洞試験などの基礎研究開発、発電量予測評価技術、系統連系技術開発、モニタリングシステム開発、浮体式洋上風力研究、大型風車開発のUp Wind、人材育成のWindSkill等、継続的に多様な研究開発プロジェクトが実施されてきており、英国のCarbon TrustやドイツのFraunhofer研究所等が分担して実行している。

例えば Carbon Trust は NASA が宇宙開発用に考案した技術成熟度（TRL：Technology Readiness Level）を援用して、研究結果の早期（5年以内）実用化を図っている。

欧州で洋上風力発電を推進してきた英国では、海洋エネルギー（洋上風力発電、波力・潮流力発電）についての種々の課題に対する応用研究であるカタパルトプロジェクト²⁰を実施中である。ノルウェー、ポルトガルでも浮体式洋上風力発電の実証プロジェクトが計画されている（表3-4）。また、欧州では、欧州風力エネルギー学会（WindEuropa：旧 European Wind Energy Association）において以下のような広範囲で包括的なEUプロジェクト¹⁹が実施されている。ETIPWind（欧州間の風力発電の技術プラットフォーム）、IRPWIND（長期的な研究ポテンシャルを維持するための総合戦略的調査・研究の組織化）、LEANWIND（洋上風力ライフサイクルコストの低減）、WISE Power（風力発電の社会受容性）、Market 4RES（電力市場における効率的な統合）、INNWIND.EU（洋上風力を視野に入れた単機の定格出力10-20MWの大型風力発電機開発：洋上基礎構造、超電導発電機など）。

米国では、DOE Wind Programにおいて、既存陸上風車の低コスト化安定化、系統連系安定化開発のほか、洋上風力発電のための10MW超級風力発電機用ドライブトレイン開発、NRELにおける90m超級ブレード試験設備の導入などを実施している¹²。

表3-4 世界の浮体式洋上風力発電計画

設置場所	運転開始	運営者	風車	浮体
ノルウェー	2009年	Statoil Hydro (Hywind)	Siemens 2.3MW	スパー型
ポルトガル	2011年	Principal Power (WindFloat)	Vestas 2MW	セミサブ型
日本 長崎県	2013年	(環境省) 戸田建設	日立製作所 2MW*	スパー型
日本 福島県	2013年 2016年 (2016年)	経済産業省 丸紅他	日立製作所 2MW* 三菱重工業 7MW 日立製作所 5MW*	セミサブ型 セミサブ型 アドバンスドスパー型
日本 北九州市	(2017年)	NEDO 丸紅他	未公開 2台で計7.4MW	ムーンプール型
英国 スコットランド	(2017年)	Statoil Hydro (Hywind)	6MW風車×5台	スパー型

補注：* ダウンウィンド式の風車

新規概念の風車として、将来を目指すベンチャー企業により空中風車（AWT：Airborne Wind Turbine）が研究開発されている。空中風車は、上空の高速風で効率良く発電可能で、建設工事とタワーが不要な利点がある。Googleが買収したMakani Power社はグライダー式の600kW機を米国で試験中、日本のSoftbankと三菱重工業も出資したAltaeros社は気球式の30kW風車をアラスカで試験中である。浮体式洋上風力発電と空中風車は、技術的実現性は検証されつつあるが、まだコストが高いため、広範囲の商用化にはまだしばらく時間がかかる見込みである。

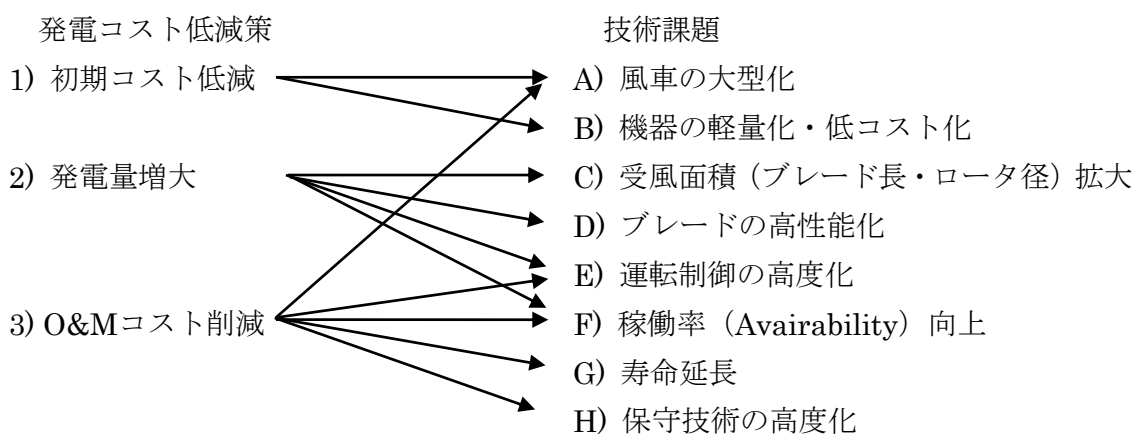
（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

風力発電の重要課題は、導入促進の観点から、発電コスト（LCOE：Levelized Cost of Energy）低減である（表 3-5）。このため、風車機器単体での発電コスト低減の技術開発が必須で、稼働率の向上、発電ロスの低減、翼等の性能の向上、機器の長期信頼性・耐久性確保、メンテナンス費削減などが主な技術課題となっている。また、洋上風車ではこれらに加え、高圧送電を含む送電系統最適化や、洋上での設置コスト低減、メンテナンス性の向上、稼働率向上のための予防保全技術、長期保守に必要な運転情報・機器診断技術、10MW 超級の超大型洋上風車、浮体式洋上風車の標準化と低コスト化などが導入促進の上で重要な課題となっている。

また、風力発電導入の更なる増大を目指す際の大きな課題として、電力系統との連系に伴って発生する問題も挙げられる。陸上、洋上といった設置環境の多様性と厳しい気象環境に対する資源環境リスク評価技術、運用・故障リスク評価技術と信頼性の高い風車設計評価技術の確立もある。

表 3-5 発電コスト低減策とその技術課題



[今後取り組むべき研究テーマ]

短期的には発電コスト低減、系統連系、中長期的には大規模洋上ウィンドファームの開発、洋上風車および周辺設備の最適化と LCOE 低減による導入促進などに関する以下のような研究開発が重要と考える。

- 発電効率向上、大型化を実現するタワー、翼、パワートレインに関するコスト低減、軽量化、高効率化、高信頼性化技術の開発
- 大型部位の長期信頼性、耐久性向上の為の負荷制御および翼構造素材の開発
- 安価な洋上構造物（浮体式、着床式）の開発
- 前方風計測制御などによる荷重低減、運用面をサポートするメンテナンス技術開発（特にメンテナンス作業の機械化）
- 風車以外の建設、維持補修、撤去などの費用を低減できる風力発電設備の開発
- 風力発電の輸送・建設・撤去、リパワリングに関する研究（道路、鉄道、港湾などの国内インフラから生じる制約条件がコストに及ぼす影響を

評価し、結果としての発電単価改善へ必要な具体的施策を明確にする。）

- 風力エネルギー利活用および中小型風力発電機の研究
（小型風車を用いた揚水や熱利用などの目的での風力エネルギー活用に関して、必要となるシチュエーションを掘り下げて研究を進める。）
- 蓄電池や直流連系送電線による制御、発電機出力を平滑化する方法の一つとしての有効電力優先制御などによる系統安定化制御技術の開発
- 資源環境リスク評価技術、運用・故障リスク評価技術と信頼性の高い風車設計評価技術の開発

（５）政策的課題

欧州では、各国に再生可能エネルギーの導入拡大を義務付ける EU 指令の下で、風力発電に対して一貫した育成政策と野心的な長期導入目標が示されてきた。日本でも、NEDO、経済産業省、環境省による風力発電関連の研究開発プロジェクトが実施され、NEDO の日本型風力発電ガイドライン策定事業は国際標準 IEC61400-4 の改訂に、洋上風力発電（着床式）実証研究は継続する民間の洋上開発計画に繋がる成果をあげている。その後も、環境省と経済産業省が浮体式洋上風力発電実証事業等、大型の研究開発プロジェクトを実行している。また NEDO の協力で駒井ハルテックの寒冷地仕様改良も行われている。

一方で、日本の風力発電政策は、導入推進（2012年7月に固定価格買取制度（FIT）導入）と導入遅延（同年10月に10MW以上の風力開発に環境アセスを法制化）が混交の状況であり、系統連系も保証されておらず（欧米は基本的には優先接続）、2015年に発表された政府のエネルギー長期導入見通しにおける風力発電の位置づけも2030年に10GW（今後15年間の新規分は7GW）に留まり、国内市場で風車メーカーが量産（年産100台以上）して競争力を確立できる事業環境にはなっていない。

さらに、現状、風力発電所を計画・導入するためには、風況調査等事前準備に約4年程度、環境アセスメントに約4～5年、FIT認定・系統連系契約・工事に3～4年、長くて13年程度の期間を要する²¹⁾。風力発電の導入拡大を図るためにはこれを可能な限り迅速化する必要がある。この検討も進められているが²²⁾、事業化される先の時点でのFIT価格の事前決定、環境アセスメントの迅速化等も重要であると考えられる。

一方、大型風車を世界に販売するには、認証機関による型式認証取得（実際に風車を建てて発電量・電力品質・騒音・荷重等を計測する）が必須になっているが、日本には欧米のような公的な風力発電の試験サイトが無いいため、国産風車メーカーにとっては大きなハンディキャップになっている。風力発電事業を支えるO&M要員の人材育成も、まだ組織だった仕組みが無く、大学・研究所などの高等教育機関における専門家の育成など、早急な整備が望まれている。

洋上風車に関しては、送電網や蓄電、水素など他分野との連携を見据えた再生エネルギーの電力運用システムの整備、洋上風車の建設やメンテナンスのための港湾基地の整備、欧州に比べて高額な輸送・建設費用の低減、事業者が計画から運用までのリードタイムを短縮できるような省庁間の垣根を越えた関連法規の整備や規制緩和などの取り組みも望まれる。また、関連して国内部品サプライヤを育成することで、地域産業活性化を促し、部品調達時間

とコストの低減を実現することや、更に、大量導入に向けた送電線・港湾・建設船などのインフラ整備、過酷な気象環境に対応するための風車設計技術の開発、O&M 技術知見を活かした輸出産業化を目指すことも政策課題として重要である。

（6）キーワード

風力発電、スマートメンテナンス、洋上風力発電、浮体式洋上風力発電、空中風車、高効率メンテナンス、強強度軽量ブレード、発電出力予測、数値シミュレーション、電力系統、発電単価、ダウンウィンド型風車、アップウィンド型風車、周波数変動、有効電力優先制御、リパワリング、環境アセスメント

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 基礎研究は台風、乱流、雷、浮体分野で成果を上げている。 ● NEDO「風力発電高度実用化研究開発」で大型軸受の故障予測のCMSの開発を支援。 ● NEDO 風力発電高度実用化研究開発事業において、高温超電導線材を使用した界磁超電導機で、固定子・回転子共に鉄心を有効に使った大型超電導風力発電機の研究開発が進められている²³⁾。 ● ライフサイクルコスト低減など、中長期的な基礎研究は今後上昇が必要。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 経済産業省が福島で浮体式洋上風力発電実証研究を実施中。2MW、7MW、5MWの3台の計14MW。浮体式洋上風力の実証実験で他国を先行。 ● NEDOが北九市沖で浮体式洋上風力発電のコスト低減を狙った新プロジェクトも開始。 ● 大型蓄電システム(レドックスフロー電池)²⁴⁾、北本直流連系線²⁵⁾を用いた風力発電系統連系増大に向けた研究が進められている。 ● NEDOが日本の気候風土に合致した風力発電の発電量予測システムの実用化研究を実施中。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● エネルギー省（DOE）が2008年5月に「2030年に米国の電力需要の30%を風力発電で賄う」長期計画を発表。目標達成に必要な研究項目を洗い出して組織的に研究開発を実施。 ● 陸上風車に関して、状態監視に基づく最適運用などの基礎研究は充実。 ● 超電導風力発電機の研究開発状況として、American Superconductor 社による12 MVA超電導風力発電機、Converteam社(後にGE Energy 社に買収)による8 MW 超電導風力発電機、GE Global Research 社による低温超電導線材適用の超電導風力発電機、米国AML 社による全超電導風力発電機等の研究開発等が進められている²³⁾。
	応用研究・開発	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 米国エネルギー省(DOE)が、2014年5月、上記目標を更に発展させた風力発電の長期計画Wind Visionを発表し、2050年時点における風力発電を電力需要の35%にする目標を示すなど、積極的な姿勢が見られる。これと関連して、洋上風力プロジェクトも計画されており、Block島近海でのBlock Island Wind Farm計画、バージニア州沖合での実証研究Virginia Offshore Wind Technology Advancement (VOWTA)計画などが進められている。 ● 2015年5月にはドイツを見習って高高度タワーの普及による風力導入拡大を呼びかけた。 ● 税制優遇制度（PTC）の採否によって導入量が年ごと大幅に変動。GEが欧州メーカー（Alstom、Gamesa）を買収のため、機器の開発では鈍化の可能性。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 大学・公立研究所の連携が進み、EU内の研究組織のネットワークを構築。広範囲なEUファンドの研究プロジェクトが後押し。欧州外への研究開発支援も積極的。 ● 10 MW 級洋上風力発電機の開発を目指すSuprapower プロジェクト、

研究開発領域

				10～20 MW級の洋上風力発電機の開発を目指すINNWIND プロジェクト ²³⁾ 、更に3MWクラスの風車による実証研究を開始したEcoSwingプロジェクト ¹⁸⁾ 等、次世代の大容量超電導風力発電機に関する研究開発を積極的に推進している。
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 2015年時点での洋上風力世界総容量12GWのうち約91%をヨーロッパが占めるなど、積極的に洋上風力の研究開発を進めている。特に、陸上への送電方式として従来の高圧交流送電HVACに代わり長距離大容量送電が可能である高圧直流送電HVDCを採用し、更にはドイツのDolWin2ではそれまで主流であった2レベル変換器に代わって更に高圧大容量送電に適しているモジュラマルチレベル変換器(MMC)を採用するなど、技術革新の速度も速い。 ● 2015年にEnergy Unionを結成し、EU内での施策の統一などを開始。 ● ドイツを中心に、ClassIIIの低風速地域向けのロータ径とハブ高の大きい高性能風車の開発と実用化が進む。 ● Carbon Trust等による洋上風力発電のコスト低減に向けた技術開発・実証研究が活発に行われている。 ● 洋上風力に関して2025までに€80/MWh達成目標。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 2020年までに250GW、2030年までに400GW、2050年までに1,000GWの設備容量を計画。 ● 中国風車メーカーの大半は、欧米系の風車メーカー・設計コンサル会社からの技術供与を受けて風車製造に参入。自主開発は稀。 ● 現状は欧米メーカーの製造基地として機能するが、旺盛な市場動向に合わせて、研究対象は風力エネルギー資源アセス、先進的風力発電機、ウィンドファーム建設・運用に関して欧米大学との連携を強化中である。 ● Goldwindは独風車メーカーVensysを買収して海外進出時の知財権をクリア。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 2011年頃から中国政府は風車メーカーの国際競争力強化に向けて、風の2.5MW以上の大型化とLVRT装備を政策誘導。 ● 新しい技術革新を伴ったプロジェクトなどは見当たらないが、最近では洋上風力に注力し、国内メーカーにより2015年末までに360.5MW(約100基)が新規導入された。 ● 2021-2030年までは陸上と着床型洋上風力、2031年以降は陸上と洋上での本格展開。
韓国	基礎研究	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> ● 不況と原油価格低下で風力発電へのモチベーションが低下。 ● 新規の技術開発という点では特段成果が見当たらない。 ● サプライヤとしての基礎研究は欧米との連携が多い。
	応用研究・開発	△	↘	<ul style="list-style-type: none"> ● 洋上風力に関する新規導入プロジェクトはあるが、経済状況の影響もあり、あまり進展していない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

1) Global Wind Report 2015. GWEC 2016年4月。

<http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2015-annual-market-update/>

World Market Update 1997～2015、BTM Consult,ApS./Navigant Consulting,Inc.

2) 日本機械学会誌. 2015年8月 Vol. 118, No.1161, p.487.

- 3) 長期エネルギー需給見通し. 経済産業省. 2015年7月.
- 4) 風力発電技術の進歩と展開、科学と工業、83(8)、312~320 (2009)
- 5) EWEA2009
- 6) 日本型風力発電ガイドライン策定事業の最終報告書、NEDO、2008年3月発行
http://www.nedo.go.jp/library/furyokuhoukoku_index.html
- 7) IEC61400-1 4th Edition
- 8) カムチャッカで風力発電機とマイクログリッドシステム装置の設置工事を完了、駒井ハルテック、2016年4月15日、<http://www.komaihaltec.co.jp/sp/topics/index160415.html>
- 9) 2015 Wind Technologies Market Report、米国 OE/Lawrence Berkeley 研究所、2016年8月
<https://emp.lbl.gov/publications/2015-wind-technologies-market-report>
- 10) IEA Wind Task 26: The Past and Future Cost of Wind Energy、米国 DOE、2015年6月
http://www.ieawind.org/task_26.html
- 11) Enabling Wind Power Nationwide、米国 DOE、2015年5月
<http://energy.gov/eere/wind/downloads/enabling-wind-power-nationwide>
- 12) Wind Program Newsletter.、DOE
<http://apps1.eere.energy.gov/wind/newsletter/detail.cfm/articleId=32> [10] , SOPCAWIND, OnlineAvailable : <http://www.sopcawind.eu/>. [Accessed: 11-Aug-2014].
- 13) 三菱重工業プレスリリース. <http://www.mhi.co.jp/news/story/1309275427.html>
- 14) NEDO: 着床式洋上風力発電導入ガイドブック(第1版)、2015。
- 15) MHI ヴェスタス : <http://www.mhi.co.jp/news/story/151218-1.html>
- 16) 日本風力発電協会 : 風力発電導入ポテンシャルと中長期導入目標 V4.3、2014
- 17) 大崎博之: 10MW級大容量風力発電を実現する超伝導回転機、応用物理、vol.82、no.7、pp.571-574、2013.
- 18) Offshore Wind.
<http://www.offshorewind.biz/2015/05/08/superconductive-ecoswing-takes-on-full-sized-testing/>
- 19) WindEuropa (EU プロジェクト) ページ <https://windeurope.org/policy/eu-funded-projects/>
- 20) カタパルトプロジェクトホームページ <https://ore.catapult.org.uk/>
- 21) 日本風力発電協会「風力発電の導入拡大実現に向けて」:
[jwpa.jp/pdf/20150728_METI_shinensyoi_13th.pdf](http://www.jwpa.jp/pdf/20150728_METI_shinensyoi_13th.pdf)
- 22) 資源エネルギー庁「FIT制度見直しの検討状況の報告」:
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/kihonseisaku/saisei_kanou/pdf/008_02_00.pdf
- 23) 再生可能エネルギーシステムにおける発電機技術の現状と将来動向、電気学会技術報告第1364号、電気学会、2015.
- 24) 北海道電力 HP:
http://www.hepco.co.jp/energy/recyclable_energy/large_accumulator/index.html
- 25) 北海道電力 HP:
http://www.hepco.co.jp/energy/recyclable_energy/wind_power/demonstration.html

3.10 地熱発電

（1）研究開発領域の簡潔な説明

地熱発電とは、高温の地熱によって生成された水蒸気により蒸気タービン発電機を駆動して電力を発生させるものである。または、地熱が低温の場合は、イソペンタンやアンモニアなどの媒体を用いて、その蒸気により膨張発電機で発電させる。

地熱資源の特性把握技術（地熱の賦存、析出物の制御など）や掘削技術、地熱発電技術として、ドライスチーム、フラッシュサイクル、バイナリーサイクルおよび、高温岩体発電が対象となる。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

地熱発電は、地熱という再生可能エネルギーを活用した発電であるため、運転に際していわゆる温室効果ガスの二酸化炭素の発生が火力発電に比して圧倒的に少なく、燃料の枯渇、高騰などの心配が少ない。また、太陽光発電及び風力発電といった他の主要な再生可能エネルギーを活用した発電と異なり、天候、季節、昼夜によらず安定した発電量を得られる。また、その稼働率は70%と高く、温室効果ガス排出量は石炭火力発電の1/30とされている。資源量も多く、特に日本のような火山国においては大きな潜在力を有すると言われる。このように地球温暖化への対策手法となることやエネルギー安全保障の観点からも各国で利用拡大が図られつつある。

我が国は世界の活火山の約8%を擁する屈指の地熱資源大国でありながら、技術的な課題に加え、規制上の課題、周辺住民や利害関係者からの立地同意獲得の困難さのため、10年以上政策的地熱研究開発を停止していた。地熱は本来、我が国の得意分野であり、世界シェア70%を誇る地熱蒸気タービンや次々に開発中の小型バイナリー発電設備技術、各種センサや地震学の応用による革新的地下探査技術、高温掘削技術など、要素技術は高いレベルにある。今後は豪雪地帯の地熱カスケード利用技術や次世代EGS（Enhanced Geothermal System）発電（地熱増産システム）などを、恒久性の高い地熱利用システム技術に発展させることにより、再び世界をリードする方向に進むことができると考えられる。

[動向（歴史）]

地殻を構成する岩石中に含まれる放射性元素が崩壊する際に発生する熱が地熱である。特に U^{238} 、 Th^{232} が発生する熱エネルギーが大きく、地球内部は6000℃程度になっており、そこから地表面まで約6000kmの伝熱が生じている。このようにして生じた熱エネルギーは地球上の場所や位置によって水を媒体として発電や熱として利用されている。地熱発電の仕組みは基本的に火力発電と同じであるが、ボイラーを使って蒸気を炊きあげる代わりに地下深部の地熱貯留槽から採取される地熱流体を利用する。生産井とよばれる地熱井を通じて得られる流体がスーパーヒートスチームであるか、混相流もしくは液であるかによって発電の仕組みが異なる。一般的に、スーパーヒートスチームが得られる場合には、蒸気をダイレクトに膨張機に送り発電するドライスチーム方式が、混相流の場合は気液分離器を用いたフラッシュサイクル方式が、液の場合にはバイナリーサイクル方式が用いられる。現在、地熱発電

ではフラッシュサイクル方式（シングルフラッシュ）が 50%、バイナリーが 25%、ドライスチームが 10%利用されている。その他、ダブルフラッシュ方式が 10%弱、バックプレッシャー方式が数%、コンバインドサイクル方式が数%利用されている^{1),2),3)}。

世界シェアの多くを担うフラッシュサイクル方式の熱機関は、我が国のメーカーが設備容量ベースで約 80%用いられている。地熱貯留層内の流体に含まれる物質が、スケール成分となり発電性能を低下させる可能性があるが、国内メーカーの技術は他国をリードしている。現在、世界 30 カ国弱でこの発電技術が利用されており、世界の総発電量は 1000 万 kW 超となっている。

地熱発電技術は 1904 年にイタリアのラルデレロではじめて実用化され、第二次世界大戦までは地熱発電はイタリアの独壇場であり、火山性蒸気への対策として、水を媒体としたバイナリー発電機が使用されていたが、戦争により消失した。第二次世界大戦後、アメリカのガイザーズ地熱地域、ニュージーランドのワイラケイ地域などでも開発に着手され、それらの地域はすでに 50 年以上地熱発電を継続させている。日本においても、1925 年に大分県別府市の別府温泉で試験運転が実施され、1966 年に岩手県八幡平市（旧松尾村）の松川地熱発電所が運転を開始した。その後、1974 年のオイルショックを機に、石油の代替エネルギーとしての地熱開発が世界の主要火山国で進められるようになり、資源探査技術、掘削技術、貯留層管理技術、生産技術（発電技術およびスケール対策など）が急速に進展した。特に資源探査技術や掘削技術は、石油・天然ガスで培われてきた技術を高温環境に適用する形で発展してきた⁴⁾。

初期に開発されたガイザーズや松川地域は、蒸気卓越型の地熱資源であり、その蒸気を直接タービンに送り込んだ。その後開発された多くの地域は生産流体が二相流体であるため、セパレーターで気液分離する。液体は地下に戻すが、その際、貯留層の急速な温度低下を招かないため、また持続可能で適切な発電規模を見積もるため、貯留層シミュレーション技術が発達し、それをもとに還元井の位置が決められた。また、この還元を積極的に利用して、高温ではあるが水がない岩体を、水圧破碎によって人工的に貯留層を造成し、熱を抽出する高温岩体発電技術の実証試験がアメリカのロスアラモスで行われ、その後数年以内にフランスとドイツの国境近くのソルツ地域、さらに日本でも山形県肘折地域や秋田県雄勝地域で調査研究が開始された。

また、1980 年代になると新エネルギー産業技術総合開発機構（NEDO）において、地熱開発促進調査が開始され、国内 60 以上の地熱開発可能性の調査が行われた。そのうち、特に有望であった地域には 90 年代に実際に地熱発電所が建設された（柳津西山、八丈島など）。また、地熱資源調査や技術開発が様々な視点で行われ、全国地熱資源総合調査にはじまり、地熱貯留層の構成する断裂系の調査・解析手法を開発する「断裂系貯留層探査法開発」および後継の「貯留層変動探査法開発」、既存の地熱貯留層よりさらに深い深度での地熱開発可能性を岩手県の葛根田地熱地域で調査した「深部地熱資源調査」、国産バイナリー発電機の開発や炭酸カルシウムなどのスケール対策、掘削技術の開発を中心とした「深部地熱資源採取技術」そして、前述の肘折での「高温岩体発電技術」の実証試験が行われた。そして 1990 年代後半になると、国際協力の案件も増加し、インドネシア東部のフローレス島の小規模地熱開発も行うようになった。さらに 1997 年には国際エネルギー協会の地熱実施協定（IEA-GIA）において、いくつかのテーマの国際連携の Annex が開設された。そこで、日本は NEDO が

窓口になりいくつかのタスクに参加したが、特に深部地熱資源調査に関しては、日本はタスクリーダーとなり、そこで地熱資源調査、材料、掘削の調査リーダーとなった。この IEA-GIA のアネックスは少しずつテーマを変えながら現在も継続している。

地熱開発や研究に関する国際的な会議としては、1970 年代後半から、アメリカの GRC やスタンフォード大学での地熱ワークショップ、さらにニュージーランド地熱ワークショップなどが行われてきた。また、オークランド大学や九州大学などでは、国際的な地熱教育のために、発展途上国の学生を受け入れてきた。さらに、国際地熱協会（IGA）が組織化した世界地熱会議（WGC）の第 1 回が 1995 年にイタリアのフィレンツェで開催され、50 ヶ国以上の地熱関係者（技術者、研究者など）があつまり、地熱探査技術や掘削、発電技術など多くの議論がなされた。WGC は 5 年に 1 度開催されることになったが、2000 年には日本で、別府市および盛岡市を主会場として開催され、世界の多くの地熱関係者が参加した。しかしながら、その後 2002 年度をもって「貯留層変動探査法開発」などの国による技術開発は終了した。

日本では現在、約 20 カ所が稼働しており、その総発電量は 50 万 kW 超となっている。また、日本の地熱資源はアメリカ、インドネシアに次いで世界第 3 位の約 2000 万 kW 超となっており、これは原子力発電所 20 基以上に相当する。しかしながら、技術的な課題、法整備もしくは規制緩和、周辺環境、地震誘発の懸念、温泉枯渇の懸念などハード・ソフト的いずれの側面からも若干の問題があり、導入までのタイムスケール、コスト、規制などいくつかの要因によって国内の地熱発電は約 15 年新設稼働が無い状態となっている。

その一方で、新たに温泉井戸を掘削することなく噴出した温泉の熱エネルギーを利用することで発電可能なバイナリー発電技術に注目が集まっている。日本には約 25000 程度の温泉源が存在すると言われており、そのエネルギー賦存量は 500MW 超と推算される。バイナリー発電は 100°C 程度の高温熱源と数十°C の低温熱源により熱機関を作動させることで発電が可能なるため、比較的低温の地熱のみならず産業分野からの廃熱をも有効利用することが可能である^{5),6)}。

一方、国内の地熱開発が停滞している間に、アメリカ、インドネシア、ニュージーランド、アイスランド、ケニア、トルコなどでは着実に地熱発電量を増大させており、世界の合計で見ると、2000 年の 7974MW から 2015 年には 12636MW まで増大している^{1),3)}。この世界の地熱発電に対し、日本はフラッシュ発電タービンや、配管技術等で貢献しており、現在の世界の地熱発電量の 70% を日本の富士電機、三菱日立パワーシステムズ、東芝の 3 社がしめている。さらに坑口装置も世界の 50% ほどのシェアがある^{7),8)}。その一方で、バイナリー発電技術や坑内探査技術、掘削技術などはアメリカなど海外が強い状況である。探査技術についても国内の地熱での活躍の場がなくなってからは、海外の地熱や資源探査、また CCS などに活躍の場を求めていた。

そして、2008 年頃から、地熱開発に対して復活の動きが見え始めた。その背景は、地球温暖化対策としての CO₂ 排出削減に地熱が貢献できるというものであった。まず、2000 年までの地熱開発促進調査で有望地域とされていた秋田県湯沢市の山葵沢地域での発電所建設が合意に達し 2019 年頃の運転開始を目指すことになった。そして、環境省も地熱プロジェクトを立ちあげることになり、「温泉共生型地熱貯留層管理システム実証研究」、「温泉発電システムの開発と実証」、「高傾斜泥水制御技術の開発」といった温泉や公園の問題の解決に向け

たプロジェクトが開始された。そして、2011年3月の原発事故以後、エネルギー政策が大幅に見直され、地熱の技術開発・調査が本格的に行われるようになった。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

2012年に地熱開発事業、特に探査技術等が石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC）に移管されて以後、JOGMECにおいては、国内初適用の空中物理探査手法を導入し、従来の方法より精度の高い重力探査と探査深度の深い電磁探査を行っている。その中で、空中重力偏差法探査では、地下の岩石密度分布を測定し、広域的な地質構造の把握を行っている。時間領域空中電磁探査では、地下500m程度までの岩石の電気抵抗の分布を測定し、高温の熱水や蒸気が存在する地熱貯留層上部の帽岩の把握を行っている。この手法は、地熱開発だけでなく、防災対策（地すべり地帯の把握）にも活用可能である。さらに、空中磁気探査では岩石の磁気的な性質を測定し、地熱や熱水と関係のある火山岩（地熱変質帯）の分布の把握を行っている。この手法では、ヘリコプターで高度150mを飛行し、測線間隔も250mで、これまで不可能であった国立公園内部の物理探査も可能としている⁹⁾。

また、地熱発電所で必要な量の蒸気や熱水を採取できず、発電出力が変動しているケースが見られることから、JOGMECの地熱貯留層評価・管理技術では、実証実験および数値シミュレーションを通じて、地下における蒸気・熱水の流れの評価精度をさらに向上させ、地熱貯留層の状況や経時変化を詳細に把握しながら、地熱貯留層へ人工的に涵養を行うことで、蒸気・熱水の採取量の最適化・安定化を図るプロジェクトを、福島県の柳津西山地熱発電所にて実施している。この涵養手法は、1990年代にアメリカのガイザーズで行われた手法である。

さらに、地熱開発における坑井掘削コスト削減のため、従来の掘削ビットより耐久性・掘削能率に優れた地熱用PDCビットの開発に取り組んでいる⁹⁾。

一方、NEDOでは、2002年度以後地熱事業を縮小させ、探査技術等をJOGMECに移管させたが、2013年度から新規に、新エネルギー部において「地熱発電技術研究開発」が開始された。このプロジェクトでは、ポテンシャルの高い地域への地熱発電の導入拡大を目的とし、既存の発電設備よりも、小型かつ高効率の地熱発電システムの機器開発及び低温域の地熱資源を活用したバイナリー発電システムを開発するとともに、環境保全対策や環境アセスメント円滑化等に資する取組を行う。具体的には、環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発、低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発、発電所の環境保全対策等技術開発、その他の新技術開発を行っている。これまでに20以上のプロジェクトが提案され、その多くは温泉バイナリーの機器開発やスケール対策技術である。スケール対策技術としては、薬品使用だけでなく、配管材料の改質や、磁気や高周波など物理的な手法を用いてのスケール付着抑制や回収技術が開発されている。そして、発電所の環境保全対策等技術開発では、硫化水素拡散予測シミュレーションモデルの研究開発、温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の研究開発、エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発など環境や景観、温泉に配慮した技術開発が行われている¹⁰⁾。

その中で、超臨界温度領域の利用可能性調査が1つの課題となっており、アイスランドで実施されたIDDPプロジェクトや国内で実施された葛根田深部地熱プロジェクトにおける超臨界涼気での開発課題の整理が行われている。

また、近年、コンバインドサイクルの開発に注目が集まっている。ここでの、コンバインドサイクルとは熱のカスケード利用を指しており、フラッシュサイクル方式の地熱発電とバイナリーサイクル方式の地熱発電を組み合わせた技術である。地熱発電では一般的に熱機関が利用されるので、高温の熱源を冷却し、その温度差を発電の推進力とする必要がある。コンバインドサイクルは、温度差を作るために冷却される熱を最大限利活用する次世代の地熱発電技術であり、現在、多くの研究開発がなされている。2016年5月には、東芝がトルコの地熱発電所にてオーマット社と共同でコンバインドサイクルを建設することが報告されている（東芝が7万kWクラスのフラッシュサイクル方式地熱発電を、オーマットが2万kWクラスのバイナリーサイクル方式地熱発電をそれぞれ開発予定）。また、両社は高効率なコンバインドサイクル方式地熱発電システムを提案し、地熱資源の特性に応じて最適な設備の提案を通じて他社との差別化を図ると発表している。

この他、地熱資源の一つである温泉の熱を利用した発電技術開発が積極的に行われている。温泉の源泉温度範囲は広いため一概には言えないが、80-100℃程度の源泉温度がえられるならば、新たに掘削することなく発電を行えることが最大の利点である。しかしながら、浴用利用のために、下限温度は60℃程度となり温度差を得にくく、そのため一般的なランキンサイクルに比して発電変換効率が上がり難いという問題も有している（3-5%程度のカルノー効率しか得られない）。このような問題を解決するために、様々な温度範囲を対象として膨張機、熱媒、システムの開発がなされている。膨張機は一般的に容積式が用いられており、低温・低流量を対象とするスクロールから高温・大流量を対象とするスクリュまで検討されている（アネスト岩田、IHI、神戸製鋼など）。また、熱媒についても代替フロンや炭化水素、混合熱媒（ex.アンモニア/水）などが検討されている。

[注目すべきプロジェクト]

JOGMECやNEDOが積極的にプロジェクトを推進している。技術動向で紹介した空中物理探査手法、地熱貯留層評価・管理技術、PDCビット開発、環境保全対策技術（硫化水素拡散予測など）および高傾斜掘削をふくむ掘削技術の開発は、いずれも地熱資源のより詳細な把握、地熱資源の維持管理、環境への配慮のために重要なテーマである。従来の地熱開発において課題となっていた地熱資源の不確実性や、公園・温泉等への配慮を克服することにより、すでにJOGMECが開発支援をしている有望地域の開発促進に結びつくものである。

NEDOは発電側のシステム設計も対象とする「地熱発電技術研究開発」を2013年から推進中である。なかでも、上述した東芝が実施する「地熱複合サイクル発電システムの開発」は今後の発電方式の主力となっていく可能性がある。また、数キロワットクラスの発電を対象とするアネスト岩田の「無給油型スクロール膨張機を用いた高効率小型バイナリー発電システムの実用化」はオイルフリーで熱媒を循環するプロセスを開発するものであり、徹底的な熱利用を想定しており興味深い。この他、幾つかの企業や研究機関および大学等が実施しているスケール対策プロジェクトは本技術のキーとなる。最後に紹介したプロジェクトは横河電機が実施している「温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の

研究開発」である。熱資源の湧出量などを遠隔でモニタリング可能な安価な設備開発に資するものである。また、NEDOの技術戦略研究センターでは、特に長期的な導入量の飛躍的な増大には、非従来型地熱発電（EGS）技術の適用がブレイクスルーとなりうることから、EGS技術の世界各地の導入状況、タイプ分け、そして従来型を含めた開発への課題をまとめ公表した¹¹⁾。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

また、有望地域は山岳地域であり、掘削のための用地確保が難しいこと、貯留層がより高温で、流体が酸性になりうることから、傾斜掘削を含む掘削技術の向上、そしてドリルビットの改良など、掘削コストの低減に直結する技術開発が必要となってくる。さらに、高温の酸性流体を想定した配管などの腐食対策、リスク評価も重要になる。温泉への配慮については、温泉貯留層と地熱貯留層の関連を考察し、温泉への影響がない地熱開発の手法の開発が必要となってくる。

一方、EGSにおいては、水圧破碎の確実性、特に坑井間の連結を可能にすることが望まれる。これまでのEGSでは、注水した水が半分程度しか回収できないため、周辺河川などからの補給が必要であったり、坑井間の距離が短いために貯留層が急冷却を起こしたり、さらに水圧破碎時などの誘発地震、さらに注水による内部消費電力やコストの問題などが生じている。このような課題に対応する必要がある。

[今後取組むべき研究テーマ]

1. より高温（超臨界領域を想定）の地熱資源開発のために、高温で使用可能な坑内検層機器および高温での掘削技術の開発。またそれに伴う配管等の地熱材料の評価技術の開発。
2. 地熱井掘削の成功率を向上させ、地熱発電開発コストを低減するための高精度の革新的地下イメージング技術・地熱探査技術の開発。
3. 高度に持続的な地熱発電を可能にするための地熱貯留層シミュレーション技術・地熱貯留層モニタリング技術の開発。我が国では温泉との立地の競合という課題があり、細心のモニタリング技術が必要とされている。
4. EGSの運用に関して、水圧破碎、循環システムの最適化を検証し、誘発地震などの環境リスクを最小にするための実証試験
5. 熱電変換効率の高い熱機関システムの開発。例えば、高効率コンバインドサイクル開発（シングルフラッシュ・バイナリーサイクルコンバインドプロセス、バイナリー・バイナリーコンバインドサイクルプロセス、バイナリー・ヒートポンプコンバインドサイクルプロセスなど）。
6. 作動流体（熱媒もしくは冷媒）の開発。50度程度から発電可能な熱媒やピンチポイントを作らない熱媒の開発が発電コストを向上させるために求められている。
7. スケール付着がない熱交換器開発。固体壁を伝熱面とする熱交換器構造ではスケール付着を避けることは困難であるため、例えば、気液界面を伝熱面とする新しい熱交換器構造の開発などが必要である。

8. 熱カスケードを高効率化するか断熱材開発。ヒートロスがなく熱電変換効率を向上させることが可能な安価な材料開発が必要である。
9. 地熱発電機器の性能を予測するシミュレーション技術開発。
10. 地熱開発の社会受容制を確認し、開発への理解を促進させるための技術開発（環境・温泉モニタリングの高精度化）

（5）政策的課題

国立公園問題、温泉問題、発電コスト問題という日本が抱える3つの問題が地熱発電普及の障害となっている。現時点で可能な大規模のフラッシュ型地熱発電を開発する場合、有望地域が国立公園内あるいはその近傍である場合が多く、貯留層の状況が不明であることが多い。JOGMECの空中物理探査で公園内を含む地下の状況は判明しつつあるが、今後はより詳細な解析が求められ、公園に影響を及ぼさない地上調査法により、貯留層の的確な把握、それに基づいた適正規模な発電が求められる。一方、世界的に議論されている生態保護地域と、日本の公園の区分には差異があり、またケニアなど公園内での開発を積極的に推進している国もある。したがって、公園内の生態系に配慮した調査・開発をするのはもちろんであるが、公園の規制の全面的な見直しも必要かと思われる。

日本における地熱発電の開発リードタイムは、10年以上掛かっており、その結果、開発コストが世界標準の2倍となっている。そのため、一元的な許認可制度を導入し、開発リードタイムを抜本的に短縮する必要がある。特に環境アセスメントの短縮化は重要であり、早期の短縮の実現および環境アセスメントが必要な閾値を引き上げることを検討する必要がある。

発電コストについては、他の再生可能エネルギーに比して国主導での導入促進が少なく、技術開発が低迷している。例えば、数十キロワットクラスのバイナリー発電設備を考えると、設備は蒸発側と冷却側の熱交換器、膨張機、ポンプ、配管から構成されており、比較的シンプルな設備となっている。しかしながら、構成機器あたりの単価が高く、さらに熱源（温度や流量）が一定でないため、基本的に一点ものの生産が要求されるために、ペイバック期間が長く、発電コストが高くなってしまいう問題を有している。今後、この技術開発のための企業や産学との連携を通じたオープンイノベーションが強く求められるであろう。

例えば、温泉発電を対象としたバイナリー発電技術開発が加速している中、我が国においても温泉発電は小規模な発電であることから、電気事業法に基づくボイラー・タービン技術者の専任について議論がなされている。概ね良好に規制が緩和され技術導入の障壁が排除されつつあるが、温泉熱も広範囲であり、小規模から大規模まで様々であることから、今後さらなる議論が必要になるものと思われる。また、熱媒についても同様に発電コスト低減に繋がる物質の導入も積極的に認めてもらえるべく議論を継続して欲しい。

また、現在でも地域によっては温泉地が地熱開発に懸念を示すことなどから、有望地域であっても地元との調整が進まない地域が多い。その一方ですでに掘削された浴用のための温泉熱を用いた発電は短時間で実装が可能となっている。地熱資源は数少ない安定した国産資源であることから、地元との合意が段階的であっても進んでいくような体制作り、あるいは小規模な発電から環境影響を見ながらの段階的な開発が可能になるような施策が必要となってくる。その場合、開発費用が最初から大規模な発電所を作るのに比べコストがかかること

が想定されるので、その対応が可能な施策、場合によってはドイツが導入しているような、開発に伴う保険制度の導入も検討する必要がある。

そして、地熱開発の成果が発電に結びつくには、10年単位の長期的な時間が必要であるので、その間、継続的な地熱研究・開発予算と、固定買取価格制度の継続的な運用を望みたい。同時に、2000年代のいわゆる「空白の10年」のために、地熱研究・開発の若手の育成が急務であり、また地熱に関する教育機関の充実が必要である。

（6）キーワード

地熱発電、空中物理探査手法、低コスト掘削技術、貯留層評価・管理技術、環境モニタリング技術、バイナリー発電技術、EGS 発電、スケール対策、誘発地震、発電コスト、熱機関、コンバインドサイクル（複合サイクル）熱利用

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●産総研では、再生可能エネルギー研究センター(FREA)を中心に地熱探査技術や温泉モニタリング技術、掘削技術開発に取り組んでいる。 ●NEDOでは将来のEGS開発に向けて技術戦略研究センターがEGS技術の世界各地の導入状況、タイプ分け、従来型を含めた開発への課題をまとめた報告書を作成するとともに、将来技術の研究に着手している。 ●バイナリーを含めた熱機関の熱媒開発やシステム開発が科学研究費補助金などをベースとして大学や国立研究所などで実施されている。 ●九州大学などが総合的な地熱研究を行い、多くの学生が国内外で学会発表を行うようになってきている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●2013年度より、NEDOやJOGMECが政策的な地熱研究開発を実施している。NEDOではスケール対策技術やバイナリー発電の他に景観設計や硫化水素モニタリング、温泉モニタリングなど環境に配慮した研究を実施している。JOGMECでは空中磁気探査をメインに人工涵養技術、掘削技術の開発を行っている。 ●2013～2015年に温泉バイナリーを中心に小規模発電所の建設が19カ所、計10MWとなり、国立公園内の土湯の例などがある。大規模発電所は、2019年運転開始予定の山葵沢地熱発電所の建設のみで、その他の地点は地元との合意形成、詳細な調査などを要する状況である。 ●熱機関や発電システムの開発はNEDO・地熱発電技術研究開発を中心として様々な形での産学官連携体制にて実施されている。 ●JST CRDSの中低温熱利用の高度化に関する技術調査報告書(CRDS-FY2013-RR-02)に、バイナリー発電技術開発や利用用途などについて詳細にまとめられている。 ●JST LSCのイノベーション政策立案のための提案書（技術開発編地熱発電（Vol.1）－発電量拡大に向けた設計・評価－）にて、現場技術と今後の展望が述べられている。
米国	基礎研究	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ●エネルギー省（DOE）を中心に資源からプロセスまで幅広い研究を展開（2015 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report (February 2015)） ●「PlayFairway」として、資源開発の技術的な可能性、社会受容性を含めた総合的な従来型地熱開発可能性の再評価を国内の多数の大学で実施し、GRCなど地熱の国際会議で成果公表をするとともに、DOEも解析のための手法を地熱研究者とともに検討を行っている。 ●EGSに関してFORGEプロジェクトとして主要大学で基礎研究を実施。

	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● オーマット・テクノロジーズ社が大型のバイナリー発電設備開発を展開し、コンバインドサイクル等の実用化開発がなされている。 ● DOEがSALT（低温地熱からの資源回収の応用的な研究）を進行中である。DOEはバイナリー発電設備メーカーのバイナリー発電技術、ローレンスバークレー国立研究所などでの地熱探査技術、スタンフォード大学やユタ大学などでのトレーサー技術開発、そしてPlayFairwayでの地熱開発可能性総合解析など、研究開発を系統的に進めている。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● トルコを中心に、プロセス的な開発（トリプルフラッシュ）が行われており、熱のカスケード利用に関する研究がなされている。 ● 2015年の世界地熱会議(WGC)では、ドイツが発表件数第2位であり、その内容も掘削、探査技術、スケール対策など基礎的な案件が多い。 ● アイスランド深部掘削プロジェクト (IDDP) のための基礎研究も盛んに行われている。 ● イタリアでは、膨張機（大型タービンタイプなど）の開発が展開されており、独自のタービン技術、探査技術等の研究が行われている。 ● フランス、スイス、オランダ、ハンガリーなどもWGCなどの国際会議での基礎研究成果公表が多くなっている。 ● ヨーロッパ全体の地熱資源分布についても調査が行われている。 ● ドイツ、フランス、スイスなどでEGSの研究開発が実施されている。
	応用研究・開発	◎	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● EGSに関する研究がなされている。 ● ドイツでは、カリナサイクルが2カ所で稼働している。 ● アイスランドでは2010年からの5年間で90MW発電を増加させ、国内の発電の30%以上を地熱でまかなっている。 ● イタリアでも設備容量を70MW増加させている。 ● トルコは、2010年からの設備容量増加は315MWで、ケニア、ニュージーランド、アメリカと同等の伸びを示している。コンバインドサイクルの実用化開発とトリプルフラッシュ発電の導入などより精力的な開発を行っている。
中国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● EGS調査に関する基礎研究がなされている。 ● 中国科学院などが、チベット南部や雲南省などの地熱ポテンシャル評価をしている。WGCでも発表件数第4位である。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 第十二次5カ年計画 科学技術発展計画にて大型地熱の開発および普及に関するビジョンが示されている。 ● チベット南部の八羊井(Yangbajing)地熱発電所で蒸気フラッシュ発電が行われるなど、バイナリーを含めて約28MWの地熱発電所が稼働中。 ● 暖房や地中熱利用などの直接利用に力を入れており、設備容量は世界一である。
韓国	基礎研究	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 資源エネルギー探査開発会社のネクスジオ、韓国地質資源研究院、ソウル大学などで構成されたコンソーシアムが地熱発電技術の実用化に向けた開発を展開。 ● KIGAM（韓国地質鉱物資源研究院）や各大学が、積極的に地熱探査技術やバイナリー発電技術の研究をしている。特にKIGAMは国内数百以上の地温勾配や熱流量のデータから地熱データベースおよび国内の地熱分布をとりまとめて、地下6.5kmまでのポテンシャルを求めている。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● チェジュ島にて地熱発電所開発がされている。 ● NEXGEO社がKIGAMや大学と浦項(Pohang)でEGS発電の開発研究を行っており、深度4kmを超える掘削が行われている。またバイナリー発電の可能性調査も行われている。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 江原幸雄「地熱エネルギー」オーム社 (2014)
- 2) 森康夫、陶山淳治「地熱エネルギー読本」オーム社 (1980)
- 3) Ehara S.; “Susitainable Development of Geothermal Energy” Journal of the Japan Institute of Energy 87 pp.792-800 (2008)
- 4) 柳澤教雄「地熱発電の現状」日本エネルギー学会誌 vol.93、pp.1140-1147 (2014)
- 5) 「普及版環境と省エネルギーのためのエネルギー新技術体系」NTS (1996)
- 6) 「未利用工場排熱の有効活用技術と実用展開」サイエンス&テクノロジー株式会社 (2014)
- 7) Bertani, R. Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. Proceedings World Geothermal Congress 2015.2015 PaperNo.01001
- 8) 柳澤教雄「WGC2015 (世界地熱会議 2015 年大会) に参加して」地熱技術 Vol.40 No.3&4. pp.3-15(2015)
- 9) JOGMEC「平成 27 年度地熱部事業性報告会資料」 pp.140 (2016)
- 10) 吉田明生「NEDO における地熱技術開発の取り組み」地熱技術 Vol.40, No.1&2, pp.13-19 (2015)
- 11) NEDO「地熱発電分野の技術策定に向けて」NEDO 技術戦略研究センターレポート TSCForsight、Vol.12 p.27 (2016)

3.1.1 バイオマス

（1）研究開発領域の簡潔な説明

バイオマスは、原理的に再生可能である生物由来資源（bio-resources）を一定以上の規模（量、mass）で利用することを表す概念で、生物由来の有機性資源で化石資源を除いたものである。ここでは、バイオマスを燃料や電力等の二次エネルギーに利用する技術とシステム技術、バイオマスを育成するプロセス技術、バイオマスから複数形態のエネルギーや他製品を生産するシステム技術（バイオリファイナー）などの研究開発を対象とする。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

バイオマスをエネルギー利用する意義は、(1) 非再生可能資源である化石資源（石油、石炭、天然ガス、重質油等）の代替による同資源の消費削減と同資源に由来するCO₂排出の削減、(2) エネルギーの国際価格変動の影響を受けにくい「国産の再生可能資源」の利用、(3) エネルギー利用に伴う地域産業と雇用の創出、(4) バイオマスが廃棄物である場合の適切な処理、である¹⁾。

上記(1)(2)の観点から国内のバイオマス利用をみると、国産資源としてのバイオマスのエネルギーポテンシャルは、510 PJ/年（1 PJ = 1015 J）とされている²⁾。その多くは、廃棄物系（製材・建築廃材等）、紙パルプ系（古紙、スラッジ）、林業系（林地残材、未利用材）等の木質系バイオマスであり、農業系廃棄物、食品残渣等、家畜糞尿、下水汚泥がこれに続く。国内の木質消費は、用材、紙パルプ製品としての利用が主であるが、これらの約70%は輸入材であり、国産材は約30%にすぎない。非可食性バイオマスからの化成品製造のための技術開発がNEDO主導により実施されている³⁾。その一環として、バイオマスをベースとする地域化学産業の創出可能性に関する調査⁴⁾が行われた。同調査では、国内森林（主として人工林；約1,000万ha）の樹齢分布の適正化が検討され、適正化により達成できる木材生産量は最大で2,500～3,000万m³/年（絶乾重量：1,500～1,800万トン/年、エネルギー：270～320 PJ）と推定された。仮に、この生産量（＝最大ポテンシャル）の「全て」を燃焼して電力を得た（発電効率30%）とすると、年間発電電力量は、現在のわが国における電力需給量（9,250億kWh/年）のわずか2.3%程度である。具体的な試算例はないが、これに農業系等バイオマスのポテンシャルを加えたとしても上記のシェアは3%程度に留まると推定される。生産可能なバイオマスの全量をエネルギー利用するというのは、非現実的だが、上記の試算は、今後のわが国におけるバイオマスの利活用の位置づけ（つまり、何のためにバイオマスを利活用するか）再検討、再定義の必要性を示唆する。

上述のように、国内に限って言えばバイオマスエネルギー利用のインパクトは小さい。しかしながら、このことは必ずしも(1)(2)の観点に立ってエネルギー利用を否定するものではない。(3)(4)の観点に立てば、合理性も認識できる。最近、設備容量が増大している未利用材を燃料とする発電、下水汚泥をはじめとする廃棄物・石炭混焼による発電等は、地域産業創出、林業活性化、廃棄物処理、バイオマスをより低コストで利用可能とするためのインフラ・ロジスティクス形成の手段として意義がある。ただし、その場合であっても経済性は事業・産業成立の必要条件であり、後述するアドバンスド利用に関しては十分な検討がなされること

が望ましい。加えて、エネルギー利用、非エネルギー利用、あるいはこれらの統合形をいずれも対象とするバイオマスベース産業創出の検討と技術・政策課題の設定が有効である。

[動向 (歴史)]

①バイオマス燃焼発電

現在、わが国の総一次エネルギー供給に占める再生可能エネルギー・新エネルギーの割合は4.4%であり、このうちバイオマス利用によるものは2.4%である。バイオマス利用の多くは、紙パルプ産業における黒液やバイオマス由来廃棄物の燃焼によるもので、発電を目的とする木質等のバイオマス燃焼は、近年設備容量が増大しており、とくに、2015年度に改定された固定価格買取制度 (FIT) がこれを後押ししている。ただし、バイオマス発電のバイオマスのエネルギー利用全体に占める割合は小さい。

燃焼発電技術は、石炭火力発電の技術として開発、実用化され、石炭—バイオマス混焼という形で2000年代くらいに普及した。木質バイオマス専焼発電は、2000年代から実用化され、現在普及が進んでいる。各国の電力生産に占めるバイオマス利用発電が占める割合は以下の通りである⁵⁾。日本:3.0% (黒液燃焼を含む)、米国1.6%、カナダ:<1%、ドイツ:5.9%、オランダ3.7%、デンマーク:9.8%、フィンランド:16%、イギリス:4.8%、中国:<1%、韓国<0.5% (ただし、黒液などの廃棄物の燃焼も含まれる)。

バイオマス燃料発電については、日本では、FITが開始され、小規模のバイオマス専焼発電の計画、導入が進んでいる。これらには、循環流動層ボイラやストーカ炉が使用されており、50 MWの糸魚川バイオマス発電所に最大約270 MWのバイオマス発電所があり³⁷⁾、さらに、約310 MWの計画が進んでいる³⁸⁾。大規模石炭火力でのバイオマス混焼は、発電事業者がメーカーと一緒に混焼の研究、実証試験を行ってきているが、経済性の観点から約5cal%程度の混焼にとどまっている。一方、2001年～2003年に石炭・バイオマス混焼技術として5～10cal%混焼技術の開発、バイオマスエネルギー技術開発戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業 (実用化技術開発) として、2010年～2013年「バイオマス専用粉砕方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発」として、25cal%混焼技術の開発³⁹⁾、2011年～2012年「石炭火力微粉炭ボイラに混焼可能な新規バイオマス固形燃料の研究開発」として半炭化の研究が行われている⁴⁰⁾。

バイオマス専焼発電の経済性は、受入燃料の価格と規模 (蒸気タービン発電効率) に強く依存する。最近の検討⁴⁾によれば、FIT利用によって経済性が成立する規模の下限はおおよそ5 MWe (固定電力価格 (税抜き) 32 円/kWh、燃料価格=20 円/kg-dry の場合) である。言い換えると、FITを利用しなければ、専焼による発電は大規模でも成立せず、熱を有価で外販したとしても結果は変わらない。バイオマス専焼の導入状況については、資源エネルギー庁による文献6を参照されたい。わが国では、2015年度にNEDO事業 (バイオマスエネルギー導入に係る技術指針・導入要件の策定に関する検討) が実施され、発電および熱利用を対象とする木質バイオマス利用が地域産業として技術的・経済的に成立する条件等が調査検討され、地域導入の指針が作成されている⁷⁾。

石炭を燃料とする大規模発電の効率は42%程度であり、規模に限界のあるバイオマス専焼発電より高い。それ故に、石炭にバイオマス配合して利用する混焼が注目されている。国内

で稼働中および混焼開始を予定している石炭火力設備は17ヶ所（発電設備容量の総計；878万kWe）であり、混焼率は1～3%（実績）から30～50%（目標値）に至るものまで広範囲にわたる⁷⁾。混焼の経済的課題は、バイオマス発生・集積地から大型火力発電サイトへの輸送コストにかかるものである。すなわち、輸送距離（加えて、集積量や木質粉砕等の前処理の要求）によって混焼、集積地における専焼の経済的優位性が逆転することがある⁸⁾。

専焼、混焼を併せ、バイオマス燃焼・発電技術に関する最新の国際動向は、例えば文献8-9に詳しい。EU諸国の多くでは、バイオマスの専焼、混焼のいずれも商用発電に導入済みである。混焼の場合、バイオマス配合率（熱量基準）は5～8%の場合が多いが、バイオマスの事前微粉砕が適切になされれば、既設石炭火力設備に適用可能な最大配合率は50%程度と考えられている。燃料は多岐にわたり、木質（チップ、オガ粉、ペレット）、下水汚泥（乾燥）、各種搾油残渣（パーム、オリーブ等）、穀物残渣（わら等、ペレットを含む）に関して多くの実績と経験が蓄積されている。バイオマスの粉砕は最近の技術トピックスのひとつである。石炭用の粉砕ミルにおいて石炭とバイオマスを共粉砕する場合、後者の配合率に上限があり、バイオマス配合による動力の増大が大きい。これに対して、ハンマータイプのミルはバイオマス専焼、混焼のいずれにも適用できる。したがって、混焼発電プラントを新設する場合はハンマータイプミルの導入が望ましい。バイオマスの前処理は、石炭よりも大きな動力が必要な粉砕を容易にし、加えて、燃料としてのアップグレーディングになるペレット化も容易にする。バイオマスを250～350℃で加熱処理するトレファクション（torrefaction）および水熱処理（熱水処理、hydrothermal treatment）は、いずれも上記要件を満足する前処理法として期待され、とくに前者は、基礎から実用検討に至る範囲で検討が進んでいる。前処理の課題に関しては後述する。もうひとつの重要な技術トピックは、バイオマス燃焼で不可避免的に発生する灰に係るトラブルの回避である。バイオマス燃焼ではサブミクロンの小径灰粒子（飛灰＝フライアッシュの一部）が発生しやすい。これは揮発性の高いアルカリ・アルカリ土類金属（とくに前者）に起因する。バイオマス専焼では実運転の経験を通じて多くの問題が解決されているが、石炭専焼を前提に設計された発電プラントの場合、灰に係る問題はバイオマス配合率が10%を超えると顕著になる。具体的には、燃料を吹き込むバーナー部、火炉、そして熱交換（蒸気発生）のためのスーパーヒーター、リヒーターを構成する金属管への灰堆積・蓄積によるファウリングの回避が重要である。ファウリングは熱交換効率を低下させるだけでなく、金属管腐食の原因にもなる。小径灰粒子は、ファウリングを起こさない場合であっても排ガス処理部、たとえば電気集塵における灰粒子捕捉効率の低下、窒素酸化物除去（SCR）のための還元触媒の被毒・活性低下もたらすことが指摘されており、適切な処理技術が求められる。これらの問題への対応には、石炭燃焼における同様、類似の問題の解決のために蓄積された技術とノウハウが有効であり、灰の問題は解決困難な問題とまでは認識されていない。

わが国における利用可能バイオマス量と石炭火力発電の規模の関係を考えると、特殊な場合を除けば、配合率が熱量ベースで10%を超える場合はかなり限定される。今後混焼が普及、拡大するとしても、バイオマス配合率はせいぜい数%の範囲内と予想され、ハンマータイプミル導入による石炭・バイオマスの共粉砕技術、高配合率対応のバーナーや排ガス設備などの導入のインパクトは小さく、現状の石炭燃焼・発電技術の部分的な改良のほうが、コストと開発期間の両面で有利であるケースが少なくないと予想される。

海外では、欧州で第7次研究・技術開発枠組計画（FP7：Seventh Framework Programme of the European Community for research, technological development and demonstration activities）で、さまざまなバイオマス混焼の経験を積むプロジェクトとして、バイオマス混焼率を50cal%に高め、モニタリングするプロジェクトが行われた。バイオマスのバイオマス混焼、専焼の技術の開発・導入が進んでおり、すでに50cal%以上の混焼の実績がある。欧州ではコジェネレーションでの普及が進んでおり、2009年の発電実績は62 TWh（設備容量約14,000 MW）となっている。また、FP7ではトレファクションに関する研究 SECTOR が採択されている。米国では、省エネルギー・再生可能エネルギー局（EERE：Energy Efficiency & Renewable Energy）で10 MW、20 MWの混焼発電計画、石炭混焼率20%を目標とした研究開発が進められている。中国、韓国では目立った研究開発は行われていない。中国は、再エネ発展第12次5カ年計画で、2015年までにバイオマス電源設備を13,000 MWとする計画となっているが、農産物、メタン、ごみ焼却となっており固体バイオマスは含まれていない⁴¹⁾。韓国は、2012年に定めた、電力需要の2%を再生可能エネルギー供給するために、2020年に500万tのペレット輸入を計画している（2012年75万t⁴²⁾。石炭火力での混焼、バイオマス専焼のほか、ガス化発電、メタン発酵発電なども小規模ながら行われている。

②バイオマスの燃料転換

バイオマスを気体あるいは液体燃料に転換する技術（ガス化、熱分解、メタン発酵、微細藻類転換）の動向について述べる。

<ガス化>

ガス化については技術を確立して実用化という実績は現在でも限られている。タールによるトラブルなどの問題解決のための技術開発が現在も続いている状況である。

わが国では、ガスは主として中小規模、とくに出力<2 MWe未満のバイオマス発電に採用されるガスエンジン等に適合した気体燃料製造技術としての研究と開発が行われてきた。小規模発電では蒸気タービンの効率が低く、ガス化+ガスエンジン発電のほうが正味の発電効率が高くなる。発電用燃料ガス製造のためのガス化は、空気を酸化剤とする部分燃焼（一部は水蒸気も積極的に活用）によるのが一般的である。空気の80%を占める窒素は、燃焼ガスを希釈し、燃料ガスの発熱量を低下させ、反応に関与しない窒素を反応温度（800~1000℃）まで「無駄に」加熱する必要も生じ、その結果、ガス化における化学エネルギー回収率（冷ガス効率）を5ポイント以上低下させるという問題はあるが、現在のガスエンジンは低発熱量の燃料ガスから比較的高い効率で発電ができること²⁾、酸素製造に経済的合理性がないことから、純酸素、酸素富化空気の適用は一般的でない。国内では、これまで多くの技術開発事業が実施され、補助金付きで稼働した実績²⁾は少なくないが、タール等に由来するトラブル、経済的問題によって稼働停止に追い込まれることが多く、技術普及は容易でない。

EUでは、種々の中・小型バイオマスガス化・発電（熱電併給）プロセスの開発が行われてきた。ドイツ Burkhardt 社が開発した小型のガス化発電システム（V3.90；システム出力=165 kWe（電）+230 kWt（熱））はその好例である。含水率が低くハンドリング性に優れた木質ペレットを専用燃料とするガス化方式が採用されるので燃料コストの課題はあるが、発電効率が30%（メーカー公称値）に達する点は注目に値する。ガス化の効率（冷ガス効率）やタール問題の回避に関する詳細な情報はないが、従来の固定層ガス化の弱点（例；タール

蒸気が迅速分解するチャコール層の滞留時間は短い) を改良した形式のガス化方式が採用されていると考えられる。

<熱分解>

バイオオイルを製造するための熱分解技術の開発は、数年前ほどの活発さはなく、技術開発の対象はバイオオイルのアップグレーディングによる燃料油（あるいは燃料油＋化成品）の製造にシフトしている。ただし、中国においては、熱分解（バイオオイル製造）やバイオオイルのクリーンガス（合成ガス）、液体燃料への改質に関する学術論文の発表（たとえば文献 8）が多く、国内では実証プラント、さらに商用プラントの稼働例もある。バイオオイルは、化学組成が極めて複雑であり、酸素含有率が高いので、現在の流体燃料に適合する **drop-in liquid fuel** にアップグレーディングするには、大きな質量損失を伴う接触熱分解あるいは水素を必要とする水素化（化学エネルギー損失大）、さらには反応後の成分分離が必要となる。これまで多くの基礎研究がなされてきたが、ごく一部を除けば商用化に至っていない。なお、バイオオイルをアップグレーディングせず、重油代替として利用する動き（Dynamotive 社、カナダ）があったが、商業生産と利用の情報は特にない。

<メタン発酵・バイオガス発電>

メタン発酵の技術は極めて古く、オイルショックの影響で大きく応用技術が進み、2000年頃に実用化、その後、普及し続け、現在も続いている。

バイオガス（＝バイオマスの嫌気発酵により発生したメタンリッチガス）を燃料として国内で稼働する発電設備は 20 ほどあるが、いずれも小規模（50～350 kW_e）である。12 メタン発酵・バイオガス発電の電力生産に対する大きな寄与は期待できないが、廃棄物処理プロセスとして重要な意味があり、今後は小規模でも経済性が成立するプロセス開発、改善が望まれる。国外のピックアップすべき技術検討例としては、(a) メタン発酵で発生する消化液のプロセッシングによる肥料成分の回収（リン等）とリサイクルシステム、(b) 小規模メタン発酵システム⁹⁾、(c) 廃水からのメタン製造、(d) 微細藻類を利用したバイオガス製造（原料：海藻）をあげることができる。(c) に関しては、国内でも実用化を目指した事業（馬鈴薯澱粉製造時に発生する廃水・廃棄物をモデル原料とする水熱可溶化技術を組み合わせたコンパクトメタン発酵システムの研究開発）が実施されている¹⁰⁾。

<微細藻類を利用した燃料油製造>

自ら脂質を作り出す微細藻類を育成し、脂質（油分）を製造する技術に関する研究、技術開発は世界的に活発である。微細藻類利用による炭化水素類等燃料の製造技術は、わが国ではニューサンシャイン計画（1990～1999、事業規模>140 億円以上）のなかで開発された。その後 10 年余を経て、産業競争力懇談会（2011）によって改めて提言された¹¹⁾。提言には、持続可能な輸送用燃料製造法としての GHG 排出量削減への寄与、エネルギー資源多様化や自主開発エネルギー源の獲得への貢献、燃料供給インフラへの新規投資が不要な燃料油（**drop-in fuels**）製造、搾油残渣の固体燃料、家畜飼料などへの適用、などの期待がある。2012 年から各種の NEDO 事業（研究、技術開発）が開始された。現在は、バイオマスエネルギー技術研究開発／戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業において、「微細藻類バイオ燃料製造に関する実用化技術強化の研究開発」、「海洋性緑藻（クラミドモラス・オルビキュラリス）による油脂生産技術の研究開発」、「微細藻類の改良（高速増殖型のボトリオコッカス株）による高速培養と藻類濃縮の一体化方法の研究開発」、「好冷性微細藻類（珪

藻) を活用したグリーンオイル一貫生産プロセスの構築」、「高油脂生産微細藻類の大規模培養と回収・燃料化」等の研究開発が推進されている。いずれも実用化に向けた高い目標が設定されるが、基礎的検討も多い¹²⁾。

藻類によるバイオ燃料生産は、後述する国外事例を含め、長い研究開発を経ても未だ実用化に至っていないことを踏まえ、「研究開発実施者あるいはそれに準ずる者ではない第三者を主体とするフィージビリティ研究、技術・経済的アセスメント」が望まれる。例えば、約 300 の文献情報に基づいて行われた燃料製造コスト低減ポテンシャルに関するアセスメント¹³⁾では、藻類生育速度、脂質割合、脂質濃縮率、脱水効率等の因子に関する感度解析、最適プロセスの抽出の結果、製造コストは約 500 円/kg (生育: 約 300 円/kg、脱水 (抽出)・燃料化: 各約 100 円/kg) との厳しい評価がなされた。なお、国内研究開発 (現在) の開発目標は、抽出のコストのみで約 100 円/kg (ただし、国外約 40 円/kg) であり、上記アセスメントの結果と大差はない。カーボンニュートラル性についての詳細なアセスメントの事例もある。回収油を原料とするバイオディーゼル製造に関しては、既往の論文、レビュー等 (74 件) を踏まえたアセスメント¹⁴⁾が行われ、その結果、藻類育成や油分抽出等に投入されるエネルギーは、得られるディーゼル油のエネルギーの数倍と大きく、搾油 (脱脂) 残渣を効率よくエネルギー転換・利用しない限り、カーボンポジティブ、すなわち、化石由来 CO₂ をむしろ増大させることが指摘された。

中国では、微細藻類を利用する一種のバイオリファイナリー、すなわち、燃料 (バイオディーゼル、バイオエタノール) に加えて高付加価値製品 (化成品、食品、コスメティック、医薬品等) を併産するシステムを念頭に、種々の育種を対象とする実験的検討がなされている¹⁵⁾。藻類育成とハーベスティングに多大のコストがかかることが強く認識されている。120 の文献 (2005 年以降の学術・技術論文が主) をレビューし、製品としてのバイオ燃料 (液体、合成ガス、水素) や電力を異なる種々の微細藻類の転換から得るプロセスを検討した事例も報告された¹⁶⁾。これによれば、藻類の転換技術 (熱化学、生化学) よりもむしろ、育種の開発と最適化 (脂質収率増大、低コスト育成に適した解放池における迅速育成)、ハーベスティング技術革新、大規模化対応技術開発、転換前処理技術 (脱水、成分分離) が課題として重要であることが示唆される。120 kL/day (面積 2,925 ha) 規模生産を想定した最新のプロセス検討¹⁷⁾では、種々の因子について感度解析を実施し、標準ケース (ハーベスティングする藻類の脂質割合=25%、生産性=25 g m⁻² day⁻¹) のコストは 400 円/kg-oil (1£ = 200 円とした) であること、コスト半減には脂質割合、生産性のいずれかを倍増する必要があることが示されている。微細藻類からのバイオ燃料の技術的ハードルは依然として高く、育種の改良と生産性向上、さらに高付加価値化成品製造との統合によるバイオリファイナリシステムの検討が望まれる。なお、脂質増産の加速化に必要な「生物機能解析に係わる基盤技術の必要性」については、文献 1 に述べられている。

③ バイオエタノール

バイオエタノール製造技術に関しては、技術自体はきわめて古く、オイルショックの時期に実用化した。とうもろこし残渣 (corn stover) 等を原料とするプロセス開発が 2000 年代以降米国において精力的に行われてきた。ただし、同国の政策目標 (200 億ガロンのバイオエタノール製造 (第二世代以降)、2022 年) を達成するのは困難な状況である¹⁸⁾。米国 NERL

の調査研究¹⁹⁾では、corn stover を 2,200 トン-dry/日という大規模で転換した場合のコストは約 86 円/kg-ethanol と試算された。文献 2 では、この試算をベースに木質バイオマスを原料とするエタノール製造 (標準ケース: バイオマス年間転換量 167,000 dry-トン/年、エタノール収率=23.6 wt%-dry-biomass、エタノール生産量=50,000 kL/年) に関してプロセス因子の感度解析が行われた。その結果、標準ケースにおける製造コストは >160 円/kg-ethanol であり、仮にエタノール収率を上限 (30 wt%)、加えて酵素コストを 50%減とした場合でもコストは 120 円/kg-ethanol と試算された。一方、プロセスの革新 (酵素リサイクルのための膜分離等を導入したプロセスの省エネ・省コスト化) を想定すると、エタノール製造コスト (ただし、プロセスのみのコスト; エタノール生産量=80,000 kL/年) は 50 円/kg-ethanol 未満になるとの試算²⁰⁾もある。現在、より高性能かつ安価な酵素の開発が国内外で行われており、エタノール製造コストのさらなる低減が期待されるが、一方、微細藻類によるバイオ燃料製造の場合と同様、第三者による厳しい技術・経済性アセスメントと技術開発の連動によって実用化の条件や課題がより明確化されることが望まれる。わが国では、セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業 (NEDO) において、バイオエタノール一貫生産システムに関する研究開発、セルロース系目的生産バイオマスの栽培から低環境負荷前処理技術に基づくエタノール製造プロセスまでの低コスト一貫生産システムの開発など²¹⁾が実施されており、要素技術に関しては世界トップレベルの成果が得られているが、実用化 (スケールアップなど) に向けた課題も指摘されている。

④ バイオリファイナリー

バイオマスから化成品を製造するバイオリファイナリーは、2000 年くらいから研究開発が始まり、米国、EU、日本、中国等で展開されている。日本では「科学技術イノベーション総合戦略 2016」が 2016 年 5 月 24 日閣議決定され⁴⁴⁾、バイオリファイナリー関連の研究開発も強化される。バイオリファイナリーは、バイオマスを相乗効果のある複数のプロセスによって複合転換し、高付加価値製品を二次エネルギーとともに生産する“コプロダクション”システムと定義することができる。高付加価値製品および燃料、電力・熱を生産の対象とするシステムは、それぞれ product-driven および energy-driven と表現される。バイオリファイナリーの研究開発は世界的に活発化している。国際機関 IEA Bioenergy には専用のタスク (Task 42) が設置され、情報発信^{22)~26)}が行なわれている。高付加価値製品と二次エネルギーはいずれも platform と表現され、バイオリファイナリーは platform の数によって以下のように分類される^{22)~26)}。以下の分類はあくまでバイオリファイナリーにあり得る形態の一部を示したに過ぎず、バイオマス原料、バイオマスを利用するベース産業、platform の利用者等によって多様な組み合わせ²⁷⁾が生じる。本稿において述べてきたように、バイオマスの二次エネルギーへの転換に経済性を付与するのは、二次燃料が電力・熱であれエタノールであれ、容易でない。しかしながら、これらの生産を化成品・素材等の高付加価値品の製造と組み合わせることによって経済的フィージビリティが生じる場合は大いにあり得る。

2-platform : バイオマスガス化をベース技術とするバイオリファイナリー
(合成ガス、電力・熱) ※1

3-platform (a) : 紙パルプ産業におけるバイオリファイナリー
(黒液、パルプ、電力・熱)

3-platform (b) : 紙パルプ産業におけるバイオリファイナリー
(パルプ、合成ガス、電力・熱) ※1

3-platform (c) : 木質を起点とするバイオリファイナリー
(C5/C6 糖、リグニン、電力・熱) ※2

4-platform : 木質を起点とするバイオリファイナリー
(水素、バイオメタン(= SNG)、合成ガス、電力・熱)

※1 合成ガスは FT (Fischer-Tropsch) 合成によって炭化水素 (オイル・ワックス) に転換される

※2 C5/C6 糖はバイオエタノールに、リグニンは phenol 等の化成品に転換される。

バイオマス資源の変換のための固体触媒の開発研究は、触媒化学の研究分野の中の最近 10 年程度のトピックであり、非常に新しい研究分野として位置付けられている。そのため、世界で活躍する研究者も他の分野と比較して相対的に若い世代である。研究者人口という観点からすれば、欧米、中国は極めて多く、日本は明確に少ない。例えば、触媒をメイントピックスに掲げた大学内の設置されている研究センターの数も日本と比較して、欧米や中国は圧倒的に多いのが現実である。一方で、オリジナリティの高い研究という観点では、研究者人口の割には明確に顕著な成果を挙げてきたとあってよく、それらの成果は、世界中でフォローされているのも現実である。基盤的な側面に着目すれば、分野をリードする視点や成果が国内から出てきている一方で、事業化という意味で日本がリードしている分野とは言えない。バイオマス資源から化学品を製造する産業は化学産業ということになるが、石油からバイオマスへの原料転換という激しい変化に対応する体力が問われることになり、日本国内の化学産業の体力が欧米の企業と比較して大きくない現状が映し出されている。

(3) 注目動向

[新たな技術動向]

バイオマスの酸素・水蒸気に関する研究開発 (基礎研究) では、日本で、最近、冷ガス効率 > 96%、炭素転換率 100%、残留タール濃度 < 20 mg/Nm³-syngas となる次世代ガス化プロセス、タールフリー炭化物 (バイオチャー) と軽質油のコプロダクション、バイオチャーの水蒸気ガス化と固体酸化物形燃料電池の複合による超高効率複合発電等が提案された²⁸⁾。次世代ガス化に関しては、小規模ながら連続試験による概念実証の事例²⁹⁾がある。

バイオマス燃料、バイオリファイナリー⁴³⁾については、バイオマス由来の糖や低級有機酸等を起点 (platform ; C3~C6 化合物) とする化成品の製造に関する基礎、プロセス研究がここ数年の間に活発化している³⁰⁾⁻³²⁾。種々の化成品を誘導するプロセスの開発は、platform を生産するバイオリファイナリーの実装性を高めると期待される。また、バイオマスリファイナリーの基礎化学品の中で、有望視されているものの一つがグリセリンである。現時点での油脂産業や植物油からのバイオディーゼル製造プロセスから比較的大量に副生している一方で、それ自身の用途は極めて限られており、変換利用が望まれている。グリセリン変換の有望なターゲット製品は、1, 2-及び 1, 3-プロパンジオールであり、上でも触れているように 1, 3-プロパンジオールは極めて魅力的なターゲットになっている⁶⁰⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

NEDO 実証事業により、バイオマス熱電併給株式会社、E2 リバイブ株式会社は、木質バイオマス燃焼による発電の詳細なフィージビリティ調査（範囲：伐採、集積前処理、電力供給）および事業性や地域産業、経済への波及効果を定量的に評価するツールの開発を進めている（国内）。従来の技術開発において必ずしも十分でなかった系統的、客観的な技術・経済性アセスメントの事例として注目される。

デンマーク工科大学の Clausen, L. R. は、太陽光由来電力を投入する水電解による水素・酸素製造とバイオマスの酸素・水蒸気ガス化を組み合わせ、合成ガスあるいはこれに由来するメタン（合成ガス+水素）、液体燃料の製造システムを提案している。オリジナルの提案は 2008 年³³⁾だが、酸素を適用するガス化起点のバイオリファイナリーのオプションを太陽光との組み合わせによって提示した³⁴⁾。

バイオ燃料関連プロジェクトでは、NEDO のセルロースエタノール関連事業に加えて、平成 27 年度から「革新的エネルギー技術国際共同研究開発事業」（経産省）が実施されており、セルロース系バイオマスを原料としたバイオ水素生産やブタノールの製造に関する研究開発が採択されている⁵⁰⁾。本事業は、米国立再生可能エネルギー研究所（NREL）等との共同研究であり、経産省と米国エネルギー省との間で合意した「日米クリーンエネルギー技術アクションプラン」に基づき、再生可能エネルギー技術分野における日米共同研究開発の一環として実施されている。バイオ燃料関連の日本側参加者は、公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）である。

EU では、欧州全体の研究活動を助成する欧州委員会（EC）の主要な政策である第 7 次研究・技術開発のための枠組み計画（FP7）が 2013 年に終了し、後継プロジェクトである「ホライズン 2020 : HORIZON2020」が、2014 年～2020 年の 7 年間、総額 800 億ユーロ規模で開始された⁴⁵⁾。

米国では、「2030 年に 10 億トン（乾燥重量）のバイオマスを用い、化石由来燃料 25%を代替、2,300 万 t のバイオ由来製品と 850KWh の電力を供給」とする青写真（Blueprint）が発表され、これをを受けた政府や各省庁からなるバイオマス R&D ボードによる“Billion Ton Bioeconomy”が発表され、このビジョンでは上記目標に加え 170 万人の雇用と 2,000 億ドル（約 20 兆円）の市場の創出等が記載されている⁴⁶⁾。

中国ではセルロース系エタノールプラントの規模拡大計画が複数あり、韓国では、バイオブタノールへの燃料転換、合成油生産技術などがあげられるが、主だったプロジェクトはみられない。

バイオマスから化成品を製造するバイオリファイナリー技術の開発が米国、EU、わが国、中国等で展開されている。

日本のバイオリファイナリー関連プロジェクトでは、神戸大学の「バイオプロダクション次世代農工連携拠点」が 2008 年に始動し、バイオマスからの次世代燃料や化成品原料の生産と事業化に産学連携で挑んでいる。本拠点は、セルロース系バイオマスから多様な物質を高効率に作り出すための基盤技術を確立し、「バイオコンビナート」を形成することに挑戦している。神戸大は、微生物の代謝機能を改良し、目的とする化合物を大量生産するスーパー微生物（細胞工場）の研究では世界のトップレベルで、細胞内の数百種類の化合物を網羅的に測定する技術を活用して、細胞の機能を評価し、有用物質を効率的に生産する微生物など

を育て、細胞工場の開発に生かしている⁷¹⁾。

文科省の GRENE NC-CARP プロジェクトでは、名古屋大学が、バイオリファイナリーによるバイオベースの製品をつくる研究をしている。そこでは、セルロース、ヘミセルロースあるいはリグニンを取り出して糖化して、それを基幹物質に変換し、様々な高付加価値のバイオ製品を作るための研究を進めている。

経産省、NEDO のプロジェクトとして、2016 年度からは、「植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発」が始まった。従来、化学合成等により製造されてきた試薬・香料・化粧品等の高機能品について、植物や微生物細胞を用いた新たな手法で生産できる可能性が期待されている。本事業では、遺伝子設計に必要となる精緻で大規模な生物情報を高速に取得するシステム、細胞内プロセスの設計、ゲノム編集などを産業化するための技術開発を行い、これらを利用して植物や微生物による物質生産機能を制御・改変することで、省エネルギー・低コストな高機能品生産技術の確立を目指すとしている⁴⁷⁾。参加者は、神戸大学、九州大学、産業技術総合研究所、理化学研究所、キリン株式会社、味の素株式会社、三菱化学株式会社、公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）⁴⁸⁾等である。

RITE 発のベンチャー企業 Green Earth Institute が、千葉県木更津市に Green Earth 研究所を設立し、RITE バイオプロセス法（コリネ型細菌を用いた増殖非依存型発酵技術）による化学品生産の実証実験を行い、さらに国内企業との合弁により、中国でアミノ酸のパイロット生産を開始した⁴⁹⁾。神戸大では、バイオ燃料やバイオ化学品生産のため人工代謝経路設計プログラム（M-path）が開発されている⁵⁰⁾。ここでは、天然由来の酵素での代謝経路構築のみならず、人工酵素による新たな経路の提示も行われる。こうしたプログラムおよび人工酵素を創出することにより、高効率なバイオ化学品の生産体系を構築しつつある。人工酵素創出など、合成生物学的手法を用いた物質生産は今後重要になると考えられる。

JST ALCA ホワイトバイオテクノロジーでは、ダイセルが中心となって「微生物変換と触媒技術を融合した基幹化合物の原料転換」のプロジェクトが進行中であり、これまで石油を原料として製造されている化成品を、未利用の廃グリセリンから製造する技術開発を行っている。具体的には、グリセリンをまずバイオ技術によって、汎用的な中間原料であるエリスリトールへと変換し、さまざまな高価な原料を作り分けることができる固体触媒を開発し、その反応によって、ジオールなどの工業原料を生産することを目指している⁶¹⁾。

2016 年度事業では、東北復興次世代エネルギー研究開発プロジェクトにおける「東北復興のためのクリーンエネルギー研究開発の推進：微細藻類のエネルギー利用」研究も計画されている⁴⁶⁾。

バイオリファイナリーの基礎化学品の中で有望視されているグリセリンに関連する研究開発では、世界中で 10 年ほど前からプロパンジオールを生成物とするグリセリンの選択的 C-O 水素化分解反応の触媒開発研究が進められてきている。グリセリンの水素化分解反応の顕著な成果が日本人研究者により報告されてきていることは注目される。例えば、金属-固体酸二元機能型触媒を用いることで、酸触媒によるグリセリンのアセトールへの脱水反応と金属触媒によるアセトールの 1, 2-プロパンジオールへの水素化反応が逐次的に進行し、ワンポット変換が可能であることが見出された⁶²⁾。一方で、1, 2-プロパンジオール収率という観点においては、千葉大学の研究グループが収率 100%に迫る際立った成果を報告している⁶⁰⁾。この研究は、引き続き、JST 国際科学技術共同研究推進事業戦略的国際共同研究プログ

ラム「普遍元素酸化物触媒の合成とバイオマス変換反応展開」で行われている⁶³⁾。また、1,3-プロパンジオール製造についても、特徴的な固体触媒が日本の研究者により報告されている。具体的には2010年当時世界最高収率を達成したレニウム修飾イリジウム触媒や⁶⁴⁾、2013年には現時点での世界最高収率を達成しているベーマイト担持白金/タングステン触媒などである⁶⁵⁾。グリセリンの水素化分解に関する触媒開発研究が牽引する形で、バイオマス関連化合物のC-O水素化分解や水素化脱酸素反応に関する進展も顕著である⁶⁶⁾。

米国のバイオリファイナリーは、エネルギー効率・再生可能エネルギー局（EERE）により策定された「バイオマス複数年プログラム計画（Biomass Multi-Year Program Plan）」に沿って技術開発が行われている。特に、セルロース系からのエタノール生産に重点が置かれており、セルロース系原料によるバイオリファイナリー、熱化学処理の実証、エタノール発酵用微生物、低コスト糖化酵素の開発などが行われている。米国農務省とのバイオマス研究開発イニシアティブ（BRDI：Biomass Research & Development Initiative）とも連携が進められている。

Iowa State University の Brent H. Shanks を中心として、Center for Biorenewable Chemicals（CBiRC）が立ち上がっており、これは、NSF の支援により推進されている。課題として、Biocatalysis、Microbial Engineering、Chemical Catalysis という3つの分野が協同したプロジェクトになっており、いずれの分野においても米国のその分野を代表する研究者が名を連ねている⁶⁷⁾。Chemical Catalysis 分野においては、固体触媒の開発に力点があり、日本で見出されたシーズを展開するような研究も含まれている。

バイオリファイナリーの実用化では、セルロースエタノールの大規模生産が米国を中心に始まっている。2014年のPOET-DSM Advanced Biofuels, LLC（Project LIBERTY）⁵¹⁾に続き、デュポンが、2015年10月から商用生産を開始した。アイオワ州ネバダのコーン農地の真ん中に工場を立地し、半径30マイル圏内で500以上の農家と契約を結び、年間37.5万トンの原料調達を確保している。物流ではトウモロコシ葉茎の収穫・輸送の効率化でトラクター会社と共同開発しており、アイオワ州政府、大学、USDA等との協働・支援を得ている。また、農家にエタノールを販売してもらい、それに対するライセンス・機材供給・各種技術サポートほか、市場展開に関するコンサルティング等を行うビジネスモデルを構築している。規模は世界最大で年産3,000万ガロン。米国だけでなく、中国や欧州でも同様なプラント建設を進めるとしている⁵²⁾。

バイオリファイナリーの開発支援プロジェクトでは、2015年7月、DOEが補助金対象事業6プロジェクトを発表した。内容は、藻類からのバイオディーゼル油およびジェット燃料の製造、その副製品としてポリマーおよびプロテインなどの高付加価値製品を製造する予定である。これにより事業の収益改や稼働率を上げ、製造コストを下げる狙いである。各プロジェクト合計の補助金総額は、1,800万ドルとなっており Los Alamos National Laboratory 等が参加する⁵³⁾。民間企業では、米国 Genomatica 社では1,4-ブタンジオールの生産にあたり、最終段階に必要な酵素を大腸菌に導入することで、その生産に成功している⁵⁴⁾。その他、米国 DARPA が1.1億ドルを投資して、合成生物学的アプローチなどを用いて1000の新規な有用化合物をつくる計画（1000分子プロジェクト）を発表している。これには既知分子の高効率作製、石油由来の方法では作製できない化合物作製、新規分子開発が含まれ、化学合成原料として利用可能な化合物を合成しようとしている。

欧州では、Utrecht University の Bert M. Weckheuyzen をリーダーとして CatchBio Program が進められており、Energy、Bulk Chemicals、Fine-and-Pharm、Socio-economic aspects の4分野の研究が進められている⁶⁸⁾。また、KU Leuven の Bert Sels をリーダーとした木質バイオマスから芳香族化合物を得るための触媒開発研究が FISCH という組織により支援され進められている⁶⁹⁾。リグニン変換に関する研究は、欧州で力が注がれているように思われる。

中国では、Chinese Academy of Sciences、Dalian Institute of Chemical Physics の Tao Zhang がリーダーとなり、National Natural Science Foundation of China の支援を受けて、セルロースやリグニンから化学品などを合成するための触媒開発研究が進められている⁷⁰⁾。

(4) 科学技術的課題

[課題 (ボトルネック)]

バイオマス燃焼 (専焼、混焼) に関しては、特筆すべきボトルネックがあるとは言えないが、技術のグローバル対応・先導の観点から、安定した高効率運転などの技術高度化のための灰微粒子の生成、ファウリングの抑制・防止技術が課題となる。

微細藻類を利用した燃料油製造、第二世代バイオエタノールに共通するボトルネックは経済性である。前述のように、技術・経済的アセスメントと技術開発の連動が望まれる。

ガス化による合成ガス製造はバイオリファイナリーのコア技術である。最近、従来にない効率を低残留タール濃度とともに達成した事例があるが、従来のレベルを超えた低温高性能ガス化の技術開発が課題である。

最近の知見によれば、簡便な熱分解によってタールフリーのバイオチャーと重質成分フリーの軽質油を併産可能である。しかしながら、これらを分離し、それぞれの物性を最大限活用する転換につなぐバイオリファイナリーの戦略がない。これを含め、本来多様な製品の組合せを実現可能なバイオリファイナリーに関する技術開発やシステム検討が欧米よりも立ち遅れており、我が国の課題である。IEA Bioenergy では、バイオリファイナリーを構成する要素プロセスの開発よりも、生産物の種類と量的バランス、システム立地条件などを想定した解析し、経済的に成立する (成立する可能性が十分にある) システム構成の探索や抽出がソフトウェアの開発と連動して行われている。製品は Platform に留まらず、医薬品、食品添加物、コスメティック等の高付加価値物も想定される。このような解析はシステム設計であると同時に今後開発、社会実装できる可能性のあるシステムに対する事前の技術・経済性アセスメントとしても機能する。このような解析、アセスメントはわが国の技術開発の弱点 (あるいは軽視されている点) と言える。今後、種々の “ポテンシャルバイオリファイナリー” を想定したシステム解析、アセスメントが組織的に行われ、経済、資源供給の両面で持続性のあるシステムや要件が抽出され、技術開発との連携がなされることが望まれる。

バイオマスから化学品を製造するプロセスが、石油を原料とするプロセスに対して経済的に優位にたつためには、バイオマス原料の価格、水素などを始めとする反応試剤の価格等不利な条件を補って余りある付加価値の高い化学製品を極めて高い選択率・収率で得ることが必要となる。一方で、バイオマスの利活用が石油代替技術や環境技術であることを踏まえると、極めて高価な医薬品のようなものをターゲットにすることは適切ではなく、樹脂原料の

ようなかなりの使用量が見込めるものであることが必要となると考えられ、原料や化学製品のバリエーションは多く、どのような原料、製品に目をつけるかの戦略が極めて重要である。バイオマス化学品を製造するプロセスを実現するためには、様々な分野での技術開発が必要となっている。変換のキーテクノロジーとしては、生体触媒（酵素、微生物）と固体触媒となる。酵素反応としては、あまり生成されていないような原料を使用することができ、反応速度が十分に大きく、生成物収率が高いことと同時に、生成物濃度も十分に高い必要がある。水溶液中から生成物を分離・精製して用いる際には、希薄溶液から生成物を得るような状況ではエネルギー的な観点で極めて不利になってしまうからである。微生物にとって毒性が低く、高濃度でも微生物が持ちこたえられるような生成物に目をつけることになる。固体触媒反応については、酵素や不均一系触媒反応と比較して、一般的に選択性が十分高くないことが問題点として挙げられている。この意味でも超高選択的固体触媒の開発が重要である。また生体触媒、固体触媒のいずれの場合においても、触媒コストが高くないものを開発する必要がある。固体触媒に関して、触媒コストが嵩んでしまう場合には、長寿命触媒であるか、繰り返し使用が可能であるか等のより高い性能が要求される。

一方で、このような効率的変換を実現する技術開発と同時に、溶媒に関わる化学と工学、エネルギー効率の高い分離・精製に関わる化学工学分野も進歩していく必要がある。上述したように、バイオマス原料、そして、バイオマスに関わる基礎化学品いずれも、酸素含有率が高く、分子中に極性を持つため、沸点が高く、石油精製や石油化学で行っているような気相で反応させることは難しくなる。そのため、水や有機溶媒などの溶媒を用いる必要があるからである。

芳香族化合物等の機能性化学品の微生物生産については、芳香族化合物生産微生物開発が課題となる。芳香族化合物は、微生物では主にシキミ酸経路によって生合成され、医薬品、農薬、化粧品、香料、燃料など様々な分野で汎用されているが、原料の糖類からの生合成ステップ数が 30 以上と多く、生産性が低いため、代謝設計による芳香族化合物生産微生物の創製が必要である。

芳香族耐性微生物の創製も課題となる。石油化学系芳香族化合物（BTX やフェノール）や長鎖アルコール（ブタノール等）は強い細胞毒性を示し、微生物による効率的な実用生産が難しいので、芳香族化合物等に耐性が高い微生物育種が求められる。

[今後取り組むべき研究テーマ]

IEA Bioenergy が着目する水熱処理は、燃焼において問題となるアルカリおよびアルカリ土類金属を酸の添加なしに水相に抽出除去する特性を持つ³⁶⁾。ただし、この特性を活かすには、加圧下で高濃度・高粘度スラリーを安定な操作、固液分離、事後乾燥、水リサイクル等を効率良く行う必要がある。他方、水熱処理は、技術基盤が酸加水分解によるセルロース・ヘミセルロースとリグニンの分離と同じである。後者はこれまでに研究開発の蓄積があるとは言え、化学 platform としての単糖とリグニンを併産するバイオリファイナリーの起点としては開発の余地が大きい。水熱処理と成分分離技術は、基盤を共通化した開発が可能である。

微細藻類利用によるバイオ燃料製造に関しては、まず、厳しい第三者のアセスメントを実施し、将来の技術実装可能性、燃料供給技術としての意義とインパクトを評価することが望ましい。そのうえで、必要と判断されれば、現在も取り組みがなされている高性能育種の開

発、脂質回収・脱水等の分離技術の革新に向けた技術開発を加速することが望まれる。バイオエタノール製造に関しても同様の、かつスピーディーな展開が期待される。

バイオマスの低温ガス化や、熱分解由来の軽質油、バイオチャーの転換（改質・ガス化）を、バイオリファイナリーの起点技術と認識し、必要なスペックを明確にして革新的ガス化、改質および関連プロセスの開発を実施することが有効である。加えて、多数の研究報告がある触媒ガス化、改質法の知見を構造化し、そのうえで、極めて安価（かつ極めて高耐被毒性、長寿命）の触媒の適用による 700℃未満の低温におけるタール完全改質の達成に向けた技術開発プログラムを構築するのが望ましい。

超高選択性を持った固体触媒開発に関して、バイオマスに関連する基礎化学品は一分子中に複数種類官能基を複数個持つことも多く、一般的には高い選択性を出すこと自身容易ではないが、革新的に超高選択性を実現できる精密触媒設計が求められる。この性能を安価な触媒材料で実現できることが望ましい。水溶液系での触媒を用いることが予想されるため、溶出しにくい貴金属触媒が用いられやすいが、その分触媒コストが高くなることに注意を向ける必要がある。安価な触媒材料で溶出などの問題をクリアするための合金化・複合化技術なども従来の石油精製・石油化学技術とは異なる新しい開発テーマであるといえる。

生体触媒（酵素、発酵）に関する技術については、高活性、高収率で生成物を与え、特により高濃度で生成物を与える発酵技術の開発が課題となっている。

分離・精製に関する技術については、バイオマス資源を原料として樹脂などを製造するには、樹脂原料であるモノマーの段階では極めて高い純度が必要となる。バイオマス資源からモノマーを合成するいずれかの段階で純度を上げることになるが、発酵を用いる場合には、生成物をより高濃度で得るようにしたとしても、蒸留に代わる効率的な分離・精製技術（例えば膜分離など）の開発が求められる。

その他の周辺技術に関しては、発酵法にしても固体触媒を用いる場合でも、バイオマス資源の変換を容易にするエネルギー消費の少ない方法の開発が重要テーマである。バイオマス資源を還元するための還元剤となる水素の安価で再生可能な製造法はバイオマス資源活用のフィージビリティを確実に高めるものであり、重要な技術開発テーマの一つである。

芳香族化合物等の機能性化学品の微生物生産については、効率的な芳香族化合物生産微生物の創製、代謝設計によるターゲット化合物の高効率生産、対糖収率の向上、芳香族化合物耐性微生物の育種技術の確立などが今後取組むべき研究テーマとなる。

（５）政策的課題

バイオマス利用は化石燃料と比較してコストが高いため、CO₂対策としての国の普及促進施策が求められる。すなわち、サプライチェーン全体への公平なインセンティブ付与や、逆に公平な費用負担の仕組み等の構築が期待される。国内では、森林資源の維持のため間伐材のバイオマス資源化、農業廃棄物の有効利用など国として推進していく必要がある。競争原理に委ねると輸入バイオマスの価格競争力が有利で世界のバイオマス資源を日本に集めることになり将来的に国際的批判を浴びる可能性がある。国内外で再生産可能なバイオマス資源の管理が重要となり国の指導が必要とされる。バイオマスは分散資源だが有効且つ経済的に利用するには大規模加工が不可欠となる。地域収集→地域一次加工（粗 BTL 化で容積減、輸

送効率アップ) →大規模最終製品加工(代替ガソリン、バイオジェット燃料等)の社会的仕組み作りが重要である。

技術の目的、内容に関わらず、これまでのわが国のバイオマス転換技術開発において十分でなかった、あるいは欠けていたのは、提案された技術提案に対する技術・経済性アセスメントと、有望なアイデアであった場合の必要課題の見極めプロセスであったと考えられる。エネルギー資源としてのわが国のバイオマスポテンシャルは小さいため、エネルギー転換技術を意義あるものとする長期的な戦略を策定するのが容易でない。これはバイオマス利活用の基本方針に関わるので、十分な議論が望まれる。上記に関しては、産・学と政策担当者が協働し、バイオマス利用技術とシステムのフィージビリティ検討やクリティカルアセスメントを実施し、システム・要素技術のスクリーニング、評価、必要技術・システムの抽出を組織的に実施し、そのうえで、技術開発プロジェクト立ち上げのしくみを作り、実践する。あるいは、技術提案を同様に検討し、提案採択後もアセスメントチームがプロジェクトに参画するといった、従来にない技術開発体制を構築することが課題となる。以上の取り組みは、将来の普及性が高いバイオリファイナリー等の開発にとくに有効と期待される。

FIT 運用開始から今年で4年目だが、運用期間は20年に限られる。冒頭に述べたように、わが国におけるバイオマスのエネルギー利用技術の実装と普及には、「量的問題」、つまりバイオマスの「量的インパクトが小さい」ことを踏まえた戦略が期待される。バイオマスエネルギー利用の意義として述べた4項目のうち、地域産業・雇用創出、バイオマス供給インフラ・ロジスティクスの整備に着目すれば、バイオマス利用を現在の発電・熱利用が主である現状から、高付加価値製品の生産型にシフトしていくための技術・インフラ開発のロードマップ作成、技術・システムの開発とアセスメントが両輪となる研究開発、制度開発実施への期待は大きい。バイオマスはその生産速度に釣り合った消費(CO₂への転換)を継続すればカーボンニュートラルだが、バイオマス由来の炭素をCO₂に転換せず、固体(樹脂、炭素)あるいは液体として社会に蓄積し、加えてその蓄積を駆動力とする製品(付加価値)の再生産ができれば、実質的にカーボンネガティブとなる。この、バイオマスにしかない炭素資源としての特性を踏まえた、アカデミア・産業界・政策担当者の連携による「将来のバイオマス利用のあり方の検討」、すなわち、政策担当者には、低炭素社会、さらには、炭素循環型社会実現のためのバイオマス利活用を、他資源の利用と産業構造、社会システムと併せて基礎から検討することが期待される。

一方、国外、とくにアジア・アフリカ諸国などの、バイオマス資源のポテンシャルが大きい国に対しては、それらとの持続的なwin-win関係構築の一段として、わが国のバイオリファイナリー技術(燃料・電力生産と高付加価値製品の併産)を順次導入し、その後も長期にわたって改良技術導入等を継続するシナリオ、このシナリオに沿った継続的技術開発(ボトルネック解決、次世代技術育成)による国際競争力の獲得・維持が望まれる。上に述べた将来の低炭素化、炭素循環に向けたバイオマス利用(日本モデル)のグローバル普及も期待される。

非可食バイオマスを原料としたバイオ燃料のコスト高は問題となっており、米国では補助金によるセルロースバイオエタノール生産が行われている。また、セルロース資源の革新的な糖化方法がないことも最大のネックとなっている。セルロースからのエタノールやブタ

ノール生産を、さらに低コストで実現できれば、発酵原料としてセルロースへの注目がさらに上がる。古くからわが国における発酵技術水準は高いが、米国、ブラジルなどのようなセルロース原料の国内での大量生産や安定供給は困難である。制度的な問題としてガソリンへの混入割合を国家主導で決定することが重要である。米国では各州政府がバイオエタノール最低使用基準を設定している。こうした取り決めはバイオエタノール需給に大きな影響を与えている。米国におけるバイオエタノールの需要量が年率 5%増加することが予測されている。ただし、バイオ燃料か食料生産かの議論があることから、非可食部からのバイオエタノール生産が重要課題とされている。世界最大のバイオエタノール生産量を誇る米国ではブレンドウォールとよばれる E10 の壁に直面している。これはガソリンへのバイオエタノールのブレンド比率を 10% (E10) として対応してきたが、バイオエタノール生産の急成長から、再生可能燃料の義務的利用目標 (RFS) を上回る生産量に達している。その後も生産量は伸びているがブレンド比率を上げない限り、米国内での消費ができない状況になっている。E15 の導入も検討されており、2007 年以降の車と軽トラックに限定して使用されるが、安全面の懸念から E10 以上の混合燃料を給油する設備の普及が止まっている。フレックス車の普及も限定的であり、現状、欧州、ブラジルへの輸出により消費していることから、バイオ燃料生産に関する研究開発が後退するとの懸念もある。一方、日本国内では石油業界が進める ETBE と政府が進めるバイオエタノールの直接混合方式が混在している。2015 年度の流通量は、ガソリンスタンドで 3,000 か所以上、原油換算 21 万 kL を既に達成したが、消費者にとっては E3 (エタノール 3%混合ガソリン) か、または ETBE の混合ガソリンのどちらを使用するのか混乱が続いており、国内のバイオ燃料導入政策を統一する必要がある⁵⁷⁾。

2012 年からわが国でも導入された電力固定価格買取制度 (FIT) は、再生可能エネルギーの普及拡大の目的で、世界各国でも再生可能エネルギーの助成政策として用いられている。わが国でもこの流れを受け、木質チップや畜産糞尿や汚泥からのバイオマス発電事業が開始されているが⁵⁸⁾、バイオマス利用発電推進姿勢を明確に示すには、買取価格を他の再生エネに対して比較優位にしていく必要がある。

(6) キーワード

バイオマス、非可食性バイオマス、木質、農産廃棄物、バイオマス発電、専焼、燃焼灰、フライアッシュ、粉砕、ガス化、ガス化発電、熱分解、改質、触媒、バイオオイル、水熱処理、液体燃料、バイオ燃料、脂質、微細藻類、バイオリファイナリー、嫌気発酵、メタン発酵、バイオガス、合成ガス、バイオエタノール、酵素、プラットホーム、水素、化成品、化学プラットホーム、バイオマス成分分離

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● バイオマスニッポン構想以来、バイオマス利用に係る研究者数が著しく増加したが、その後のファンドの全体的な収縮に伴い、熱化学変換に関する研究のアクティビティの向上は顕著と言えない。 ● 一方、生化学ベースの転換利用に関する研究は活発である。熱化学、生化学によらず、要素技術に関する基礎研究のレベルと独自性は世界トップレベルのものが少なくないが、要素技術に対してバイオリファイナリーのようなシステム技術の研究者の層が薄く、技術の社会実証を念頭においた組織的な産学連携を高い生産性を持って進める体制に弱さもある。 ● 大学の研究力は日本全体に少しずつ低下してきている状況は否定しがたいし、固体触媒分野においてもその影響を受けていることは確かである。バイオマス変換触媒が若い研究分野であり、相対的に若い研究者が活躍しやすい場になっており、そのために何とか現状を維持できている状況である。 ● 大学内に設置されている触媒を研究するセンターの数などは欧米と比較すると明確に少なく、研究者人口が相対的には少ない状況である。オリジナリティの高い触媒の開発研究自体は日本人の気質や能力が生かされる分野であり、研究者人口を考慮した場合には成果を生み出す確率は高いと感じる。 ● バイオリファイナリー関連では、JST・ALCAやMETI/NEDO植物等の生物を用いた高機能品生産技術の開発等のプロジェクト等に期待。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 液体燃料製造（BTL）に関する研究は、ガス化+FT合成、バイオエタノール製造、微細藻類利用による燃料製造の技術開発が、産主体あるいは産学連携のもとに進められている。要素技術のスペックは世界トップレベルのものが少なくない。 ● しかし、バイオマスのエネルギー転換に係る技術開発全体をみると、ここ数年で活発さが向上したとは言えない。加えて、技術アセスメントや、これを通じた革新的技術やシステムの抽出、技術体系化、共通基盤を持つ技術の組織的開発のしこみはEU、米国ほど整備されておらず、研究の生産性をさらに向上する取り組みが望ましい。 ● 石油価格の変動、シェール革命など炭化水素系資源の激しい動きの中で、産業界としてバイオマス資源の利用をどのように意義付けて積極的にとらえていくかを明確にできないように感じる。国内の石油精製産業や石油化学産業の新事業を考える余裕や体力が問われている。 ● バイオマス由来フェノールやバイオナイロン等の実用化開発が加速。 ● バイオ燃料生産拠点確立支援事業の中止等、バイオ燃料は採算性が厳しい。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● バイオオイル製造のための熱分解技術、ガス化技術に関する基礎研究は一段落した感があるが、微細藻類を含む生化学ベースの燃料、化成品製造に関する基礎研究については先導的であり、研究者層も厚い。 ● 技術開発への組織的取り組みが一旦開始されると、基礎研究、技術アセスメント、モデリング・システム検討、パイロット研究が比較的短期間に進むのは、この分野に限らない特徴であり、頻度の高いウォッチングが求められる。 ● バイオマス変換用の固体触媒研究に関わる研究者の数は現在極めて多い。表面化学が非常にホットであった時期には一時期少なくなっていた固体触媒研究が完全に復活し、より発展した印象を持つ。 ● もともと強かったゼオライト研究をバイオマスへと展開するなど、明確な強みを持っている。特に、力のある研究者同士を終結した大きなプロジェクトやセンターを立ち上げ、研究が加速されている。 ● 2015年DOEからの補助金対象事業6プロジェクト（藻燃料）を発表。総額1,800万ドル。 ● DOEバイオ技術部門（BETO）がバイオマスから炭化水素燃料の研究に1,130万ドルを助成（2016）。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● バイオエタノール製造技術（第一世代）に関しては世界を先導する。第二世代製造技術に関しても大規模実証がなされている。ただし、第二世代技術に関しては政府が掲げた当初目標の達成は困難である。 ● バイオマス、とくにセルロース、ヘミセルロースを原料とする基幹化成品製造（熱化学・生化学）は、Dupont社、Dow社をはじめとして米国が世界に先駆けて開発を開始しており、一定の優位性を保っている。 ● EUで活発化しているバイオリファイナリーに関しても先進性と競争力

				<p>を有する。一方、バイオマスガス化発電技術に関しては、石炭IGCCをモデルとする大型のプロセス以外にはあまりニーズが小さく、中小規模プロセスの開発状況はEUほど活発でない。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● バイオマス研究において事業化を成し遂げているデュポンをはじめ、米国の化学会社の実力は言うまでもないが、シェールガスやシェールオイルの影響が出ている可能性が高い。 ● 2016年USDAバイオ化学品及びバイオリファイナリー開発に2億5,000万ドルの債務保証を発表⁵⁹⁾。 ● 2014年から年産10万トン規模のセルロースエタノールプラントが数か所稼働。 ● Gevo（イソブタノール）、Genomatica（ブタンジオール）、Amyris（バイオ燃料）、LanzaTech（バイオ燃料）、Dupont（バイオエタノール）等でバイオ燃料やバイオ化学品の実用化が拡大。
欧州	基礎研究	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● IEA Bioenergy等の国際機関におけるEUの研究者のプレゼンスは相変わらず大きい。研究者数を考慮すれば、革新的、高い独創性を持つ研究がとくに多いとは言えないが、要素技術、システム技術を丹念に研究して技術を高めていく手法とそのバックアップ体制、国を超えた共通課題への取り組み、商用化済み技術の問題をうまく基礎研究課題に落とし込む継続的な姿勢は、EUの研究開発の強みである。 ● バイオマスの燃焼（発電・CHP）、ガス化に関しては最も経験を蓄積しており、この強みをベースとしたバイオリファイナリーのシステム化研究、システム設計ツール開発、反応設計へのCFD導入と継続的技術の進展は、他よりも一歩進んでいる。 ● 技術システムのアセスメントの効果は、バイオリファイナリーに限らず、単糖ほかの化学platformからの多様な化成品製造経路の調査、スクリーニング等にも生かされている。 ● バイオマス変換用の固体触媒研究に関わる研究者の数は現在非常に多い。世代交代が進み、新たに教授になった世代にバイオマス研究をけん引する研究者が多く層が厚い。 ● リグニンの変換やバイオオイルなどに着目した研究も多く、分析が極めて大変な研究などにも対応できるような十分な支援が行われている印象を持っている。 ● EUによるイノベーションプログラム；HORIZON2020（2014~2020）でライフサイエンス・バイオ関連予算は€200億を予定。 ● 英国、合成生物学分野の研究開発に£60million以上を拠出⁵⁶⁾
	応用研究・開発	◎	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 熱化学変換（ガス化、燃焼）技術に関して言えば、他地域をリードする経験の蓄積があり、小型～大規模にわたるプロセス、プラント開発技術は世界をリードしている。上に述べた基礎研究の強みと同じ強みを産業界も有する。 ● 環境問題に対する意識が米国の企業と比較して根本的に高いこと、石油産業、石油化学産業の実力が高いことなどを踏まえても、着実な技術開発を行っている印象を持っている。 ● Novozymes（デンマーク）、BASF（独）、DSM（蘭）、Purac（蘭）等で酵素やバイオ化学品の実用化が拡大。 ● EUの2020年バイオ燃料計画（再生可能燃料10%添加）は遅れる見込み⁵⁷⁾。
中国	基礎研究	○	↑	<ul style="list-style-type: none"> ● 熱化学変換（触媒を含む）は、ガス化、燃焼、熱分解にいずれもアクティビティが高く、研究の質も着実に向上している。基礎研究からパイロット・実証研究への移行が他国に対して迅速である。 ● 従来から多い石炭転換利用の研究からのスムーズなシフトが見られ、研究人材は豊富である。微細藻類を始めとする生化学ベースのバイオマス研究は後発だが、活発化が顕著である。わが国よりもバイオマスポテンシャルが高く、政府の支援（大学へのState-key laboratoriesの設置、中国科学院に対する強力な資金サポート）がある。 ● バイオマス変換用の固体触媒研究に関わる研究者の数は現在非常に多い。世代交代が進み、新たに教授になった世代にバイオマス研究をけん引する研究者が多く層が厚い。 ● リグニンの変換やバイオオイルなどに着目した研究も多く、分析が極めて大変な研究などにも対応できるような十分な支援が行われている印象を持っている。 ● 現在の中国における固体触媒研究は非常にホットな領域であり、中国科学院の大連化学物理研究所を中心として、各大学でも極めて多くの研究者が固体触媒研究を行っている。合成ガス変換、光触媒、バイオマス変換等様々な分野で顕著な業績を挙げているといえる。 ● バイオマス変換に関する研究としては、フォローする研究が圧倒的に多い。とはいえ、オリジナリティの高い研究は相対的には多くないが、絶

				<p>対数としては決して無視できるものではなく、若いアクティブな教授がどんどん採用されていて、今後はよりオリジナリティの高い成果も増えていくことが想定される。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 2020年E10の実現に向けてジャガイモ残りかすを原料としたバイオエタノール製造技術をNEDOと共同で実証。非可食バイオマスエタノールに注力⁶²⁾
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 大学の基礎研究、ベンチスケール研究から企業（大学研究者が立ち上げるベンチャーを含む）における実証研究へのステップアップが迅速である。善し悪しはあるが、法規制などの緩さも手伝っていると考えられる。 ● リスクが大きな実証研究、商用化も政府等のファンディングのもと実施されているケースが少なくない。 ● 石炭を保有する背景をうけて、石炭の利活用を最重要視している（例えば、メタノール to オレフィン、Fischer Tropsch合成など）ことを受けて、バイオマス資源の利活用は、石炭と比較すると相対的に優先順位が下がっている。中国国内の研究者のシーズをかなり早い段階でパイロットなどへ展開する点では非常に積極的であるといえる。 ● 中国企業がバイオディーゼル燃料製造施設をフィンランドに建設（20万トン⁵⁸⁾。 ● セルロースエタノールやバイオポリマー工場の建設（Chemtex）⁵⁶⁾。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 国立研究所、大学において一定数の研究者が活動しているが、全体の規模は大きくなく、研究費の大幅な増額も見られない。 ● バイオディーゼルの新規燃料やセルロースエタノールを開発（第4次新・再生エネルギー基本計画）⁶⁴⁾。
	応用研究・開発	△	→	<ul style="list-style-type: none"> ● 独自の技術開発が組織的に進行しているエビデンスが明確でない。ガス化、燃焼に関してオリジナリティの高い技術はとくに見当たらない。 ● バイオディーゼル導入に優遇税制があるが、原料は廃油が中心。バイオエタノールの本格導入は未定⁵⁹⁾。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

(8) 参考文献

- 1) 俯瞰報告書：環境エネルギー分野、JST・研究開発戦略センター（2015）
- 2) NEDO 再生可能エネルギー技術白書（第2版）；第4章 バイオマスエネルギー（2013）
- 3) NEDO 非可食性植物由来化学品製造プロセス技術開発
- 4) NEDO 非可食性バイオマスを活用するスマート化学生産システムに関する調査（2016）
- 5) IEA Key World Energy Statistics 2015
- 6) 再生可能エネルギー各電源の導入の動向について．資源エネルギー庁、
http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/004/pdf/004_06.pdf（2017）
- 7) NEDO、http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100084.html
- 8) Cai, W., Liu, W. Performance of a commercial-scale biomass fast pyrolysis plant for bio-oil production. Fuel, 182, 677-686 (2016)
- 9) IEA Bioenergy Annual Report 2015,

- <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2016/03/IEA-Bioenergy-Annual-Report-2015.pdf> (2015)
- 10) NEDO、http://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201508/20150000000477.html
 - 11) 産業競争力懇談会 2011 年度 プロジェクト最終報告、<http://www.cocn.jp/thema38-L.pdf> (2012)
 - 12) バイオマスエネルギー技術研究開発 平成 28 年度実施方針 (2016)
<http://www.nedo.go.jp/content/100784411.pdf>
 - 13) Kajikawa and Sugimoto, Cost reduction potential of biofuel production from microalgae. 6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES) (2011)
 - 14) Gao, X., Yu, Y., Wu, H. ASC Sustainable Chem. Eng. 1, 1371-1380,
dx.doi.org/10.1021/sc4002406 (2013)
 - 15) Li, J., Liu, Y. et al. Biological potential of microalgae in China for biorefinery-based production of biofuels and high value compounds. New Biotechnol. 32, 588-595 (2015)
 - 16) Tan, C.H., Show, P.L. et al. Novel approaches of producing bioenergies from microalgae: A recent review. Biotechnol. Adv. 33, 1219-1227,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.02.013> (2015)
 - 17) Madugu, F. and Collu, M. Parametric Analysis for An Algal Oil Production Process. J. Energy Prod. & Mgmt., 1, 141-154 (2016)
 - 18) 米国のバイオエタノール政策 見直しの行方,
http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_rep/monthly/201504/pdf/20_monthly_topics_1504.pdf
 - 19) D. Humbird et al. NREL Technical Report NREL/TP-5100-47764, Process Design and Economics for Biochemical Conversion of Lignocellulosic Biomass to Ethanol: Dilute-Acid Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Stover (2011)
 - 20) 佐賀清崇ら. セルロース系エタノール生産における酵素回収プロセスの技術経済評価. 日本エネルギー学会誌, 34 (2013)
 - 21) バイオマスエネルギー技術研究開発/ セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業: 事後評価報告書、<http://www.nedo.go.jp/content/100564258.pdf> (2015)
 - 22) IEA Bioenergy Task 42: Integration of Advanced Biofuels in the Circular Economy: Identifying major innovation options (2016)
 - 23) Assessing Biorefineries Using Wood for the BioEconomy - Current Status and Future Perspective of IEA Bioenergy Task 42 Biorefining (2015)
 - 24) The “Biorefinery Fact Sheet” and its Application to Wood Based Biorefining - Case Studies of IEA Bioenergy Task 42 Biorefining (2015)
 - 25) The Possible Role of Biorefineries in a BioEconomy - Activities of IEA Bioenergy Task 42 Biorefining,
http://www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/upload_mm/9/d/f/995ea908-843b-4b25-85be-75cd3dc17fe9_Jungmeier%20Long%20Version_CEBC14.pdf
 - 26) Sustainable and synergetic processing of biomass into marketable food & feed ingredients, products (chemicals, materials) and energy (fuels, power, heat), IEA Bioenergy Task 42 (2014)

- 27) Sustainable Biomass Supply Chains for Biorefineries - IEA Task 42 Update, 4th Int. Forest Biorefinery Symposium, Montréal, QC (2014)
- 28) Hayashi, J.-i., Kudo, S. et al. Energy Fuels, 28, 4–21, dx.doi.org/10.1021/ef401617k (2014)
- 29) Oike, T., Kudo, S. et al. Energy Fuels, 28, 6407–6418, dx.doi.org/10.1021/ef5015296 (2014)
- 30) Top Value Added Chemicals from Biomass”, US Department of Energy, <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35523.pdf> (2014)
- 31) Bio-based Chemicals: Value Added Products from Biorefineries”, IEA Bioenergy – Task 42 Biorefinery, <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Task-42-Biobased-Chemicals-value-added-products-from-biorefineries.pdf> (2012)
- 32) From the Sugar Platform to biofuels and biochemical”, E4tech (UK) Ltd., <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/EC%20Sugar%20Platform%20final%20report.pdf> (2012)
- 33) Mignard, D. and Pritchard, C. On the use of electrolytic hydrogen from variable renewable energies for the enhanced conversion of biomass to fuels. Chem. Eng. Res. Des. 86, 473-487 (2008)
- 34) Claussen, S.R. Maximizing biofuel production in a thermochemical biorefinery by adding electrolytic hydrogen and by integrating torrefaction with entrained flow gasification. Energy, 85, 94-104 (2015)
- 35) バイオマスエネルギーの地域自立システム化実証事業（NEDO）
<http://www.nedo.go.jp/content/100758483.pdf> (2015)
- 36) Bai, L., Kudo, S. et al. Energy Fuels 28, 7133–7139, dx.doi.org/10.1021/ef501898h (2014)
- 37) サミット明星パワー株式会社 HP. <http://www.summit-myogyo-power.co.jp/index.html>
- 38) アジア・バイオマスエネルギー協力推進オフィス HP. <http://www.asiabiomass.jp/> 他
- 39) NEDO. 「戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業（実用化技術開発）バイオマス専用粉碎方式による既設微粉炭焚きボイラでの混焼技術の実用化開発」（2013年1月）
- 40) NEDO. 成果報告書詳細「平成23年度–平成24年度成果報告書バイオマスエネルギー技術研究開発戦略的次世代バイオマスエネルギー利用技術開発事業（実用化技術開発）石炭火力微粉炭ボイラに混焼可能な新規バイオマス固形燃料の研究開発」（2014年5月）.
- 41) 海外電力調査会. 各国の電力事情中国（2014年1月）.
http://www.jepic.or.jp/data/ele/ele_07.html
- 42) USDA. Joseph A. et al., The Asian Wood Pellet Markets. (2012年5月）.
- 43) 日本エネルギー学界. アジアバイオマスハンドブック. (2008年1月）.
- 44) 科学技術イノベーション総合戦略2016 <http://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2016.html>
- 45) Horizon 2020 の概要、 <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2013/FU/EU20140221.pdf>
- 46) 日本バイオ産業人会議「進化を続けるバイオ産業の社会貢献ビジョン」（2016年3月）
http://www.jba.or.jp/jabex/pdf/2016/JABEX_vision%28160509%29.pdf
- 47) NEDO. http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100118.html
- 48) 公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）. <https://www.rite.or.jp/>
- 49) Green Earth Institute 株式会社. <http://www.gei.co.jp/>

- 50) Araki et al. "M-path: A compass for navigating potential metabolic pathways" *Bioinformatics*, 31, no6 (2015): 905-11.
- 51) POET-DSM . <http://poet-dsm.com/liberty>
- 52) 『化学工業日報』2015年11月6日
- 53) 米国エネルギー省 (DOE) 「藻からのバイオ化学品やバイオ燃料を支援」
<http://energy.gov/eere/articles/energy-department-awards-18-million-develop-valuable-bioproducts-and-biofuels-algae>
- 54) Harry Yim et al. "Metabolic engineering of *Escherichia coli* for direct production of 1,4-butanediol" *Nature Chemical Biology* 7, (2011): 445-452.
- 55) 文部科学省研究開発局環境エネルギー課. バイオマス利活用施策の取組状況 (2012年2月) .
- 56) 米国農務省 (USDA)、<http://www.rd.usda.gov/>
- 57) 「バイオテクノロジー産業の新たな発展に向けた政策提言書」独立行政法人製品評価技術基盤機構. 2016年1月14日. <http://www.nite.go.jp/data/000077028.pdf>
- 58) EU の 2020 年バイオ燃料計画実現に警鐘.
http://www.biofpr.com/details/news/9633251/Weaknesses_in_certifying_sustainable_biofuels_could_undermine_EUs_2020_renewable.html
- 59) 中国企業が北欧でバイオマス原料の製造施設の建設計画
<https://www.rim-intelligence.co.jp/news/select/category/feature/article/600116>
- 60) 三菱総研 「平成 26 年度石油産業体制等調査研究」
http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2015fy/000795.pdf
- 61) Sun et al. (2016) Glycerol hydrogenolysis into useful C3 chemicals. *Appl. Catal. B* 193, 75-92
- 62) JST ALCA ホワイトバイオテクノロジー <http://www.jst.go.jp/alca/kadai.html#T03>
- 63) Miyazawa et al. (2006) Glycerol conversion in the aqueous solution under hydrogen over Ru/C+ an ion-exchange resin and its reaction mechanism. *J. Catal.* 240, 213-221
- 64) 日本-EU の共同研究プロジェクト JST-NOVACAM <http://novacam.eu/>
- 65) Nakagawa et al. (2010) Direct Hydrogenolysis of Glycerol into 1,3-Propanediol over Rhenium-modified Supported Iridium catalyst. *J. Catal.*, 272, 191-194
- 66) Arundhathi et al. (2013) Highly Selective Hydrogenolysis of Glycerol to 1,3-Propanediol over a Boehmite-Supported Platinum/Tungsten Catalyst. *ChemSusChem* 6, 1345-1347
- 67) Nakagawa et al. (2015) Catalytic Total Hydrodeoxygenation of Biomass-derived Poly-functionalized Substrates to Alkanes. *ChemSusChem* 8, 1114-1132
- 68) NSF Engineering Research Center for Biorenewable Chemicals (CBiRC), Iowa State University. <http://www.cbirc.iastate.edu/>
- 69) CatchBio project, Utrecht University, <http://www.catchbio.com/#>
- 70) FISCH project, KU Leuven, <http://www.fi-sch.be/nl/>
- 71) 中国科学アカデミー、大連化学物理研究所
http://sourcedb.dicp.cas.cn/yw/zjrck/200908/t20090820_2428112.html#
- 72) JST news June 2016. 農工連携でバイオマスの産業化に大転換. p.4-7

3.1.2 エネルギーシステム評価

（1）研究開発領域の簡潔な説明

エネルギーシステムは、社会における電気や石油など様々な形態のエネルギーの生産・配送・消費までの流れをシステムとして表したものである。エネルギーシステムを数理モデルとして計算プログラム化することで、経済合理性や環境適合性なども考慮に入れた、エネルギー技術選択や政策の有効性や妥当性の評価が可能になる。

（2）研究開発領域の詳細な説明と国内外の研究開発動向

[意義]

エネルギーシステムは、電気や石油などの様々なエネルギーと多数の変換プロセスで構成される複雑な物流系システムであるとともに、その構築には、多様な利害関係者の合意と莫大な投資を伴う公益性の高い社会インフラでもある。エネルギーに関する技術選択や政策立案は、世界的にも主要な政治的関心事となっており、科学的根拠に基づく透明性の高い議論の必要性が益々高まっている。特に我が国では、エネルギー安全保障、地球規模および地域規模の環境問題、経済性、更には安全安心といった社会受容性も含めた様々な観点からのエネルギーシステム評価が必要とされている。したがってエネルギーシステム評価における研究開発の目的は、このような世界や我が国のエネルギーシステムが直面する新たな課題対応のために、最新の情報処理技術に基づく数理モデルならびにデータベースの構築であり、加えて、それらを活用したエネルギー環境政策立案に資する具体的な指針や一般的な論理の導出である。なお、数理モデル構築の主な目的は、エネルギーシステムを定量的に評価することであるが、対象システムに対するモデル作成者や政策立案者の理解を深められることや、対象システムを認識するための共通の枠組みや議論のたたき台を提供できることも挙げられる。

[動向（歴史）]

エネルギーシステムを評価するためには技術と経済社会活動の相互作用をモデル化することが、工学モデルおよび経済モデル開発者に共通した課題である。エネルギーモデルの分類としては、将来こうなるだろうという予測型と、こうすべきだという規範型がある。またトップダウン型とボトムアップ型にも分類できる。トップダウン型は帰納的、経験的、マクロ的なモデルであり、過去のデータに回帰直線を引いたもの自体も一つのモデルになる。これは構築しやすいが、結果の解釈が難しいところがあり、過去に実績がないものは基本的には取り扱えない。計量経済や多部門一般均衡理論などの経済学的知見やデータに基づくモデルが多く、炭素税などの限界費用や国民経済上の負担の評価に向いている。一方、ボトムアップ型は、演繹的、合理的、ミクロ的で、多数の技術導入効果を積み上げるモデルである。例えばCO₂排出削減量とコストの関係を安価な技術から順に積み上げることでこの種のモデルを構築できる。これは、既知の技術を過大評価し、未知技術が欠落する傾向がある。大規模シミュレーションや最適化手法を用いた工学的プロセスに基づくモデルが多く、限界費用や個別政策の評価に適している。図 3-11 は代表的なエネルギーモデルの代表的な構造分類である。

工学的プロセス最適化型モデル

- ・ 線形計画法などによる最適化

応用一般均衡型モデル

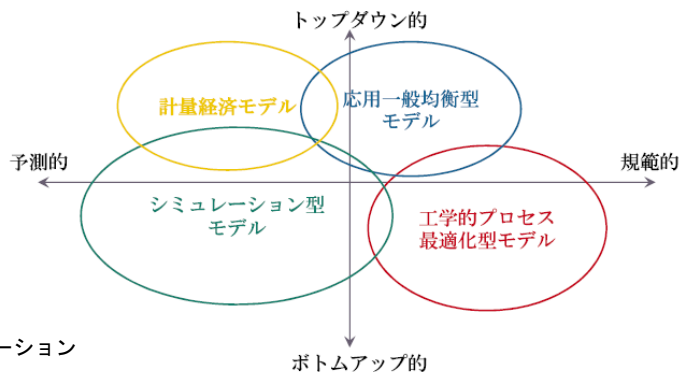
- ・ 家計や企業の最適化行動を想定した
多部門需給均衡

計量経済モデル

- ・ マクロ経済の統計データのトレンド

シミュレーション型モデル

- ・ フィードバック系の時間順方向のシミュレーション



出典：CRDS-FY2011-SP-07

図 3-11 エネルギーモデルの構造分類

最初の本格的なエネルギーモデルとしては、1960年代の後半にアメリカの原子力委員会が高速増殖炉の開発に使ったモデルが挙げられる。当時としては大規模な線形計画モデルであった。その後、オイルショックを経て、石油価格上昇の経済に与えるインパクトの分析や、エネルギー資源枯渇に備えた新供給技術の導入可能性の分析が70年代後半から80年代前半ぐらいにかけて盛んに行われた。この頃、オーストリアのIIASA (International Institute for Applied Systems Analysis)のMESSAGEモデルや、国際エネルギー機関(IEA)のMARKALモデルといった、現在のエネルギーモデルの原形となるものが出てきた。また、1976年にはスタンフォード大学にエネルギーモデルを比較検討し、研究する場としてEnergy Modeling Forum (EMF) ¹⁾が設立された。また、経済モデル (MACRO モデル) とリンクさせたMESSAGE-MACRO や MARKAL-MACRO が開発された。その後、地球温暖化対策と絡めたエネルギーモデルへと展開してきた。地球温暖化対策評価用モデルとしては、80年代の初めの米国 Pacific Northwest 国立研究所のEdmonds-Reillyモデル、その後、スタンフォード大学と米国の Electric Power Research Institute のMERGEモデル、我が国の国立環境研究所のAIMモデル (Asia Pacific Integrated Model)、旧通産省の地球再生計画の検討を目的とした東京大学と地球環境産業技術研究機構 (RITE) のDNE21モデルなどが知られている。これらは、コンピュータの発達とともに大規模化が進んでいる。

2008年秋に結成された中期目標検討委員会(内閣官房の地球温暖化問題に関する懇談会の分科会)では、わが国の2020年の温室効果ガス排出量に関する具体的な目標案の検討がなされた。そこでは、AIMモデルやDNE21+モデル(DNE21モデルの拡張モデル)などの国内の研究所や大学などの5つの組織が所有する複数のエネルギー経済モデルが、目標案検討のための数学的なツールとして政策決定の表舞台に現れ、6通りの排出目標案に対して、限界費用の大きさ、国民経済上の負担、具体的な個別政策の効果などの定量的な評価がなされた。

また、2014年4月に受諾されたIPCC(気候変動に関する政府間パネル)による第5次評価報告書(AR5)の第3作業部会報告書には、欧米や日本を中心とする34モデルの研究チームによる、1229シナリオ、9つのモデル比較プロジェクトの成果が反映されている。

（3）注目動向

[新たな技術動向]

発電部門に関しては、太陽光発電や風力発電という自然変動電源の大量導入時における電力システムにおける各種の電源（電力貯蔵も含む）の運用のモデル化が喫緊の課題となっており、実測された気象データに基づく時間解像度を高めた通年計算が採用される場合が増え、計算負荷が増大している。

スマートグリッドに関連する研究開発から、エネルギーの需要側の詳細なデータが得られつつあり、エネルギーシステムにおける消費者行動の新たなモデル化の可能性が出てきている。JST 戦略的創造推進事業（CREST）の「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」においてもエネルギーにおける消費者行動を含めた研究が進められている。

CO₂排出削減策の評価を目的としたエネルギーモデルの場合は、CO₂回収貯留（CCS）技術の現実的な社会経済的な導入障壁や技術的制約を考慮したモデル化も課題となっている。CCS は、大幅な CO₂ 排出量削減を実現するために世界全体での大規模な実施が考えられている一方で、その実施には貯留に伴う様々なリスクの発生や追加コストやエネルギー損失が伴うため、エネルギーシステム全体を考慮した包括的な評価が必要とされている。また、水素関連技術や電気自動車などの新技術の普及がエネルギーシステムに及ぼす影響の評価も関心を集める研究課題となっている。

この分野の特徴は、政策立案者側からの要請により、社会経済情勢、政治情勢の変化に応じて関心を集める研究テーマが変わることである。昨今では、米国のシェールガス・シェールオイル（タイトオイル）増産、電力自由化と自然変動電源の大量導入、2015 年末の COP21 での気候変動問題に関するパリ協定の影響評価などに関する研究が多い。

[注目すべきプロジェクト]

エネルギーシステム評価に関する著名なプロジェクトは、スタンフォード大学によって 1976 年に開始された EMF¹⁾である。現在も継続されており、欧米や日本からの複数のエネルギーモデルの計算結果の国際比較を中心とし、様々なテーマのワーキンググループが活動中である。主に米国エネルギー省の支援を受けているが、電気事業等のエネルギー産業も寄与している。EMF のテーマは幅広く、気候変動問題には限られない。

この他に、欧州委員会から研究資金を提供された国際的なプロジェクトがある。世界の主要な気候変動の統合評価を目的としたエネルギーモデルを対象として、ドイツの PIK（Potsdam Institute for Climate Impact Research）に IAMC(Integrated Assessment Modeling Consortium)²⁾が 2007 年に設立され、PIK が事務局となって欧州の研究機関や大学が参加している ADVANCE（Advanced Model Development and Validation for the Improved Analysis of Costs and Impacts of Mitigation Policies）プロジェクト³⁾が 2013～2017 年で、そしてフランスの IDDRI（The Institute for Sustainable Development and International Relations）が主催している MILES（Improve Modelling Capacity to Support Low Emission Development Strategies）プロジェクト⁴⁾が 2015～2016 年で実施されている。

（４）科学技術的課題

[課題（ボトルネック）]

自然科学であれば実験との比較でモデルの正しさを検証できるが、エネルギーモデルに関しては社会の将来予測や計画が目的であるため、自然科学のような検証作業を実施しにくい。従って専門家間のピアレビューを通じた、モデル内の各種想定（外生変数の値）や論理的整合性（方程式や不等式）などについての検証が中心となる。ただ、最終的にはモデルが意思決定者の扱っている問題に即しているか、その技術や政策のオプションの選択に役立つかが重要なため、意思決定者からのフィードバック、さらにモデルを調整するというようなやり取りが必要となる。複数のモデルを使ってレビューすることが、一つの重要なステップになりうる。

さらにはコンピュータが非常に発達した恩恵として、最近のモデルは非常に詳細化が可能になり、地域や部門、あるいは時間の刻みも非常に小さくとることができるようになった。しかし、モデルの詳細化やダウンスケーリングには功罪があり、モデルの構造は現実になっても社会経済データなどが本当に取得できるのかという問題などがある。

最適化型のエネルギーモデルの多くは線形計画法や二次計画法を用いた数理計画問題として定式化されているが、これらの計画法では、設備容量に関する規模の経済、量産による学習効果による単価の低減効果、火力発電所等の起動停止問題や部分負荷時の熱効率低下などの特殊な非線形効果を適切に考慮できない。これらの効果を厳密に評価するためには、混合整数解計画としての定式化が必要となるが、混合整数解計画の効率的な解法は、情報科学における計算量理論の観点からも確立は困難と判断され、変数の個数が少ない小規模なモデルにしか適用できていない。

[今後取組むべき研究テーマ]

研究テーマは以下４つに分類できる。

- 分類１：ボトムアップ型技術評価モデルの高度化
 - 水素利用、電気自動車、CCSなどの新規技術の社会経済的制約を考慮した定式化
 - 自然変動電源や電力貯蔵設備の評価のための時間分解能向上などのモデルの詳細化
 - エネルギー需要サイドのボトムアップアプローチによるモデル化
 - 環境研究との連携
- 分類２：トップダウン型経済モデルの高度化
 - 一般均衡の概念自身に関する問題点など、経済学そのもののフロンティア研究
 - 産業連関表の細分化、時系列データベースの整備
- 分類３：ボトムアップ型技術評価モデルとトップダウン型経済モデルの統合
 - エネルギー環境対策のための設備投資と国民経済との相互作用のメカニズム解明
 - 社会におけるエネルギー資源以外のレアメタルなどの各種物質のバランスの考慮
 - 時間・空間・経済部門分解能を大幅に高めた大規模エネルギー経済モデルの開発
- 分類４：短長期の様々な不確実性に対するレジリエンスの向上施策の評価
 - 震災や風水害などの自然災害に対するレジリエンスの向上施策の具体化
 - 石油や天然ガスの供給途絶に対するエネルギー安全保障施策の定量評価
 - 世界的な気候変動政策の強化など不確実な国際情勢を考慮した最適戦略の導出

- エネルギー関連の技術革新に関する不確実性の評価
- 分類 5：マルチエージェントシステムによる多主体競合のモデル化
 - 電力市場や CO₂ 排出市場の価格形成過程の分析や取引制度設計
 - OPEC の影響を考慮した石油の国際的市場価格のゲーム論的分析
 - 気候変動対策の国際交渉や国別排出目標のシミュレーション

（5）政策的課題

エネルギー環境政策は、原子力発電の是非や CO₂ 排出目標の水準など、多くの国で政治的な争点となっており、エネルギーシステム評価を実施する際には、政治的な中立性の確保が課題となることもある。

また、特に我が国では、研究成果を社会へ還元する場がまだ少なく、博士学位を有する研究者数も多くはない。企業や地方自治体などでのコンサルタント業務のニーズは高まっているように感じられ、活躍の場も徐々に広がっているように思われるが、若い研究者のキャリアパスは、政府関係の研究機関や大学などの少数のポストに限られている。

（6）キーワード

エネルギーシステム、エネルギーモデル、エネルギー政策、環境政策、エネルギー安全保障、技術評価、意思決定、エネルギー経済、線形計画法、計量経済学、一般均衡、システム工学、最適化、シミュレーション、気候変動、電力システム、レジリエンス、マルチエージェント

（7）国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<p>国立環境研究所は近年、AIMモデルの需要サイドの技術の詳細化を実施している。既往のAIM(CGGE)モデルでは、取り扱っている技術の種類の拡張を実施しており、家庭部門をはじめとするエンドユース技術のモデリングの詳細化を行っている⁵⁾。同じくAIM(end-use)では、電気自動車や燃料電池自動車等のクリーンエネルギー自動車のモデリングの詳細化を行い、その結果、日本の運輸部門の二酸化炭素排出量を1990年比で81%削減可能との分析結果を報告している⁶⁾。</p> <p>日本原子力研究開発機構がDNE21とGTAP(応用一般均衡モデル)をリンクした統合モデルに、新たに高速炉を考慮して、同技術の普及可能性を分析している⁷⁾。高速炉中の中性子照射による核燃料の特性の変化もORIGENコードによる分析結果を踏まえ、詳細に考慮している。</p> <p>再生可能エネルギーの大量導入が期待される中で、発電不安定性を解消のため電力貯蔵、出力調整運用などを考慮した評価モデルの必要性が高まっている。東京大学藤井研究室では電力需給モデルとして地理的・時間的な解像度を高めたモデルを開発しており、全国200地点、年間10分間隔の時間的解像度の線形計画法による最適化モデルである。これにより超高速な計算処理能力が要求されるものの、太陽光、風力発電を大量導入した場合の電源構成や送電線のあり方を解析可能である。</p>
	応用研究・開発	○	→	<p>RITEがDNE21+モデルを用いて二酸化炭素排出制約の影響評価を実施している。近年の研究結果では、二酸化炭素排出削減は、米国や欧州についてはエネルギーセキュリティに与える影響は軽微であるが、アジアではガスへの燃料転換が進みガス輸入量の増加を招くため、エネルギー自給率</p>

			<p>を悪化させる可能性が報告されている⁸⁾。また2100年の気温上昇を2度以内に抑制するため大気中GHG濃度450ppmを達成するためには、炭素価格645ドル/トンが必要であるとの研究結果が報告されている⁹⁾。</p> <p>東京理科大学では、MARIAモデルを用いて、福島原発事故を踏まえ、世界的な原子力依存度の低下がエネルギー市場や二酸化炭素排出量に与える影響や、原子力の代替技術として、CCSやバイオエネルギーの導入可能性に関して分析が実施されている¹⁰⁾。</p> <p>最近の分析例としては、COP21で議論される2030年以降の排出削減目標（約束草案（INDC））についてAIM/Enduse、AIM/CGEによる評価や、政府の長期需給見通しに先駆けてエネ研が行ったエネルギーベストミックスに関する定量評価（2015年1月）などがある。</p>
米国	基礎研究	◎	<p>PNNL(Pacific Northwest National Laboratory)が開発したGCAMモデルにおいて、考慮する技術の詳細化やエネルギー以外の分野、例えば、水利用や大気汚染物質(SOx,NOx)の評価機能の追加等が行われている。運輸部門ではバイオ燃料、電気自動車、水素燃料電池自動車等新たに詳細に考慮されている¹¹⁾。また、水利用のメカニズムをGCAMモデルに組み込んだ統合的分析により、長期的に中東やインドでの水不足の深刻化が懸念され、エネルギー分野での水利用の高効率化技術の導入が重要との結果が報告されている¹²⁾。さらに、GCAMモデルにSOx, NOx等の大気汚染抑制政策の評価機能を付加した上で、温室効果ガス排出削減政策のコベネフィット分析を行い、大気汚染物質削減にはそれらの直接削減技術と非化石エネルギーのベストミックス構築が費用対効果の面から適切であるとの結果が報告されている¹³⁾。</p> <p>MITが開発したEPPAモデルでは、バイオエネルギー技術(電力、熱利用)が新たに詳細に組込まれ、次世代バイオ燃料製造技術や土地利用が新たに考慮された。土地利用の変化によるGHG間接排出量の考慮の有無が、森林伐採パターンの結果に与える影響が大きいとの結果が報告されている¹⁴⁾。</p>
	応用研究・開発	◎	<p>エネルギー省エネルギー情報局(EIA)の長期を対象とする世界エネルギー需給見通しとして、International Energy Outlook(IEO)があり、World Energy Projection System Plus (WEPS+)が用いられている。これは、各部門のエネルギーモデル間で消費量、価格が均衡するように反復・収束させる統合システムである。</p> <p>PNNLのGCAMモデルでは、2100年の気温上昇を2度以内に抑制するための長期的な温室効果ガス排出削減には、再エネ、CCS、原子力の役割が大きいとの結果が示されている¹⁵⁾。</p> <p>MITのEPPAモデルでは、各国の温室効果ガス排出量の約束草案における目標値がエネルギー需給に与える影響評価も実施されている。例えば、将来、エネルギー需要増加が見込まれる中南米に着目した分析を行い、ブラジルでは約束草案がGHG削減費用の安い森林伐採パターン、メキシコではGDP損失、さらに中南米のエネルギー貿易(バイオ燃料、石油、ガス)に与える影響が大きいことが報告されている¹⁶⁾。</p> <p>また米国内で開発された代表的なエネルギーモデルGCAM、EPPA、MERGE(スタンフォード大学)間での分析結果の比較検討も行われており、モデルで考慮している低炭素技術の種類、最適手法(動学的最適化、逐次最適化)等がモデル間で異なる点が、結果の違い(エネルギー供給量当たりの二酸化炭素排出量等)に影響を与えているとの分析が報告されている¹⁷⁾。</p> <p>MARKALモデルとGTAPモデル(土地利用データの活用)を併用して、米国でのバイオ燃料導入可能性分析も行われており、2030年までは供給面から見て持続的なバイオ燃料供給が可能との分析結果が報告されている¹⁸⁾。</p>
欧州	基礎研究	◎	<p>イタリアの研究所FEEM(Fondazione Eni Enrico Mattei)が開発したWITCHモデルでは、二酸化炭素排出削減策としての国際的な大規模植林を技術オプションとして新たに考慮し¹⁹⁾、さらに、運輸部門の技術の詳細化(電気自動車や水素燃料電池自動車等の考慮)が行われている²⁰⁾。</p> <p>オーストリアのIIASAが開発したMESSAGEモデルでは、技術普及に伴う学習効果も内生的にモデル化した上で技術の普及過程を分析した結果、太陽光発電は政策支援無しでも導入拡大する可能性や、CCS付きバイオマス発電(BECCS: Bio-Energy with Carbon Capture and Storage)の普及は進まない等の分析が報告されている²¹⁾。</p> <p>ETH Zurichでは、GTAPのデータベースを用いた上で、欧州の送電網と再生可能エネルギーを考慮した応用一般均衡モデルを構築し、送電線増強が効果的な再エネ電力拡大に貢献するとの結果が報告されている²²⁾。</p> <p>GTAP-E(応用一般均衡モデル)を用いて、国際的なカーボンリーケージに関する分析が実施されており、カーボンリーケージ回避には地域的取組よりも全世界的な取組が必要であるとの結果が報告されている²³⁾。</p> <p>国際エネルギー機関(IEA)ETSAP(Energy Technology Systems Analysis Program)が開発したTIAMモデルは国際的に広く活用されてお</p>

			<p>り、最近では鉄鋼生産技術を詳細にモデル化した上で、鉄鋼部門の二酸化炭素排出削減には水素還元製鉄技術の役割が大きく、また、二酸化炭素限界削減費用が500ドル/トンであれば鉄鋼部門でのCCS導入が経済合理性をもつとの結果が報告されている²⁴。</p> <p>イギリスUniversity College LondonのTIAM-UCL(TIAMは元々IEAが開発した世界モデル)では、技術の習熟効果を内生的に考慮した上で自動車部門の技術の詳細化を行い、同部門では水素燃料電池自動車と電気自動車普及が脱炭素化に有効であるが、長期的には水素と電気が競合する可能性があるとの分析が報告されている²⁵。</p>	
	応用研究・開発	◎	↑	<p>欧州委員会(EC)は、複数のモデル群により気候変動問題を分析している(例えば、2030年の気候変動・エネルギーの枠組みへの影響を分析したEuropean Commission, 2014)。GHGの排出のモデルとして、PRIMES(エネルギー需給とエネルギー起源CO₂排出)、GAINS(CH₄、N₂O、フッ素系温室効果ガス)、GLOBIOM-G4M(土地利用・土地利用変化及び林業(LULUCF)からのCO₂排出)、大気汚染物質としてGAINS(SO₂、NO_x、PM_{2.5}-PM₁₀、地表のオゾン、揮発性有機化合物(VOC)、NH₃)があり、シナリオ作成において整合性を確保するために、互いにリンクされている。</p> <p>ドイツの研究所(Potsdam Institute)のREMINDモデルでは、様々な気候変動政策等のシナリオが二酸化炭素排出パスやエネルギー需給に与える影響に関して分析が行われている。近年では、国際的な気候変動対策(各国の政策実施)が15年程度遅れた場合、2100年で0.4度の気温上昇を引起し、CCS利用が国際的に利用不可能となった場合は、0.3度の気温上昇リスクがあるとの分析が報告されている²⁶。また、気候変動対策としての省エネ、燃料転換、新技術普及等を効果的に促進するために必要な炭素税率に関しても様々なシナリオの下で分析が実施されている²⁷。</p> <p>またTIAMモデルを用いて、シェールガス生産が国際エネルギー需給に与える影響評価²⁸や、欧州のエネルギー安全保障に関する分析²⁹が行われている。また、割引率に関する感度分析が行われ、割引率を低く設定した場合、将来にわたる再エネの役割が大きくなる等、資本集約型技術の普及に影響を与える結果が得られている³⁰。</p> <p>フランスMINES ParisTechのTIAM-FRモデルでは、発電部門でのCCS付きバイオマス発電(BECCS: Bio-Energy with Carbon Capture and Storage)の導入可能性分析を行い、BECCSの利用可能性が二酸化炭素限界削減費用に大きく影響する結果が報告されている³¹。またCCSに着目した分析も実施しており、欧州では原子力依存度が低下するため特に原子力代替としての温室効果ガス削減策としてCCSが重要な役割を担い、CCS利用が見込めない場合は二酸化炭素限界削減費用が大きく上昇するとの分析が報告されている³²。</p>
中国	基礎研究	○	↑	<p>中国では、IEA-ETSAPが元々開発したMARKALモデルやTIMESモデルを活用した分析を清華大学等が主として実施している。既存のMARKALモデルにおける民生部門のエンドユース技術や再生可能エネルギー技術の詳細化³³や、TIMESモデルのセメント製造部門の技術を詳細化し、炭素税課税により、同部門では短期的には省エネ推進、長期的には燃料転換技術、高効率技術、CCS導入が進むとの結果が報告されている³⁴。また、TIMESモデルに水利用モデルを追加した上で、二酸化炭素排出制約により発電部門の水消費量も削減できるといった低炭素化のコベネフィットが存在し、さらに発電所の水利用にも制約がかかれば、再エネ技術が競争力を持つとの結果が示されている³⁵。</p> <p>北京理工大学では包絡分析法(DEA : Data Envelopment Analysis)を用いて7地域でのパイロット実験中の排出枠取引市場(ETS)の有効性を確認した(Wang K.et. al., 2015)。また資源最適化(resource optimal allocation)分析により、2017~2020年において、ETSの全国導入によって、工業部門のCO₂削減コストを35~40%低減できる等の結果を得た(北京理工大学、2016)。中国科学院大学等がRegional Energy Economy Carbon model(REEC)を開発し、ETSと炭素税の効果について、大半の地域でETSが炭素税より効率的であるが、全国レベルでは両者の差がほぼないこと、長期的には炭素税が優れること、両者以外に補助金やR&D投資等の対策も必要等の結論が報告されている(Hongbo Duan, et. al., 2016)。一方、清華大学は交通需要モデル、自動車燃料供給モデルと統合最適化モデルからなるTsinghua China Automotive Energy Model(TCAEM)を構築し、次世代自動車をも含む2050年までのシナリオ分析を行った(China Automotive Energy Research Centre of Tsinghua University, 2013)。</p>
	応用研究・開発	○	↑	<p>MARKALモデルとCGEモデルとの統合(ソフトリンク)を行い、二酸化炭素削減策が中国のエネルギー需給見通しや部門別の生産額へ与える影響に関して分析が行われている³⁶。また二酸化炭素排出制約下での中国におけるCCS導入可能性を分析し、2025年以降、CCSが経済合理性をもち、導入</p>

				<p>が開始されるとの結果が報告されている³⁷⁾。 COP21や「第13次5カ年計画」作成に合わせた低炭素社会構築に関する統合モデルによる分析が盛んである。代表例として中国能源研究所（ERI）主導の共同研究グループが行った再エネ高比率シナリオ分析とロードマップ研究がある（ERI, 2015）。それによりシナリオ分析を行い、中国が2050年に再エネが一次エネルギー消費の60%、発電電力量の85%を目指すべき等の政策提言を纏めた。関連して、例えば、CO₂排出量の2025年頃のピークアウトが可能であること、再エネ電力拡大による電力不安定性問題を解決するために、超高压送電網整備や、ガス火力を2.2億kWへ、揚水水力を1.4億kWへ拡大するほか、BEV導入拡大を主とする1.6億kWの蓄電池の活用も必要等の結果が示されている。</p>
韓国	基礎研究	○	→	<p>IEA-ETSAPが元々開発したMARKALモデルやTIMESモデルを活用した分析が行われており、MARKALモデルと自動車普及モデルを統合することで、クリーンエネルギー自動車の普及可能性が分析されている³⁸⁾。</p>
	応用研究・開発	○	→	<p>TIMESモデルを用いて、2012年に韓国で施行されたRPS制度に関する分析を実施し、同制度の下で特にコスト競争力が高いPV導入が拡大し、風力発電もコスト低下が進めば電力コストを抑制するとの分析結果が報告されている³⁹⁾。またモデルEnergyPlanを用いて、韓国の電力部門の低炭素化の可能性を分析し、風力発電の導入拡大が、経済性、エネルギーセキュリティ、環境性から望ましいとの結果が報告されている⁴⁰⁾。</p>

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

(註2) 現状 ※わが国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価である。

◎ 特に顕著な活動・成果が見えている、○ 顕著な活動・成果が見えている

△ 顕著な活動・成果が見えていない、× 活動・成果がほとんど見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

(8) 参考文献

- CRDS 戦略プロポーザル「エネルギー政策のための科学：技術・経済モデルの研究開発」
CRDS-FY2011-SP-07
- CRDS ワークショップ報告書「豊かな持続性社会構築のためのエネルギーモデル」
CRDS-FY2011-WR-11
- 1) EMF ホームページ <https://emf.stanford.edu/>
- 2) IAMC ホームページ <http://www.globalchange.umd.edu/iamc/>
- 3) ADVANCE ホームページ <http://www.fp7-advance.eu/>
- 4) MILES ホームページ
[http://www.iddri.org/Projets/MILES-\(Modelling-and-Informing-Low-Emission-Strategies\)](http://www.iddri.org/Projets/MILES-(Modelling-and-Informing-Low-Emission-Strategies))
- 5) Fujimori, S. et. al. Development of a global computable general equilibrium model coupled with detailed energy end-use technology, Applied Energy, Volume 128, Pages 296-306, 2014
- 6) Oshiro, K. et. al. Diffusion of low emission vehicles and their impact on CO₂ emission reduction in Japan, Energy Policy, Volume 81, Pages 215-225, 2015
- 7) Mukaida, K. et. al. The Effect Assessment for Fast Reactor Fuel Cycle Deployment-improvement of the Assessment Method, Energy Procedia, Volume 39, Pages 43-51, 2013
- 8) Oda, J. et. al. Analysis of CCS Impact on Asian Energy Security, Energy Procedia, Volume 37, Pages 7565-7572, 2013

- 9) Sano, F. et. al. Assessments of GHG emission reduction scenarios of different levels and different short-term pledges through macro- and sectoral decomposition analyses, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 90, Part A, Pages 153-165, 2015
- 10) Mori, S. et. al. CCS, Nuclear Power and Biomass An Assessment of Option Triangle under Global Warming Mitigation Policy by an Integrated Assessment Model MARIA-23, *Energy Procedia*, Volume 37, Pages 7474-7483, 2013
- 11) Yin, X. et. al. China's transportation energy consumption and CO2 emissions from a global perspective, *Energy Policy*, Volume 82, Pages 233-248, 2015
- 12) Hejazi, M. et. al. Long-term global water projections using six socioeconomic scenarios in an integrated assessment modeling framework, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 81, Pages 205-226, 2014
- 13) Wang, L. et.al. Win-Win strategies to promote air pollutant control policies and non-fossil energy target regulation in China, *Applied Energy*, Volume 163, Pages 244-253, 2016
- 14) Winchester, N. et. al. The feasibility, costs, and environmental implications of large-scale biomass energy, *Energy Economics*, Volume 51, Pages 188-203, 2015
- 15) Pan, X. et. al. Energy Transition within a Carbon Constrained World: How Allocation Schemes Influence the Development of Energy System in the Future, *Energy Procedia*, Volume 61, Pages 1310-1313, 2014
- 16) Octaviano, C. et. al., Climate change policy in Brazil and Mexico: Results from the MIT EPPA model, *Energy Economics*, Volume 56, Pages 600-614, 2016
- 17) Wilkerson, J. T. et. al. Comparison of integrated assessment models: Carbon price impacts on U.S. energy. *Energy Policy*. Volume 76, Pages 18-31, 2015
- 18) Sarica, K. et. al. Analysis of US renewable fuels policies using a modified MARKAL model, *Renewable Energy*, Volume 50, Pages 701-709, 2013
- 19) Favero A. et. al. Using Markets for Woody Biomass Energy to Sequester Carbon in Forests, *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists* 1(1/2), Pages 75-95, 2014
- 20) Pietzcker, R. et. al. Long-term transport energy demand and climate policy: Alternative visions on Transport Decarbonization in Energy-Economy Models, *Energy*, Volume 64, Pages 95-108, 2014
- 21) Leibowicz, B. et. al. Representing spatial technology diffusion in an energy system optimization model, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 103, Pages 350-363, 2016
- 22) Abrell, J. et. al. Cross-country electricity trade, renewable energy and European transmission infrastructure policy, *Journal of Environmental Economics and Management*, Volume 79, Pages 87-113, 2016
- 23) Antimiani, A. et. al. Assessing alternative solutions to carbon leakage, *Energy Economics*, Volume 36, Pages 299-311, 2013
- 24) Morfeldta, J. et. al. The impact of climate targets on future steel production – an analysis based on a global energy system model, *Journal of Cleaner Production*, Volume 103, Pages 469-482, 2015

- 25) Anandarajah, G. et. al. Decarbonising road transport with hydrogen and electricity: Long term global technology learning scenarios, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 38, Issue 8, Pages 3419-3432, 2013
- 26) Luderer G. et. al. Economic mitigation challenges: how further delay closes the door for achieving climate targets. *Environ Res Lett* 8:034033, 2013
- 27) Bertram C et. al. Complementing carbon prices with technology policies to keep climate targets within reach. *Nature Clim Change* 5, Pages 235–239, 2015
- 28) Gracceva, F. et. al. Exploring the uncertainty around potential shale gas development - A global energy system analysis based on TIAM (TIMES Integrated Assessment Model), *Energy*, Volume 57, Pages 443-457, 2013
- 29) Gracceva, F. et. al. A systemic approach to assessing energy security in a low-carbon EU energy system, *Applied Energy*, Volume 123, Pages 335-348, 2014
- 30) García-Gusano, D. et. al. The role of the discount rates in energy systems optimisation models, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 59, Pages 56-72, 2016
- 31) Selosse, S. et. al. Achieving negative emissions with BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) in the power sector: New insights from the TIAM-FR (TIMES Integrated Assessment Model France) model, *Energy*, Volume 76, Pages 967-975, 2014
- 32) Selosse, S. et. al. Fukushima's impact on the European power sector: The key role of CCS technologies, *Energy Economics*, Volume 39, Pages 305-312, 2013
- 33) Shi, J. et. al. Modelling building's decarbonization with application of China TIMES model, *Applied Energy*, Volume 162, Pages 1303-1312, 2016
- 34) Li, N. et. al. Quantifying the impacts of decarbonisation in China's cement sector: A perspective from an integrated assessment approach, *Applied Energy*, In Press, Corrected Proof, 2016
- 35) Huang, W. et. al. Connecting water and energy: Assessing the impacts of carbon and water constraints on China's power sector, *Applied Energy*, In Press, Corrected Proof, 2016
- 36) Liu, G. et. al. A Predictive Analysis of China's Energy Security Based on Supply Chain Theory, *Energy Procedia*, Volume 61, Pages 184-189, 2014
- 37) Weilong, H. et. al. Prospective Scenarios of CCS Implementation in China's Power Sector: An Analysis with China TIMES, *Energy Procedia*, Volume 61, Pages 937-940, 2014
- 38) Lee, D. H. et. al. Analysis of the energy and environmental effects of green car deployment by an integrating energy system model with a forecasting model, *Applied Energy*, Volume 103, Pages 306-316, 2013
- 39) Park, S. Y. et. al. An analysis of the optimum renewable energy portfolio using the bottom-up model: Focusing on the electricity generation sector in South Korea, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 53, Pages 319-329, 2016
- 40) Cho, S. et al. Feasibility and impact analysis of a renewable energy source (RES)-based energy system in Korea, *Energy*, Volume 85, Pages 317-328, 2015