



ムーンショット型研究開発事業  
新たな目標検討のためのビジョン策定

「電解をコアテクノロジーとした集積化可能な  
パーソナルグリッド(PG)の実現に関する調査研究」  
調査研究報告書

令和3年7月

目標検討チーム「電解パーソナルグリッドチーム」

チームリーダー：長澤 兼作（横浜国立大学 先端科学高等研究院 特任教員（准教授））  
サブリーダー：才田 隆広（名城大学 理工学部 准教授）  
チームメンバー：加藤 優（北海道大学 大学院地球環境科学研究所 准教授）  
滝本 大裕（琉球大学 理学部 海洋自然科学科 化学系 助教）  
八木 裕之（横浜国立大学 大学院国際社会科学研究所 教授）  
山口 清（リコージャパン株式会社 産業ソリューション事業本部  
コンサルタント）

## 目次

### I. MS 目標案のコンセプト

1. MS 目標案
  - 1.1 MS 目標案の名称
  - 1.2 実現したい 2050 年の社会像
2. Targets
3. 当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等
  - 3.1 当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが、今必要である理由
  - 3.2 目標達成の社会的意義
  - 3.3 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要
4. 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

### II. 統計・俯瞰的分析

1. 当該 MS 目標を達成するための課題（科学技術的・社会的課題）や必要な取組
2. 当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰
3. 当該目標に関連する研究開発の動向（全体）、海外動向及び日本の強み

### III. 社会像実現に向けたシナリオ

1. 挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題
2. 2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標（マイルストーン）、マイルストーン達成に向けた研究開発
3. 目標達成に向けた国際連携の在り方
4. 目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方
5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)

### IV. 結論

### V. 参考文献

## I. 提案する MS 目標案のコンセプト

### 1. MS 目標案

#### 1.1 MS 目標案の名称

「2050 年までに、全ての人がエネルギー・物質・水をパーソナルに循環させる自立型生活空間を得られる社会を実現」

#### 1.2 実現したい 2050 年の社会像

2050 年までに、住む土地に関係なく全ての人が、生きていく上で必要十分なエネルギー・物質・水を生活空間単位で循環させる社会が実現する。これまで、エネルギー・物質・水は、大規模なインフラを経由して各生活空間に提供されてきた。このインフラ網を各生活空間レベルにまで落とし込むことで、全ての人が好むべき場所・土地に生活の拠点を置くことが可能となる。具体的には、①エネルギー循環に再生可能エネルギーを完全に取り入れることで生活空間からの CO<sub>2</sub> 量を激減させ、②物質循環として高分子材料の分解から重合・成形まで行うことでプラスチックゴミの排出を無くすだけでなく、アミノ酸合成技術を用いたフェイクミートの作製まで可能とし、③水の循環により何処でも安全な飲み水を確保し、生活空間毎に適切な排水処理も可能とする。この 3 つの循環を各生活空間で保持することは、既存のインフラ網への依存度を劇的に引き下げ、自然災害や人的災害によるライフラインへの影響も最小限に抑えることが出来る。また、生活空間単位で閉鎖系を構築することが可能なため、COVID-19 のようなパンデミックにも強い社会を構築することが出来る。

一方、2050 年には、他のムーンショット目標にあるようにデジタル空間および AI・ロボットを利用した多様なライフスタイルが実現すると予想される。このため、デジタル空間だけでなく現実世界においても多様な環境に身を置くことが可能になると、これまでと異なった価値観により生み出される新たな文化が創出される。

生きていく上で必要十分なエネルギー・物質・水の循環を生活空間単位で実現するシステムが“パーソナルグリッド(PG)”であり、PG が浸透した 2050 年の社会で人々はデジタル空間だけでなく現実世界においても好きな土地で生活し、より多様な価値観からなる新たな文化を場所に捕らわれず全世界に対して発信することになる。

エネルギー・物質・水をパーソナルに循環させる  
自立型生活空間を得られる社会を実現

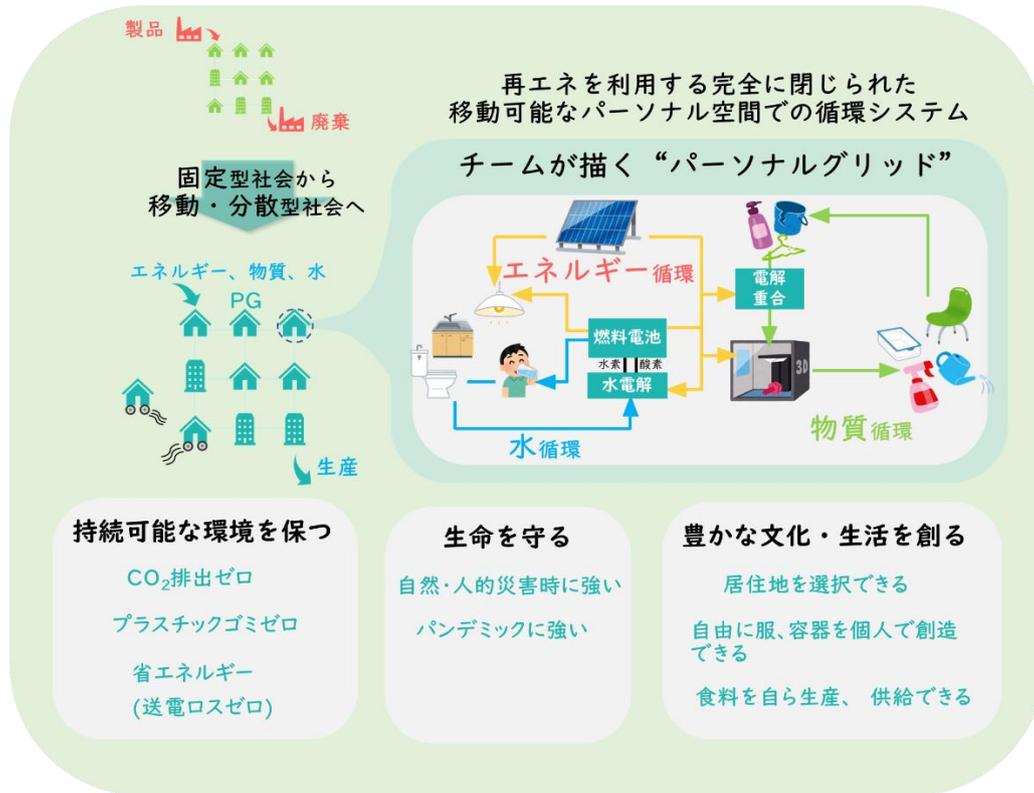


図1 2050年の社会像

2. Targets (当該 MS 目標の達成シーン。2050 年 (及び 2030 年) に何が実現しているか)

2050 年には、PG の根幹となるエネルギー・物質・水からなる 3 つの循環が生活空間毎に構築されている。以下に、対象となる循環毎に具体例と達成目標を記載する。

① エネルギー循環

2050 年までに、基本的な生活に必要なエネルギーを生活空間毎に再生可能エネルギーや燃料電池にて発電し、家庭用の蓄電池との併用によりエネルギー需要の変化に柔軟に対応できるシステムの構築を目指す。これは、既存の電力流通に対する大きな変革を伴うため、現在のように“外部から電気を買う”という行為が無くなる可能性がある。

各生活空間でのエネルギー需要を集約し、最適化するシステムは、既に Home Energy Management System (HEMS) として確立されており、平成 24 年「グリーン政策大綱」(内閣府官房 国家戦略室) に従い 2030 年までに日本国内の全生活空間に HEMS を設置することを目指している。したがって、生活空間単位でのエネルギーバランスを行う HEMS は構築されており、ICT 技術の社会への発展により 2050 年には更なるアップデートされていると考えられる。HEMS における発電は、太陽光発電を主体とする再生可能エネルギーや燃料電池が担う。どちらの発電技術も (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構から 2050

年を目指した国家プロジェクトが実施されており、発電量の増加や低コスト化、長寿命化などが検討されている。また、燃料電池用の燃料である水素の貯蔵技術についても議論が進められている。加えて、蓄電技術に関しても同様に国家プロジェクトとして低コストかつ高エネルギー密度かつ高出力密度な革新電池の開発が行われている。更に燃料電池の発電を下支えする電解技術についても国家プロジェクトが実施されている。したがって、2050年に各生活空間でエネルギーを循環する要素技術は、他の国家プロジェクトの成果を享受することで実現できると考えられる。

中間目標として2030年までに、太陽発電における発電コストを7円/kWh、実用モジュールの変換効率を25%とし、燃料電池の発電性能を6kW/L、システムコストを4,000円/kW以下に到達することを目標とする。また、同時に二次電池は500Wh/kgおよび15年以上の長寿命化が求められる。加えて、再生可能エネルギーを優遇価格で買い取る固定価格買取制度などの制度改正も必須である。これらの中間目標を達成すると各生活空間にHEMSが実装されると予想される。

## ②物質循環

2050年までに、生活に最低限必要な衣料品およびプラスチック材料のリサイクルや、アミノ酸合成からなるフェイクミートの作製および農作物の生産が各生活空間で可能となる。このため、家庭からプラスチックゴミの排出を無くし、必要最低限の衣料品や生活雑貨を3Dプリンターにて製造し、フェイクミートや農作物を自ら生産する生活が実現する。

現在でもプラスチックゴミのリサイクルが行われており、PET樹脂に対しては製品であるポリマーから原料のモノマーに戻し再利用する技術が確立されている。このため、2050年までにPET樹脂にこだわらずポリマーからモノマーへと分解する新規材料およびその循環技術の確立が期待される。また、電解技術を利用したアミノ酸合成技術などの検討も始められており、人工的なフェイクミート合成も不可能ではない。3Dプリンターを用いた衣食の製造も既に検討が進められており、2050年には各生活空間で使用できる規模にまでの技術革新が期待される。加えて、屋内で農作物を生育させる技術は確立している。しかし、閉鎖系を念頭におくと肥料となるアンモニアの合成や、有機廃棄物(生ごみや排泄物)のバイオマス利用が必須である。このため、2050年に物質循環を実現するには、既存のアンモニア合成およびバイオマス利用技術の劇的な省エネルギー化および小規模化に向けた検討が必要である。

中間目標として2030年までに、PET樹脂以外のポリマーをモノマーまで分解する技術の確立を目指す。また、電解技術を利用したアミノ酸合成技術の確立を目指す。更に、小規模でのアンモニア合成技術の確立も目指す。

## ③水循環

2050年には、何処でも全ての人が安全な飲み水を確保することができ、適切な排水処理と水の各生活空間単位で実施することが可能となる。このため、水を生活空間単位で循環することにより、居住地の環境に依らず飲料水が確保でき、汚水を含む生活排水を無くすこと

が可能となる。

現在、安全な飲料水を海水や下水から得る技術として、海外水循環ソリューション技術研究組合が、海淡・下水再利用統合システムを開発し海外での実証事業を開始している。ただし、このシステムは大規模設備を想定しており、各生活空間単位までスケールダウンする必要がある。また、小型の水循環システムの例としては、国際宇宙ステーションに搭載されている水再生システムも挙げられる。この水再生システムでは約 18 L/day であり、現在検討が進められている次世代小型水再生システムは約 1 L/day である。また、飲料水は、周辺環境から得る汚水等の水再生以外にもエネルギー循環領域で使用している燃料電池から生成される水も利用することができる。したがって、2050 年には、各生活空間規模の小型水循環システムが構築されていると期待される。

中間目標として、2030 年までに海水やし尿を含む生活排水から 100 L/day の飲料水を生成できる水循環システムの確立を目指す。また、他循環との協働分野として、海水や有機廃棄物からの直接電解による水素製造技術の確立も目指す。

2050 年までに、PG を社会実装するためには、上記 3 つの循環が密接に連携し相互に情報を伝達し合う次世代 HEMS の開発が必須である。

### 3.当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等

#### 3.1 当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが今必要である理由

現在検討が進められているムーンショット目標 1~7 が実現した 2050 年の社会では、デジタル空間や AI・ロボット技術の発展により雇用形態を含むライフスタイルが変化し、超早期医療および遠隔地医療などの実現による健康寿命が更に続伸、環境調和型の持続的な資源循環や新たな食料供給が実現し、これらを下支えする汎用量子コンピュータが開発されている。このため、2050 年には既存の価値観から大きく変化していると考えられる。しかし、既存のムーンショット目標が達成されたとしても、人々が居住する場所は主に都市部と予想されるため自然および人為的災害に弱く、COVID-19 のようなパンデミックに脆弱であり、様々な面における地域格差が生まれやすい現状を大きく変えることはない。

興味深いことに、主要な居住地は、最初に都市が形成された時から現代まで大きく変化していない。事実、人類最古の文明と言われるシュメルの都市国家があった場所には、現在も人々が生活を送っており、エジプトの三大ピラミッド付近にも依然として人々は住んでいる。これは、各時代において都市には様々なインフラ設備が整備されているため、生活を営む上で利便性が高いことに一因がある。特に、当たり前になっている物流も含む物質や水を供給するインフラ設備は、生きていく上で必須であり、潜在的に土地に人を縛る大きな要因である。一般に、人が多く集まる場所で新たな文化が創出される傾向があるため、現状の延長線上にある将来では現在と同じように文化の中心は大都市圏となることが予想される。当然、文化の中心である都市は人々を惹きつけるため、2050 年には現在進行している地域格差が拡大すると容易に想像がつく。実際に、国土交通省の国土のグランドデザイン 2050

では、2050年には60%の地域で人口が半減以下になり、さらに全体の20%では人が住まなくなると推計されている。この地域格差は各種インフラ利用料金を押し上げ、過疎の地域への人口分散を妨げる。地域格差を是正し、災害やパンデミックに強い分散型の社会を構築するには、居住する場所に依らず、全ての人が平等に健康かつ文化的な生活を営めるようにする必要がある。PGは、生活空間毎のエネルギー・物質・水の循環システムから成るため、分散型社会を促進する手段と言える。

PGのなかでエネルギー循環を構築する技術として、再生エネルギーに関わる技術や燃料電池技術、水素貯蔵技術が挙げられる。これらは、持続可能な低炭素社会を実現する上で重要な技術である。同様に、物質循環を構築する技術は、昨今問題となっているプラスチックゴミを処理する技術でもあり、アミノ酸合成からのフェイクミート合成技術は、日本の食料自給率を底上げする。水循環を構築する浄化技術は、地球内外に捕らわれず水を必要とする場所で飲料水を得る技術である。この浄化技術は、海中都市や宇宙コロニーなどでは必須の技術である。PGを構築する各循環を支える技術は、PG以外においても技術的な要請が高い。以上より、PGは、多くの分野における科学技術を統合したシステムであり、構成要素技術に求められる性能は他の国家プロジェクトと同程度に非常に高い。したがって、PGは、短期的に取り組むことは不可能であり、我が国の研究開発プログラムとして推進していく必要がある。

### 3.2 目標達成の社会的意義

PGは、エネルギー・物質・水の3つの循環技術からなるため、先ず循環毎に期待される社会的意義を述べる。

エネルギー循環では、生活空間毎に、基本的な生活に必要なエネルギーを再生可能エネルギーや燃料電池によって発電し、蓄電池との併用によって、エネルギー需要の変化にも柔軟に対応できるシステムの構築を目指す。エネルギーの自給自足は、送電やエネルギー供給のための社会インフラに制限されることなく、居住空間を自由に選択してデジタル空間にアクセス出来ることを意味し、自然災害や人的災害が生じたときも被害を最小限に留めると同時に、迅速な復旧をはかることができる。

また、PGでは、自己消費以上のエネルギーの生産も可能であり、現在、日本の第1次エネルギー消費の約14%を占めている家計部門（2019年度総合エネルギー統計）をエネルギー消費部門から生産部門へと変化させ、個人が電気料金を払う時代から獲得する時代に転換することができる。再生可能エネルギーと燃料電池からなる発電とその電力供給は、家計部門でCO<sub>2</sub>を発生させないだけでなく、電力供給先である産業分門などのCO<sub>2</sub>削減にも貢献することから、PGはカーボンニュートラル社会実現のための有力な社会システムとなる。

物質循環では、衣料品およびプラスチック製品のリサイクル、アミノ酸合成からなるフェイクミートの製造、有機廃棄物を活用した農作物の生産などが可能となるシステムの構築を目指す。各生活空間で、プラスチックゴミや化学繊維を原料であるモノマーまで分解し、

再重合することで、プラスチックゴミの排出を無くすことができる。再重合後の材料は、3Dプリンターを用いて衣料品やプラスチック製品に作り替えられる。このため、各生活空間から排出される衣料品、プラスチック製品は、すべてが新たな製品の原料となり、PGの生活者は、デザインのデータを購入し、これに基づいてプラスチック製品を製造することができる。食料品については、アミノ酸の電解合成からフェイクミートを製造するだけでなく、PG内で、必要な作物に応じてモジュール化された植物工場で農作物が生産される。生活者は、レシピのデータを購入し、農作物から必要な時に必要な量の食品を3Dプリンターによって製造する。

PG内の物質循環は、全ての人が、場所を問わず、欲しい時に、欲しい衣料品・プラスチック製品・食品などを手に入れることを可能にすると同時に、災害や貧困などによって食料調達が困難な事態にも対応できる社会インフラである。各生活空間から排出されるこれらの廃棄物は、すべて新たな製品の原料や農作物の肥料となり、食品ロスもなくなることから、一般廃棄物、プラスチックごみ、食品廃棄物などの社会への排出が削減され、現在の廃棄物処理・リサイクルシステムは規模・コストなどにおいて大きくスリム化されることになる。また、アミノ酸合成や植物工場によって食材が作られ、そのまま3Dプリンターで食品に加工されることから、農作物の栽培、食品の製造、これらの輸送などによって生じる環境負荷をなくしながら、国内の食品自給率を高めることができる。

水循環では、全ての人が場所を問わず、安全な飲み水を確保し、汚水の排出を無くすことができる水の完全循環システムの構築を目指す。海水や河川、雨水を飲料化する技術と污水浄化技術からなる水の循環システムは、すべての生活空間で飲料水の確保や下水処理が可能となるため、水道施設や下水施設のない地域にも、環境負荷とコスト負担の小さい社会インフラを提供する。一方、都市部においても、災害時の断水、逆流などのリスクやその修復のためのコストを抑えることができる。

人口が減少していく日本社会において、上・下水道に関する社会インフラでは、増大していく維持管理コストや取水コスト、利用料金の地域・世代間格差の大きさなどが重大な問題になっている。独立分散型のPGとこれを統合したインテグレートッドグリッド(IG)では、こうした格差がなく、社会全体の維持管理コストも小さいことから、新たな社会インフラになっていく可能性が高い。また、污水処理時に得られる、アンモニアや各種有機物廃棄物などの水循環システムの副産物は、分離精製され、既述の物質循環システムに農作物栽培のための肥料や堆肥として供給されることから、水循環システムは物質循環システムの機能の一部も担っている。加えて、海水や有機廃棄物から直接電解による水素製造は、水循環だけでなくエネルギー循環・物質循環システムとも密接に関係する。

PGは、すべての人にエネルギー・物質・水の循環システムを提供するが、その機能は社会インフラが不十分な過疎地や地方において発揮されるだけでなく、都市圏においても新たな形の社会インフラを提供する。2050年には、デジタル技術やAI・ロボット技術の発展により、現在より多様な価値観が認められる社会になり、それぞれの価値観に応じて、地方

と都市部に居住地域が分散することが予想される。

都市部においては、図2に示すようにPGを集積したIGによって新たな社会インフラが実現する。現在でも、同様のシステムとして、Peer to Peer(P2P)やInternet of Energy(IoE)などの開発が進められているが、IGでは、特定のエリア内でエネルギー・物質・水の3つの資源を結び付けて循環させることができる。街区、マンション、町内といったエリアに、IGが構築された都市では、エリアごとにエネルギー・物質・水の生産量と使用量が最適化され、送電網、上下水道網、ゴミ収集、リサイクル、食品生産などのシステムを一括して維持・管理することのできる独立分散型の新たな社会インフラが構築される。

また、IG内で生産される電力、水、アミノ酸、モノマー、農作物、肥料などは、各生活空間で生産量や使用量が異なることから、IG内で、グリッド地域通貨などを設定して、これらの物質間の需給バランスの最適化を図ると同時に、IG間やグリッド外の企業との取引システムを構築することも可能である。そこでは、IGをネットワーク型のシステムで結び、地域におけるエネルギー・物質・水循環の最適化を図る新たな地域社会インフラが構築される。

PGとIGは、地方においても都市部においても、グリッド内でエネルギー・物質・水循環システムを一体化し、原材料や製品の生産活動とその消費・使用・リサイクル活動を行なう自立分散型の社会システムを提供する。また、そこでは、すべての人に、生活していくために必要な衣食住の生活基盤が提供されることから、PGは、人々が、場所、職業、年齢、家族構成、収入などを問わず、快適に生活していくための新たな社会基盤となる可能性が高い。

これまでは、PGを各循環の視点からその社会的意義を述べたが、PGが社会に与える影響について俯瞰すると、次の3つの“キーワード”が浮かび上がる。

一つ目のキーワードは「持続可能な環境を保つ」である。PGでは、完全再エネ利用によって、各生活空間からのCO<sub>2</sub>排出がゼロとなり、家計部門のカーボンニュートラルが実現する。また、物質循環では、各生活空間からのプラスチックゴミ、食品廃棄物が排出されなくなることから、これらの処理するための埋め立て、焼却、化学処理、輸送などで発生している環境負荷をなくすことができる。また、グリッド内で食糧生産が行われることから、農作物や食品の生産や輸送時に発生する水・土壌への影響、CO<sub>2</sub>の発生などもなくすことができる。さらに、水循環では、地表水や地下水の使用や汚水の排出がなくなることから、家計部門からの水資源への環境負荷やダムなどの巨大な給水施設による自然資本への環境負荷がなくなる。

二つ目のキーワードは「生命を守る」である。PGは現在の大規模グリッドに縛られることなく、人間が個人レベルで自立型生活空間を享受することが出来る移動型のシステムであり、地震、台風、洪水、熱波、寒波、火災などの多くの自然・人的災害が予測されるエリアからの居住空間の移動を可能とする。また、エリア全体が自然災害やパンデミックなどに襲われ、過酷な自然条件の中での生活を強いられた際にも、PG内やIG内で生活すること

が可能であり、特に、災害などに弱いとされる都市部においては、IG が形成されることで、人々の生活を支える社会インフラが守られると同時に、早期の災害復旧が可能になる。

三つ目のキーワードは「豊かな文化・生活を創る」である。PG は、それぞれの住居が1つの閉じた系であり、居住地の選択性を高める。各自がさまざまな空間で生活するだけでなく、複数のユニットを集積することで都市を形成することも可能となる。PG を集積したIG では、ボトムアップによる都市形成を行うことができるため、砂漠、山岳地帯、離島、海上、海底、宇宙空間といったさまざまな生活環境における都市建設が可能となり、居住地の多様化の実現は、さまざまな観点から生み出される新たな文化や価値観の創出を促す。また、すべての人が、居住地を自ら選択し、食物工場によって必要な食材を育て、3D プリンターによって自由にデザインされた衣類・生活用品や食べたい食品を作ることができる環境は、豊かな文化・生活の創造につながる。

PG は、国籍、人種、場所、職業、年齢、家族構成、収入などを依らず、全ての人々が、環境負荷を生むことなく、自然災害や人的災害から守られながら快適な生活を営み、多種多様な価値観からなる新たな文化・生活が創出される社会の構築を目指しており、その実現に向けた社会的意義は大きい。

### 提案する社会像実現に向けたシナリオ

#### 既存インフラ利用によるPG、IG導入シナリオ

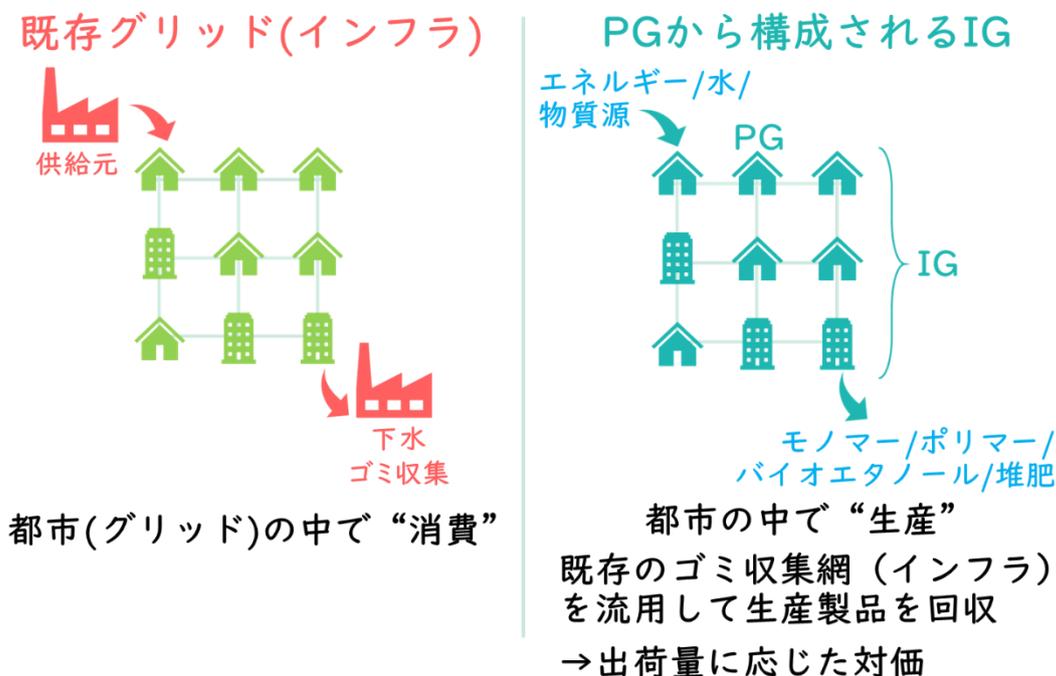


図2 パーソナルグリッド(PG)から成り立つインテグレートドグリッド(IG)の導入シナリオ

### 3.3 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要

PG の実現に向けて具体的に検討すべき項目を循環毎に列挙する。

#### ① エネルギー循環

1. 太陽光発電を主とする再生可能エネルギー利用の高効率化
2. 水素製造・貯蔵技術
3. 燃料電池の高出力・高耐久化
4. 蓄電池の小型大容量化・長寿命化
5. 固定買取制度 (FIT) と発送電分離

産学を問わず研究者・技術者による技術開発が必須であるが、自由市場化に向かいつつある電力流通に対して、コンサルティング業界や経済アナリストと共にポスト FIT の制度設計を行う必要がある。

#### ② 物質循環

1. ポリマーとモノマー間を自在に行き来する物質変換技術の確立 (プラスチック製品の製造・リサイクル)
2. 小規模高効率なアミノ酸合成技術の確立
3. 小規模高効率なアンモニア合成の確立
4. 3D プリンターによる衣料品および食料品製造

化学、農学、生物学といった分野に捕らわれず産学の研究者・技術者による技術開発が必須である。

#### ③ 水循環

1. 海水や河川、雨水の飲料水化技術
2. し尿を含む汚水の浄化技術
3. し尿を含む汚水や海水、河川、雨水からの直接水素製造技術

化学、農学、生物学、衛生学といった分野に捕らわれず産学の研究者・技術者による技術開発が必須である。

#### ④ 3つの循環に必要な電解技術および PG 関連技術

1. PG スケールに対応する反応器の小型化 (マイクロリアクター)
2. 需要を満たす高生成速度の高効率電解技術
3. 可搬性の為の反応器、反応システムのモジュール化
4. 各循環間のエネルギー、マスバランス、効率化を制御するシステム技術

電解技術者のみならずシステム技術、機械設計、触媒合成等、幅広い分野の研究開発を連携して進める事が必要である。

#### 4. 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

PG では、エネルギー・物質・水から発生するすべての廃棄物が他のプロセスの原料となる循環プロセスが形成される。エネルギー・物質・水を提供し、廃棄物や廃水を処理する

現在の巨大な集中型の社会インフラは、PG 間のエネルギー・物質・水の過不足を調整し、PG から発生するモノマーやアンモニア、アミノ酸などを産業界に提供する分散ネットワーク型の社会インフラへと転換する。建設、維持管理、更新などが社会問題となっている大規模な発電所、送電施設、ダム、上下水施設、廃棄物処理施設などは不要となり、社会インフラのために費やされる社会全体のコストは小さくなる。そこでは、PG で生活するすべての住民に、持続的で経済的負担の少ない生活基盤が提供される同時に、日本に立地して活動する企業や産業施設の国際的な競争力が強化される。

2050 年に至るまでの間に、日本でも、気候変動、水不足、自然破壊、パンデミックなどの世界的規模の環境・社会リスクに直面する可能性が高い。PG はこうした状況にも適応し、社会インフラの不十分な地域や生活環境の厳しい地域などでの人々の生活や経済活動を可能にする。したがって、PG を地方、都市部などの多様な地域や海外へ展開することによって、社会的課題の解決と経済的成果の両立を図る、日本発の新たなインフラ産業を推進することができる。

社会インフラに加えて、人々の生活には、衣類・食品・プラスチック製生活用品などの提供が不可欠である。PG では、これらを PG 内で生産・消費し、外部からは、主に衣料品のデザイン、プラスチック製品の設計図、食品のレシピ、植物の種子、栽培のノウハウなどを購入する。そこでは、衣類・食品・生活用品産業が、いわゆる、ものからことを提供する知財型産業へと大きく転換していくことになり、PG 自体にも、同様に、地域エネルギー企業や地域資源企業などが設置・管理・移設を行い、生活者にサービスを提供するシェアリングシステムが想定されている。2050 年には、AI、ロボット、3D プリンター、植物工場などが PG に取り込まれることで、人々の生活を支える産業は、製品製造から知財サービスの提供へと産業構造の変化が加速していくことが予想される。

PG は、陸上、海洋、宇宙といった住む場所を選ばず、すべての人が快適かつ豊かに生活を営むための手段であり、そこでは、環境負荷が発生しないだけでなく、自然災害の被害を受けない自立分散型の居住空間や都市を形成することができる。こうした PG による社会インフラのパーソナル化は、地域分散型社会、職住近接型社会、地域循環共生圏型社会、自然共生型社会、防災型社会などに代表される、日本社会の持続可能社会への転換を可能にし、2050 年に向けた日本の社会構造の変革を加速させる推進力となる。

## II. 統計・俯瞰的分析

1. 当該 MS 目標を達成するための課題（科学技術的・社会的課題）や必要な取組み

### 1.1 エネルギー循環

PG における物質循環を実現する為には、以下の事柄を検討しなければならない。

1. 太陽光発電を主とする再生可能エネルギー利用
2. 水素製造・貯蔵技術
3. 燃料電池の高出力・高耐久化

4. 蓄電池の小型大容量化・長寿命化
5. 固定買取制度（FIT）と発送電分離

#### 1.1.1 太陽光発電に代表される再生可能エネルギー

再生可能エネルギーとして注目されている太陽光発電や風力発電は、将来的に大型電源としての活用が期待されている。事実、経済産業省「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」では、一方で、太陽光発電や風力発電は、2050年にかけて成長する分野として上がられている。しかし、これらの発電技術は、日照時間や風況が重要であるため立地制約が強い。その一例として図3に住宅用太陽光発電の都道府県別年間発生電気量を示す<sup>1)</sup>。図3に示すように年間発電量の平均は約1000 kWh/kWであるが、地域や年によって1~3割のばらつきがある。日本の住宅の導入ポテンシャルとしては屋根や屋上の設置は65 GW、側壁を加えると91 GWである。

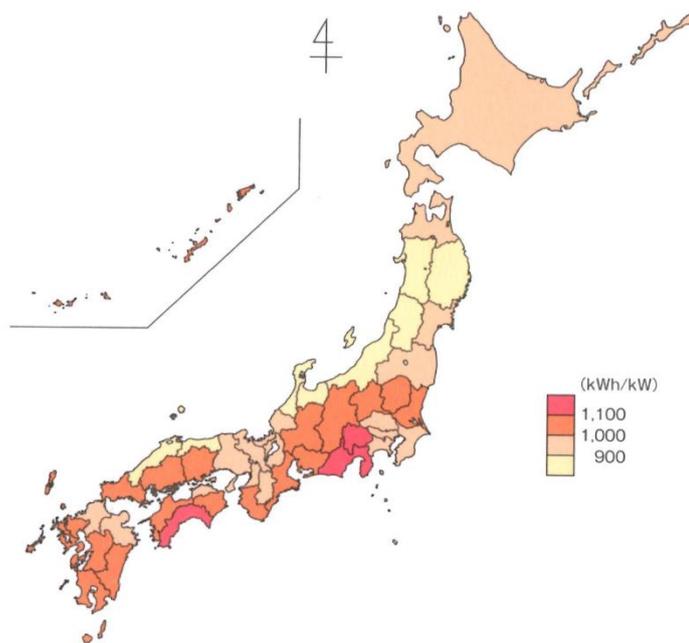


図3 住宅用太陽光発電の都道府県別年間発生電気量<sup>1)</sup>

現在、太陽光発電は、FIT制度や環境意識の増加により、広く一般に認知・使用されている。再生可能エネルギーの利用率を向上させ、PGの主たる電源設備とするには、発電システムの低コスト化、発電効率の向上、長期信頼性などが重要な検討課題といえる。

#### 1.1.2 水素製造・貯蔵技術

水電解は水素を製造する過程で二酸化炭素を排出しないため、水電解で生成した水素を燃料電池のエネルギー源とすることで究極の環境調和型エネルギーシステムを構築するこ

とができる。水電解の手法としては主にアルカリ水電解、固体高分子型水電解、高温水蒸気電解などがあり、水素の貯蔵・輸送方法としては、圧縮水素、液化水素、有機ハイドライド、アンモニアなどがある<sup>2)</sup>。

### 1.1.3 燃料電池の高出力化・高耐久化

燃料電池車やエネファーム等に搭載されている固体高分子形燃料電池の内部では、アノードで水素の酸化反応が、カソードでは酸素の水への還元が起こっており、高出力化・高耐久化を実現するためにはエネルギーロスの大きい酸素還元反応を効率よく促進させるための触媒開発が重要だと考えられている。触媒としては貴金属である白金が用いられているため、希少な白金の使用量を低減しつつ、高温(~80°C)、酸性条件でも高耐久性を示す触媒開発が世界中進められている。

### 1.1.4 蓄電池の小型大容量化・長寿命化

蓄電池は携帯機器での利用に限定されず、再生可能エネルギーの貯蔵や緊急時の利用において活用できるため、PGの実現には必要不可欠である。大容量化と高寿命化が大きな課題であり、同時に小型化も求められている。また、従来の蓄電池では有機系電解質が用いられてきたが、システム系のエラーによる火災等が生じているため信頼性に疑問が生じている。近年では、信頼性がある全固体電池の開発が国内外で活発に進められているが、蓄電効率が低い点が課題である。

### 1.1.5 固定買取制度（FIT）と発送電分離

電力システムは、同期発電機によって互いに連携し、どんどん肥大化していったが、その反動として災害時に連鎖大停電を起こすという脆弱性を持っている<sup>3)</sup>。既存の電力システムには系統容量に限界があるため、いくら固定価格買取制度で再エネの導入を促進しても系統容量の限界に突き当たり、再エネはそれ以上伸びることができないという事態に陥ってしまう。

再生可能エネルギーは地域的偏在性があるため、分散電源との親和性が高い。再エネの積極的な導入に向けてマイクログリッドが開発されている。マイクログリッドとは、「1か所にてコントロールが可能な、電力系統から独立した分散電源と需要のグループ」であり、電力系統と連携しているケースと連携していないケースがある。離島などでは、ディーゼル発電機が電力供給に利用されているが、ディーゼル発電機は石炭やガス火力発電と比較して燃料費が高いため、再生可能エネルギーと蓄電池を組み合わせたマイクログリッドが経済的に受け入れられやすいと考えられる。マイクログリッドを用いたエネルギーの分散化のイメージ図を次の図4に示す<sup>4)</sup>。

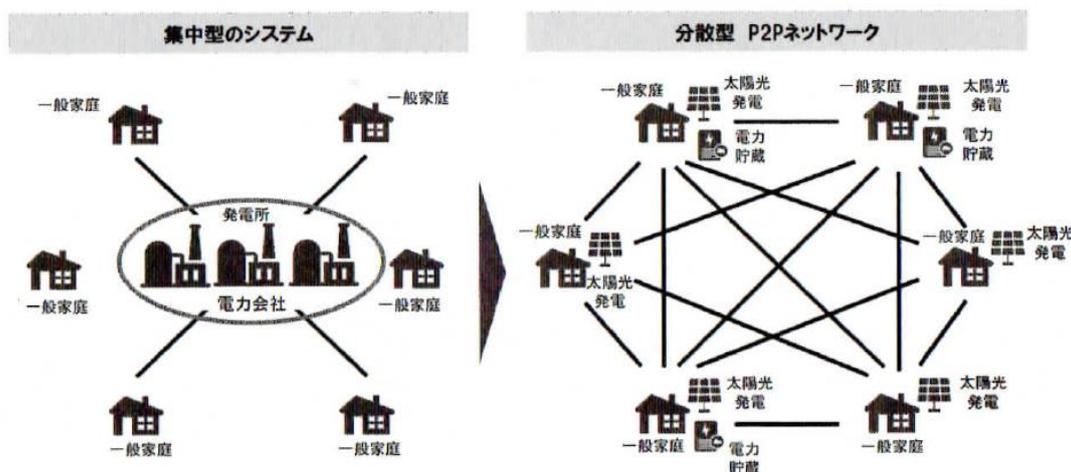


図4 マイクログリッドを用いたエネルギーの分散化のイメージ図<sup>4)</sup>

マイクログリッドは、系統のもつ電圧・周波数に依存し、常時のバックアップを必要とするため、停電時に無停電切り替えにより自立する技術は確立されていないということが課題である。この課題を解決する為、デジタルグリッドが提唱されている。電力系統にイノベーションを起こすには、セルとなるグリッドを電力会社以外が保有し、再エネを直接取り入れられるようにすることが重要である<sup>5)</sup>。

また、災害時の脆弱性を回避するために、非同期連系が重要になる。非同期連系とは再エネを大量導入する際に、電力系統の安定度維持のために用いられることが期待される仕組みであり、交流系統同士を、直流を介して接続する方法である。位相がずれていても電力をやり取りできるのがこの非同期連系の利点であり、高圧や低圧配電系統などの下位の電圧系統にも使用範囲を広げれば、有効電力や無効電力を自在にコントロールし、電圧問題を解決することができる。例えば、太陽光のインバーター等が無効電力を自在に注入することができれば、柱上変圧器のリアクトル成分を活用して、電圧を制御し安定化させることが可能となり、再エネ電力の安定供給につながる。インバーターを二つ使い、交流を直流に直して、その直流からまた交流を作る BTB(バック・トゥ・バック)という非同期連系技術により、日本が直面している周波数の制約から解放される<sup>3)</sup>。

## 1.2 物質循環

PGにおける物質循環を実現する為には、以下の事柄を検討しなければならない。

1. ポリマーとモノマー間を自在に行き来する物質変換技術の確立（プラスチック製品の製造・リサイクル）
2. 小規模高効率なアミノ酸合成技術の確立
3. 小規模高効率なアンモニア合成の確立
4. 3Dプリンターによる衣料品および食料品製造

これらの要素技術の中には既に工業化されているものも存在するが、PG 内で利用可能な水準には達していない。すなわち、低コスト、省スペース、省エネルギー、サステナビリティを実現する必要がある。各要素技術それぞれについて研究が進められている段階である。また、これらを接続し制御する強力なプラットフォームの開発も求められる。

### 1.2.1 プラスチック製品の製造・リサイクル

プラスチックは石油や天然ガスから主に作られ、日本では、原油を精製してできるナフサ(粗製ガソリン)を原料としてつくられるのがほとんどである。日本で 1 年間に使われる原油量(2 億 kL 弱)のうち、ほとんどがガソリン、灯油、軽油、重油などになり、ナフサになるのは 1 割弱である。原油年間使用量とナフサ輸入量の原油換算量との合算値で比較すればその約 3%(重量%)となり、プラスチックに使われている原油は全体の数%に過ぎず、原油はそのほとんどが熱エネルギーとして消費されている(図 5)。このことから、プラスチックの使用量を減らしたとしても、原油の使用量の減少や原油由来の気候変動への影響は小さいと考えられる。そのため原油使用量削減および石油由来の CO<sub>2</sub> 排出量削減の観点で議論する場合は、原油の 3%程度しかないプラスチック使用量削減よりも、燃焼による熱エネルギーとしての消費量を減らすことに重きをおいて議論および対策を講じる必要がある。

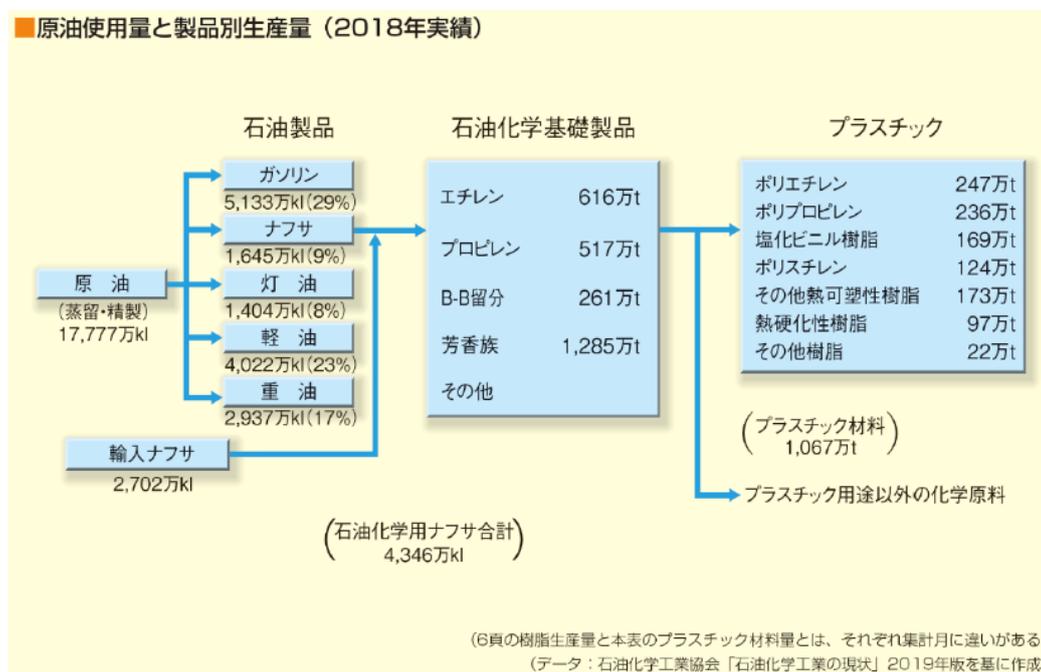
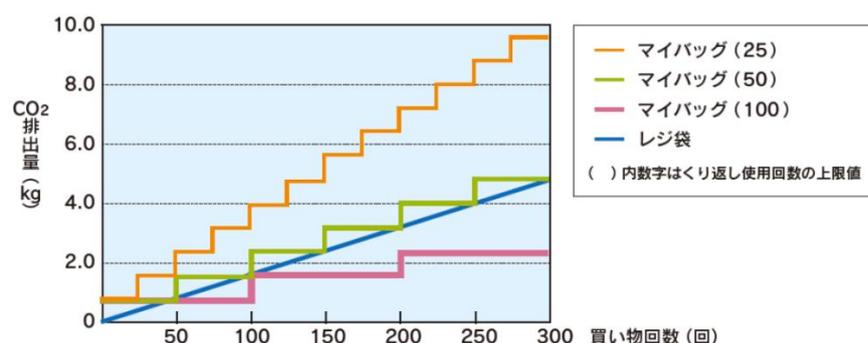


図 5 原油からプラスチックまでの流れ<sup>6)</sup>

2020 年 7 月からプラスチック製買い物袋(レジ袋)の有料化がスタートした。プラスチック製レジ袋=環境負荷低減という短絡的な議論がよくされるが、買い物回数(レジ袋・マイバック使用回数)と CO<sub>2</sub> 排出量の関係性をみると、マイバック(ポリエステル 100%を想定)

は製造時の CO<sub>2</sub> 排出量がレジ袋(高密度ポリエチレン 100%を想定)に比べ多いため、50 回以上繰り返しマイバックを使用しない限り CO<sub>2</sub> 削減に貢献することにはならない(図 6)。また、マイバックの重さ(32 g/枚)をレジ袋の重さ(3.0 g/枚)の約 10 倍とすると、単純計算でマイバックを 10 回以上使用しない限りゴミ廃棄量削減の観点では貢献できない<sup>7)</sup>。実際は、マイバックのメンテナンス(お湯や洗剤での洗浄)、使用回数の増減等を考慮すると、CO<sub>2</sub> 排出量は増減するため図 6 に示した階段状および直線関係は変化することが予想されるため話は単純ではないが、1 度得られたプラスチック製品を繰り返し使用し続けることは、環境負荷の低減には確実に貢献できるため、「1 度購入したプラスチック製品は長期間使用し続ける」という意識の浸透が最も重要である。



|                                      |            | レジ袋                    | マイバック                       |
|--------------------------------------|------------|------------------------|-----------------------------|
| 前提条件                                 | 重量 (g/枚・個) | 3.0                    | 32.2                        |
|                                      | 材質         | HDPE (高密度ポリエチレン) 100%  | ポリエステル100%                  |
|                                      | 製造国        | 中国 (福建省)               |                             |
|                                      | 製造方法       | インフレーション加工             | 定格電力250Wのミシンで<br>1枚あたり10分縫製 |
|                                      | 配布・使用される国  | 日本                     |                             |
|                                      | システム境界     | 原料採掘～製造～輸送(海上)～使用～単純焼却 |                             |
| 評価結果<br>CO <sub>2</sub> 排出量<br>(g/枚) | 原料段階       | 4.1                    | 675.0                       |
|                                      | 製造段階       | 1.5                    | 30.7                        |
|                                      | 輸送段階       | 0.2                    | 1.8                         |
|                                      | 処分段階       | 9.6                    | 74.3                        |
|                                      | 合計         | 15.4                   | 781.7                       |

【インベントリデータ】  
 LCA日本フォーラム「JLCA-LCAデータベース」(2008年度3版)  
 PWMI「樹脂加工におけるインベントリデータ調査報告書」(2000年)  
 経済産業省製造産業局「繊維製品(衣料品)のLCA調査報告書」(2003年)  
 中国国家统计局「中国能源統計年鑑2006」(2007年)

図 6 買い物回数と CO<sub>2</sub> 排出量の関係と試算のための前提条件<sup>8)</sup>

プラスチックの原油全体に占める割合と買い物回数と CO<sub>2</sub> 排出量の関係性の議論から、「プラスチックやレジ袋削減=環境負荷低減、資源保全」という単純な話ではないことは明らかであり、プラスチックと環境負荷との関係性を議論する場合には、環境負荷が CO<sub>2</sub> 排出量なのか、ゴミの排出量なのか、海洋プラスチック等の環境汚染なのか、焦点を絞って慎重に議論する必要がある。

プラスチックの原油全体における割合は確かに少ないかもしれないが、日本だけでも年間約 1,050 万 t のプラスチックが生産されている(2019 年)。そのうちポリエチレンとポリプロピレンで全体の 46.5%を占める。これはプラスチック用途のうち約 40%が袋やラップフィルムなどの包装材、シート向けであるため、材料として適しているポリエチレンやポリプロピレンの生産量が多くなっている(図 7)。

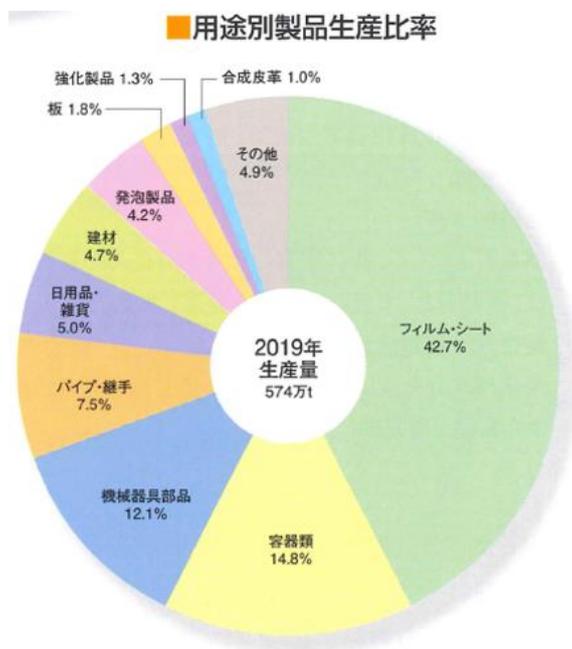
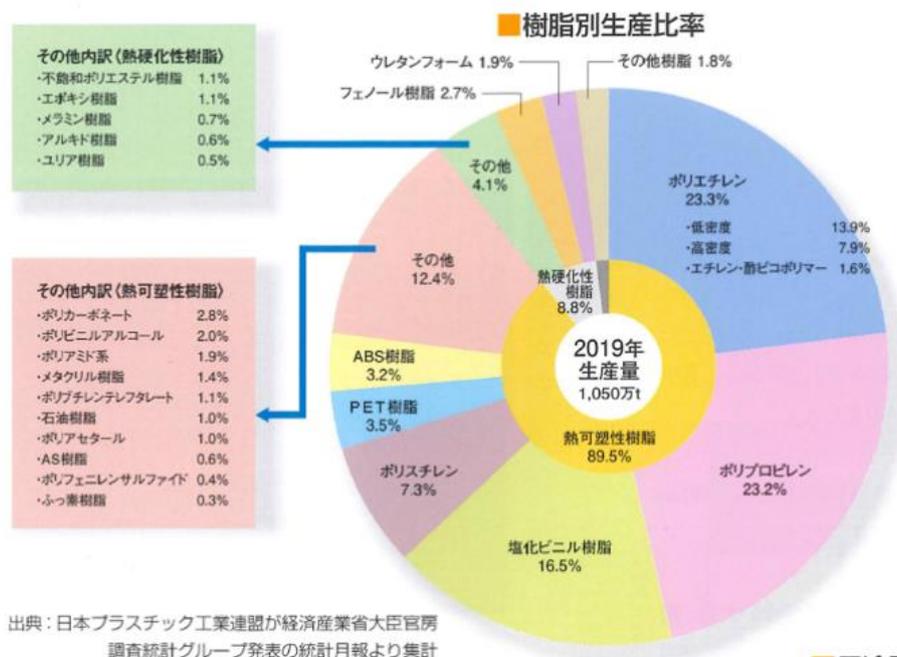


図 7 プラスチックの樹脂別および用途別生産比率(2019 年)<sup>6)</sup>

日本でのプラスチックリサイクルの分類として、マテリアル(材料)リサイクル、ケミカルリサイクル、サーマルリサイクル(エネルギー回収)の3つがある(表1)。マテリアルリサイクルでは、廃棄プラスチックを溶融して、もう一度原料として使用する方法である。PETボトルの回収、処理、再商品化などがこれに該当する。ケミカルリサイクルは廃棄プラスチックを化学処理により原料・モノマー、ガスや油等に変換して使用する方法である。PGでのプラスチックの物質循環の観点では、原料・モノマー化や油化(石油化学関連化合物)への変換プロセスの拡大が今後特に重要であると考えられる。最後にサーマルリサイクルでは廃棄プラスチックを燃焼させ、熱もしくは発電に使用する方法である。なお世界標準ではサーマルリサイクルは熱回収(energy recovery)であり、リサイクルに分類されていない。そのためマテリアルリサイクルとケミカルリサイクルにのみ焦点を絞ってプラスチックリサイクルを考える。

表1 3つのリサイクルの分類. \*1: Refuse paper & plastic fuel. マテリアルリサイクルが困難な古紙とはいプラスチック類を原料とした高カロリーの固形燃料. \*2: Refuse derived fuel. 生ゴミや可燃ゴミやはいプラスチックなどからつくられる固形燃料.<sup>6)</sup>

| 分類(日本)                  | リサイクルの手法                         | ISO 15270                            |
|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
| マテリアルリサイクル<br>(材料リサイクル) | 再生利用<br>・プラ原料化<br>・プラ製品化         | Mechanical Recycle<br>(メカニカルリサイクル)   |
| ケミカルリサイクル               | 原料・モノマー化                         | Feedstock Recycle<br>(フィードストックリサイクル) |
|                         | 高炉還元剤                            |                                      |
|                         | コークス炉化学原料化                       |                                      |
| サーマルリサイクル<br>(エネルギー回収)  | ガス化<br>油化                        | Energy Recovery<br>(エネルギーリカバリー)      |
|                         | 化学原料化<br>燃 料                     |                                      |
|                         | セメント原・燃料化<br>ごみ発電<br>RPF*1 RDF*2 |                                      |

プラスチックの世界生産量 83 億トンのうち、49 億トンが埋め立て等により廃棄され、8 億トンが焼却処分、そして、約 6 億トンがリサイクルされているとの報告がある (図 8)。これらの数値からプラスチックの廃棄量のわずか 9%がリサイクルに回されている計算になる。プラスチックの国別リサイクル率は国によって様々であり、ヨーロッパでは 26%~52%のリサイクル率である(図 9)。

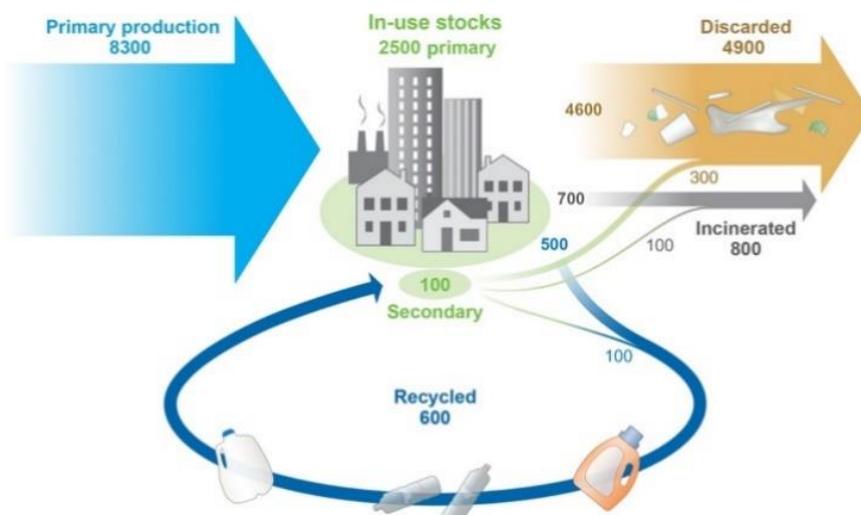


図 8 1950~2015 年に世界で生産、利用、廃棄されたプラスチックの量(単位: 百万トン)<sup>9)</sup>

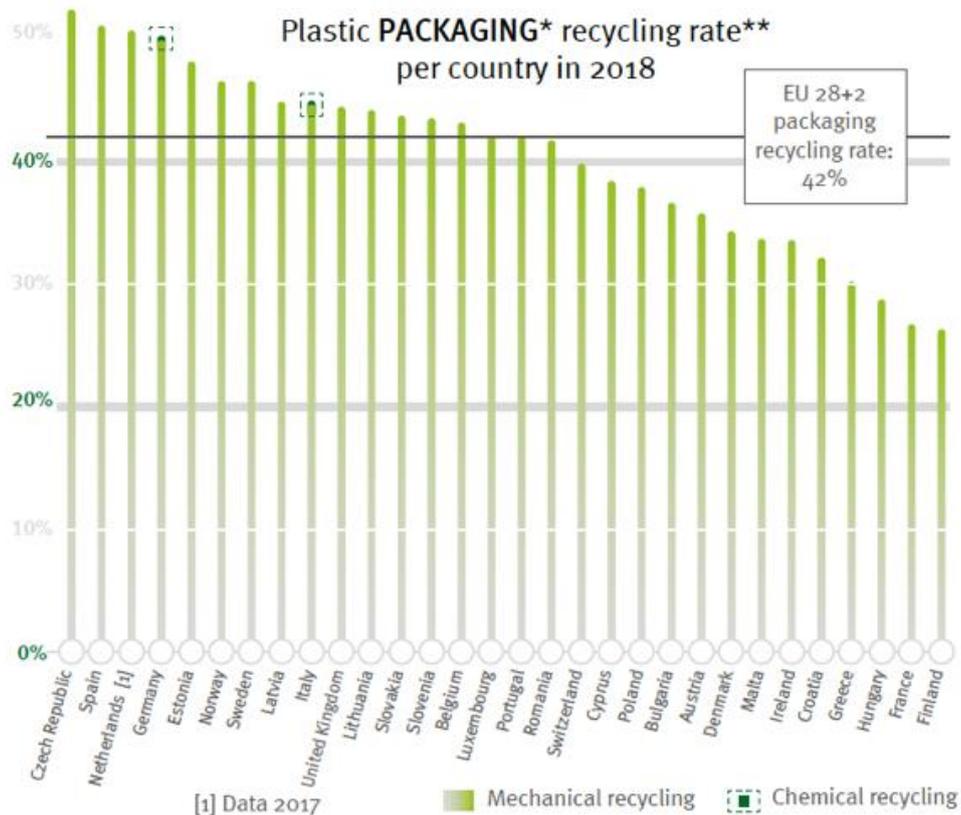


図 9 2018 年におけるヨーロッパ各国のプラスチックリサイクル率<sup>10)</sup>

### 1.2.2 アミノ酸の製造

アミノ酸は食用・医薬・高分子として人間の活動に必須の化合物であり、PG 内での製造が可能となれば PG の独立性は大きく向上すると考えられる。アミノ酸の製造法としては、

化学的方法、生化学的方法、抽出法などがあげられるが、天然に存在するアミノ酸に限らず適用範囲が広い化学的方法の研究が進められている。例えば、化学的方法で製造された含フッ素アミノ酸およびその誘導体は、医学・薬学などの分野で広く利用されている。しかし、一般的に行われている化学的方法は未だ環境負荷が大きい製造法である。

### 1.2.3 アンモニア製造

アンモニア (NH<sub>3</sub>) は窒素肥料や衣服の材料となるナイロン繊維、薬剤などの原材料として幅広く利用されているが、これまでハーバー・ボッシュ法による製造が検討されてきた。しかしながら、製造過程は高温・高圧環境 (400~600°C、100~200 気圧) であるため、大量のエネルギーが投入されており、この課題を克服できる新しいアンモニア製造法が検討されている。JST CREST 事業 (東京大学の成果) では、アンモニアを窒素ガスと水から常温・常圧で簡単かつ高速に大量合成できる方法を世界初で開発した<sup>11)</sup>。現行のハーバー・ボッシュ法を代替する次世代型のアンモニア合成反応開発に向けて重要な位置づけにあり、実用化が期待されている。

### 1.2.4 3D プリンターの現状

PG で物質はアミノ酸もしくはモノマーレベルに還元され、3D プリンターにより PG 内で必要な物に再構成される。

3D プリンター(正式名称: AM(Additive Manufacturing (付加製造))は正確に以下に 7 の方式に分類される。

1. Vat photopolymerization : VPP
2. Material jetting : MJT
3. Binder jetting : BJT
4. Powder bed fusion : PBF
5. Material extrusion : MEX
6. Directed energy deposition : DED
7. Sheet lamination : SL

いずれの方式においても、造形物となる原材料を粉体や液体などの流動性のある状態で成形し固化することで形状を得ている。

ポリマーを造形する方法をしてみると

- I. モノマーをインクジェットで吐出し、直後に UV で重合する。(MJT、VPP)
- II. 熱可塑性ポリマーを溶融して押出し、直後に冷却して凝固させる。(MEX)
- III. 粉末状のポリマーをレーザーなどで選択的に溶融、凝固させる。(PBF)

PG 内での利用ということを鑑みると、I もしくは II がベースとなると考えるが、I では UV 重合をするための光重合開始剤の安全性や重合後のモノマーの残留が特に衣類への応用の場合課題となる。また、II を用いる場合現時点は供給材料と射出材料は同一であり、装

置内で反応や合成を行う例はない。

### 1.3 水循環

PGにおける水循環を実現するためには、以下の事柄実現する必要がある。

1. 海水や河川、雨水の飲料水化技術
2. し尿を含む汚水の浄化技術
3. し尿を含む汚水や海水、河川、雨水からの直接水素製造技術

既に、河川や雨水の飲料化技術は、大規模な施設としては浄水場、小規模ではペットボトル型の浄水器などとして広く利用されている。また、し尿を含む汚水や排水の浄化技術も下水処理場などで利用されている。加えて、海水からの直接水素製造技術は、今後、非常に注目される研究テーマであるといえる。以下に水循環に関わる技術の現状とPGへの適応に向けた課題について概説する<sup>12,13)</sup>。浄水場の仕組みに関しては、各自治体がホームページ等で浄化技術も含めて記載している。

#### 1.3.1 海水や河川、雨水の飲料化技術

浄水場では、自治体に依らず概ね以下のような工程を経て飲料水として供給される。

- ①河川や湖水などを取水口から取り入れる。
- ②大きなゴミや砂利などを沈殿させる。
- ③化学薬品などを用いて濁りや汚れを凝集し、大きな塊を沈殿させる。
- ④ろ過を行い、薬品による消毒を行う。
- ⑤配水池を経て、送水ポンプを使って配水を行う。

携帯用の小型浄水器も基本的には、河川や雨水などの原水をろ過することで飲料水としている。加えて、海水の淡水化についても多段のろ過を行うことで飲料水を得ている。海水の淡水化施設は、大規模な飲料水の確保を目的としているため、浄水場と同じく大規模な施設となっている。一部で、船舶用や災害時用として、小型の海水の淡水化装置も開発されているが、現在の淡水化施設としては主流ではない。

浄水場での処理では、化学薬品を利用する急速ろ過法と微生物のバイオフィームを使う緩速ろ過法を用いるが、どちらも砂層や砂利層を通過させることで、浄水を得ている。一方で、海水の淡水化では、逆浸透（RO）膜が使われることが多い。この理由として、RO膜の研究開発が、RO膜の海水淡水化への適用を中心に進展してきたことに由来する。これまでの多くの飲料化技術は、ろ過技術に基づいている。このため、ろ材の交換が必須である。加えて、浄水場のように大規模な水処理プラントが目立つ。PGの広範な普及を実現する上では、ろ材のメンテナンスフリー化および長寿命化、抵抗コスト化が必須であり、各生活空間に設置することを念頭におくと小型化も行う必要である。したがって、ろ過以外の浄化手法も視野に入れた飲料化技術の開発が望まれる。

### 1.3.2 し尿を含む汚水の浄化技術

現状の下水処理は、し尿を含む汚水・排水に対して沈殿やろ過を用いた物理・化学的な手法と、細菌を利用した生物学的な手法が組み合わされている。あまり意識されることはないが、下水道法は1900年（明治33年）に制定され、古くから社会インフラとして整備が進められてきた。このため、既存の下水処理は大規模な施設が中心である。一方で、小規模用途としては、災害用やキャンプ用の携帯用トイレが挙げられる。これらの多くは、殺菌性のある凝固剤により水分を凝固させ、使用後に密閉して可燃ごみとして廃棄する方式をとっている。また、自然環境下にある山小屋等でのし尿処理も、自然環境に調和する上で大きな検討課題となっている。環境省 環境技術実証事業のなかで、自然地域トイレし尿処理技術について平成16年から平成28年まで広報資料が纏められ、webサイトに公開されている<sup>14)</sup>。この自然環境におけるし尿処理手法は、先に挙げた携帯用トイレとは異なり、前処理が必要な細菌を利用した生物処理が多い。生物処理以外では、乾燥と焼却による処理のみである。現在、富士山には、オガクズや牡蠣殻を利用した生物処理を利用したトイレと燃焼式のトイレが設置されている<sup>15)</sup>。近年、2018年にビルゲイツ氏が公衆衛生の観点から、新たに開発された自己完結型トイレを前に衛生的なトイレの必要性をGatesNotesにて説いている<sup>16)</sup>。この後に、Bill & Melinda Gates財団から支援を受けた3種類のトイレが、the Toilet expoにて紹介された。3種類のトイレの概要については、当時のThe Wall Street Journalが簡潔に纏めている<sup>17)</sup>。開発された技術は、し尿を液体と固体に分離し、含有有機物質は細菌を利用して分解または燃焼により除去する手法が取られている。加えて、国際宇宙センターにおける水再生システムも、尿を蒸留し、空気中の湿度や使用済みの水と混ぜて、ろ過/浄化するシステムとなっている<sup>18)</sup>。ただし、得られる再生水は、約18 L/day程度である。

PGの構築する水循環を考慮すると、し尿から飲料水を得られる技術は有益であるが、生活水の全てを得ることは不可能である。このため、生活排水も含めた循環が必要となる。生活排水の処理を考えると、既存の自己完結型のトイレだけでは不十分である。また、生物学的な処理を主軸とする下水・排水処理では、医薬品や日用品由来の化学物質を完全に処理することが出来ない。特に、抗菌剤、抗生物質、解熱鎮痛剤の一部は、細菌を利用した生物学的処理では分解できずに、下水道や浄化槽内で薬剤耐性菌を生み出す危険性が指摘されている。このため、燃焼処理やオゾン、紫外光照射、過酸化水素処理、電解処理といった物理化学処理も積極的に検討する必要がある。加えて、PGに実装する水循環技術は、処理速度の担保と小型化の両立も必須条件である。

### 1.3.3 し尿を含む汚水や海水、河川、雨水からの直接水素製造技術

今後来る水素社会に向けて、我が国でも水素基本戦略が決められ、2030年以降では家庭等における従来エネルギーシステムの代替として、燃料電池システムが挙げられている。本報告書にて提案するPGは、燃料電池技術はエネルギー循環と水循環を結ぶ重要な要素技術

として認識されると考えられる。燃料電池において、燃料といえる水素の入手は喫緊の課題とも言え、NEDOの「水素利用等先導研究開発事業」などにより検討が進められている。水素を得る手法として、海水や排水から直接水素を得る研究報告が近年急速に進んでいる。図10は、限定的なキーワードにて検索を行った結果であるため、関連する全ての報告を網羅しているわけではないが、近年明らかに報告数が伸びていることが見てとれる。特に、2021年は5月までの報告件数であるが、既に前年度の半数以上の報告件数であった。このことから、海水や排水から直接水素を製造する技術は、世界的なホットトピックスとなる可能性がある。海水からの水素製造と排水からの水素製造では、アプローチが異なる。海水を用いる場合では電解技術が主たる手法であり、排水を用いる場合には光触媒を利用した光電気化学的な手法が主となる。これは水電解に際して問題となる箇所が異なることに由来すると思われる。具体的には、海水を利用した場合には各種海水に含まれるアニオン種が問題となり、排水を利用した場合には有機物の存在が大きな問題となる。ただし、どちらの場合も最適な電極触媒が見出されておらず、PGを実現させる上では高活性かつ長寿命、低コストの電極触媒の開発が必須である。

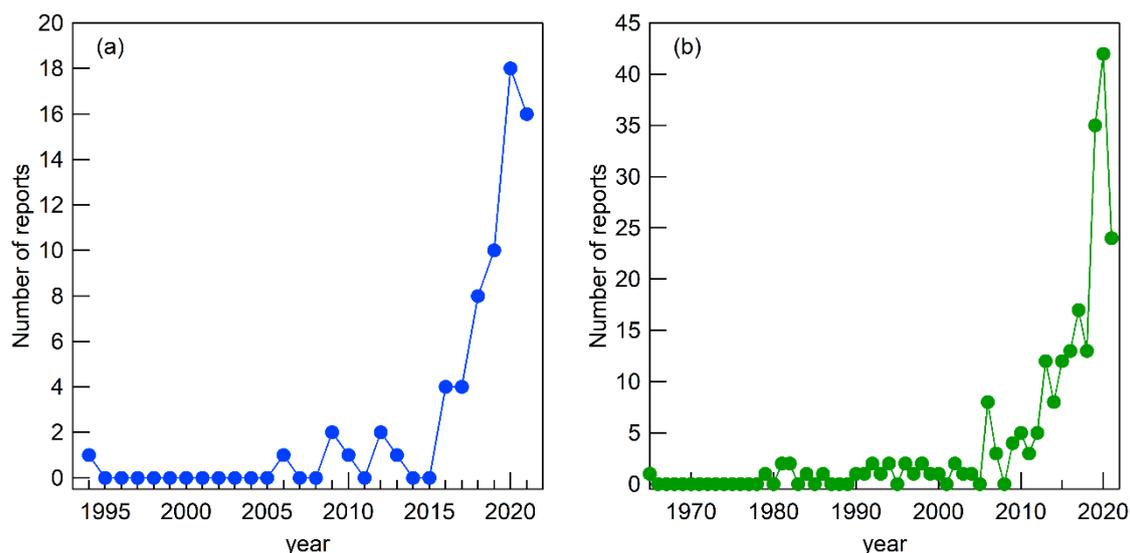


図10 (a) “electrolysis”, “seawater” “water splitting”, (b) “electrolysis”, “wastewater” “splitting”のキーワードでそれぞれ論文検索を行った結果

## 2. 当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰

### 2.1 エネルギー循環

#### 2.1.1 太陽光発電を主とする再生可能エネルギー利用

太陽光発電は、PGに適した可能エネルギーと考えられるため、以下では太陽光発電に関して論ずる。詳細な当該分野の俯瞰は、科学技術振興機構の研究開発戦略センター(CRDS)の「研究開発俯瞰報告書」に譲る。

2019年のデータでは、世界の加重平均発電コストは、0.068 USD/kWhであるのに対し

て、日本の加重平均発電コストは、0.163 USD/kWh と、世界の約 2.4 倍の発電コストとなっている。NEDO の太陽光発電ロードマップ (PV2030+) によると、2030 年以降に 7 円 /Wh 以下となることを目標としている。システムの高寿命化によるコスト低減を目標とし、結晶 Si 系太陽電池の劣化機構の解明に関する研究が行われている。また、高効率かつ高信頼性を有する太陽電池に検討も行われている。ただし、現在の研究開発の動向としては、システム全体のコストを低減することを目的として、材料開発よりも効率化に主眼が置かれている。

### 2.1.2 水素製造・貯蔵技術

再エネ由来の電力で水を電気分解して水素を製造し、その水素を貯蔵する事が PG には求められる。水電解の中でもアルカリ水電解は最も確立された技術であり、貴金属材料が不要であることから設備コストが低く、大規模化に強みがあり、技術的課題として電流密度の向上が求められているが、小型化、ハンドリングが求められる PG には不適である。固体高分子型水電解は、高い電流密度が得られるが、貴金属材料を用いているため、コストが高い。そのため、脱貴金属電極触媒の開発や電解槽容器に関して耐食性のある安価な被覆材の開発が求められるが、特性として PG への導入には適している。高温水蒸気電解は、低温動作の各種水電解システムと比較して高効率が期待できるが、高温作動であるため、材料に高い耐久性が求められる。

水素の貯蔵形態も様々研究されているが、実用化されている水素の貯蔵方法は圧縮水素と液化水素である。液化水素は LNG に比べて 10 倍程度蒸発しやすい為、10 倍程度の高度な断熱性能が求められる。取り扱いが容易な輸送形態として期待されている有機ハイドライドは、水素化反応によりトルエンなどの芳香族化合物をメチルシクロヘキサンなどのナフテン化合物に転換することで水素を固定、貯蔵し、利用時には脱水素反応によって水素を取り出すという方法である。脱水素反応に伴い生成するトルエンなどの芳香族化合物は回収することで再利用できる。

図 11 に、水素貯蔵材料の重量水素密度と体積水素密度の図を示す。重量水素密度および体積水素密度の観点から、アンモニアは優れた水素キャリアであると言える。しかし、人体への有害性が高いことが課題となる<sup>2)</sup>。

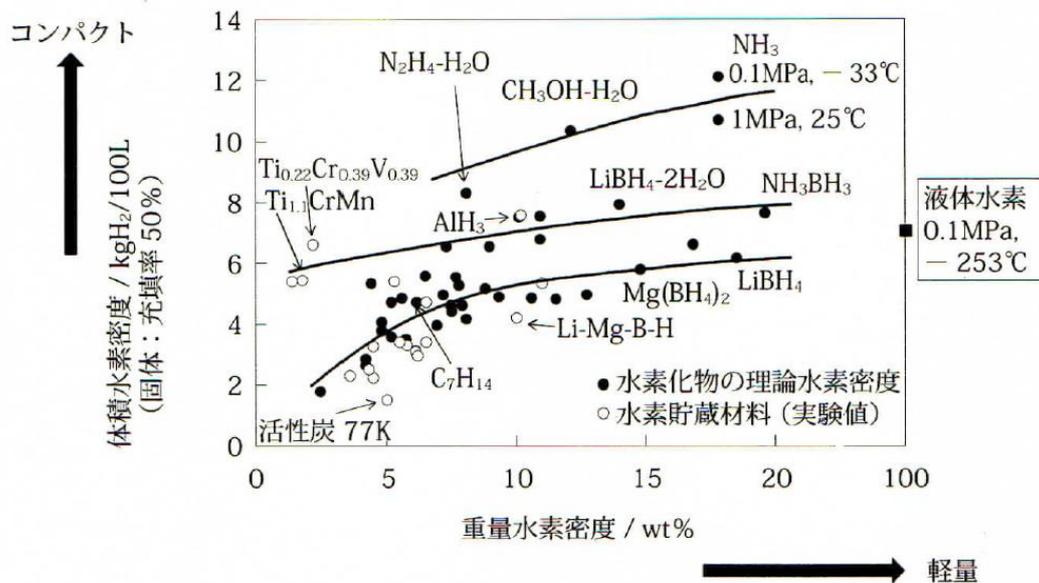


図 11 水素貯蔵材料の重量水素密度と体積水素密度<sup>2)</sup>

### 2.1.3 燃料電池の高出力化・高耐久化

東日本大震災以降、災害に強い分散型エネルギーシステムの重要性が増していることから、分散型電源である燃料電池に対する期待が高まっている。燃料電池は、フッ素系電解質膜を用いた固体高分子形燃料電池が主流である。化学的安定性を向上させるためには過酸化水素の分解に優れた物質の添加が必要であり、機械的耐久性の向上のためにはセル面内方向の膨潤を抑えることが求められる。また、低加湿運転に対しては、生成した水の逆拡散を促進することが有効となり、多孔質膜の薄膜化が目指されている<sup>2)</sup>。

### 2.1.4 蓄電池の小型大容量化・長寿命化

有機電解質系の蓄電池では、電極の劣化挙動を明らかにし、それを抑制できる技術開発が進められている。充放電時に活物質が膨潤・縮小を繰り返すため、これによる電池劣化を抑制できる技術開発も進められている。一方、全固体電池では電極活物質と固体電解質の両方が、実験と理論計算の両面から集中的に検討されている。

### 2.1.5 固定買取制度と発送電分離

太陽光発電は高コストであることがネックであったが、日本では固定価格買取制度(FIT)を機に太陽光発電の累積導入量は増加傾向にある。2007年からの累積導入量の推移を次の図 12 に示す<sup>19)</sup>。

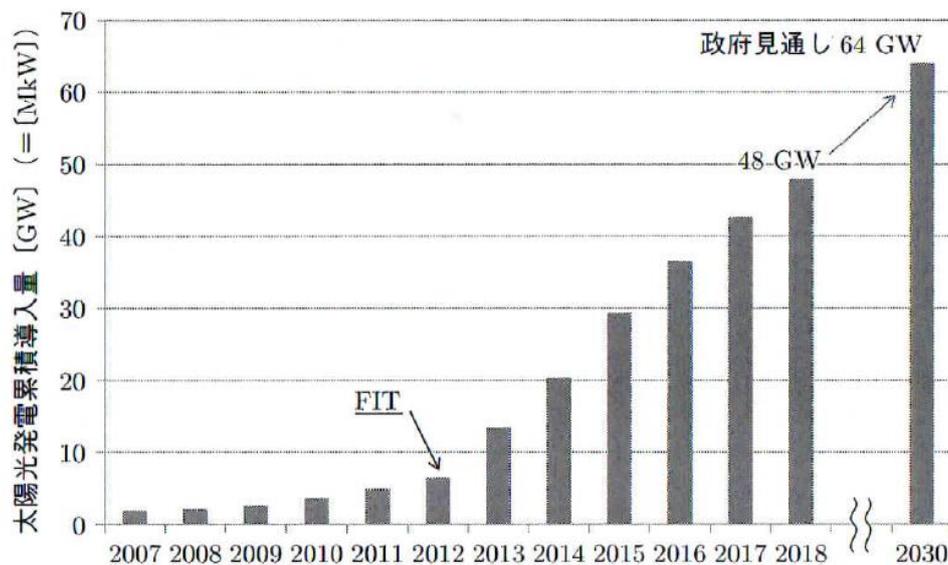


図 12 日本の太陽光発電の累積導入量<sup>19)</sup>

PGの導入に向けて、個人宅に太陽光パネルなどを設置した場合、太陽光発電による余剰電力が発生するため、自家消費が求められる。自家消費とは、太陽光発電などによる余剰電力を蓄電池などに貯め、必要時に放電することで、余剰電力を自らの電力消費に取り入れることであり、自家消費を促進する技術としてEMSが期待されている。EMSとは情報通信技術を用いて、使用電力量の見える化、節電のための機器制御、太陽光発電や蓄電池の制御などを行うエネルギー管理システムである<sup>20)</sup>。

## 2.2 物質循環

### 2.2.1 プラスチック製品の製造・リサイクル

国内におけるリサイクル率は、マテリアルおよびケミカルリサイクルはそれぞれ22%、3%であるため合計25%となり、ヨーロッパのリサイクル率と比較すると突出して高いわけではなく標準的であると言える。物質循環の観点では、プラスチックをモノマーや別の化合物に変換して利用するケミカルリサイクルは重要であるが、その割合はわずか3%であることを考えると、現状ではケミカルリサイクルをベースとした物質循環が困難であることは明らかである。

プラスチックリサイクルが困難な場合は、焼却または埋立処分される。国内において単純焼却が8%、埋立が6%を占める。プラスチックリサイクルにおいて問題となるのが「不純物の混入」であり、例えば、マテリアルリサイクルにおいては分別によるプラスチックの種類の統一、洗浄等による不純物の除去は不可欠である。プラスチックを機能化するほど、複数のモノマーの使用や可塑剤等の化合物の添加により、比重等の違いによる機械的プラスチックの分別が困難になり、より一層リサイクル率の低下が予想される。リサイクル率を向



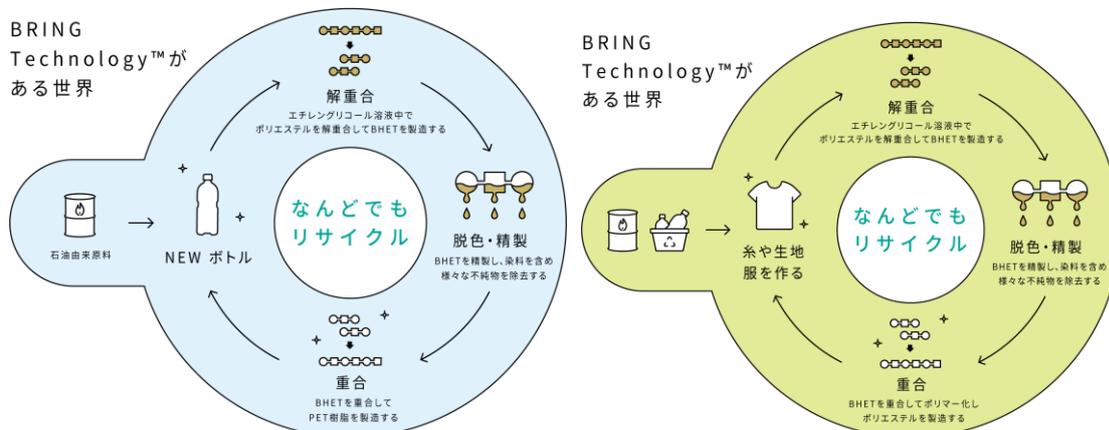


図 14 ケミカルリサイクルの流れ<sup>22)</sup>

### 2.2.3 アミノ酸の製造

アミノ酸はカルボキシル基とアミノ基を有する化合物の総称であり、 $\alpha$ -アミノ酸はカルボキシル基とアミノ基が同じ炭素原子に結合したものを指す。食品や医薬品などに幅広く利用される有用な化合物である。特に、生体には必須の $\alpha$ -アミノ酸が20種類存在し、継続的な摂取が必要である。そのため、 $\alpha$ -アミノ酸を含めて人工的に合成する方法は古くから研究がなされてきた。従来法である Strecker 法や Zelinsky-Stadnikoff modification では、毒性の高いシアン化水素やシアン化物イオンを用いてカルボキシル化を行っていた。有害な物質を使用しないクリーンな合成プロセスが求められる。毒性の高いシアン化物や化学量論量の有機金属試薬を必要としない合成プロセスとして、有機電解合成による $\alpha$ -アミノ酸合成法が報告されている。

### 2.2.4 アンモニア合成

アンモニアは肥料、化学薬品、高分子の原料としての重要な役割を担っている。PGにおいても、農作物の肥料および有機化合物の原料として重要なビルディングブロックとなる。アンモニア合成については、ハーバー・ボッシュ法に知られるように、空気中の窒素からアンモニアを生成する技術が確立されている。しかし、高温・高圧(370~510°C、14~30 MPa)を必要とする<sup>23)</sup>。特に、PGでの利用が見込まれる水電解由来の水素ガスは常圧であり、昇圧にエネルギー消費を要するため、PGにおいては望ましくない。低圧でも活性を示す触媒の開発も進められているが、強力な反応場を提供し常温・常圧といった温和な状況下で反応を進めることができる電気化学プロセスに期待が寄せられる。

### 2.2.5 3D プリンターにおけるリサイクル材利用の現状

P&G は同社製品の使用済プラスチック容器から再生したリサイクルプラスチック (PP)

を一部原料として使用し、協力会社（4社）とともに、3Dプリンターで制作するフェイスシールドを寄贈したことを公表している<sup>24)</sup>。また、キャノンエコロジーインダストリー（Canon Ecology Industry Co.）は、市場から回収した複合機の外装・カセットペディスタルのリサイクルプラスチックを原料としたリサイクルプラスチック100%の3Dプリンター用フィラメント2種類「PC+ABS」「HI-PS」を独自に開発したことを発表した<sup>25)</sup>。いずれの場合においても、市場から回収した自社製品の利用であり、材料の素性や清浄度の管理された材料である。粉碎・再溶融したのみで再重合などは行われていない。

## 2.3 水循環

### 2.3.1 海水や河川、雨水の飲料水化技術

PGでは、小規模な浄水設備での浄水技術が必須となる。膜分離法により飲料水を得るには、逆浸透膜（RO膜）による海水の淡水化や精密ろ過膜（MF膜）、限外ろ過膜（UF膜）を用いた浄水技術が必要となる。近年では、海水の淡水化により新たに顕在化してきた問題について述べる。

#### 2.3.1.1 海水の淡水化による新たな問題<sup>26,27)</sup>

海水の淡水化には、RO膜を利用する手法が多く取り入れられている。このRO膜の性質上、淡水と同時に濃縮された高濃度塩水（ブライン）が排出される。このブラインは、通常の海水と比較して塩分濃度が高いため、ブラインの排水域にて溶存酸素（OD）を消費するブライン底流を形成する可能性がある。ブラインの影響を調査したワーヘニンゲン大学のEdward Jones博士は、「ブライン底流が、受水域の溶存酸素を枯渇させる。塩分濃度が上がって溶存酸素量が下がれば、底生生物に甚大な影響を及ぼし、結果的には食物連鎖全体にまで影響するという事態も起こり得る。」との警告をCleanTechnicaのCarolyn Fortunaに語っている。また、淡水処理における排水は、ブラインだけでなくスケール防止剤や防汚剤などの有害な化学物質も含まれており、これらが海洋生物や海の生態系に悪影響を与える可能性も指摘されている。RO膜による分離精製は、必ず破棄される不必要な処理水が生じる。PGへの利用を考えた場合も、不必要な処理水を安全かつ低コストで循環させる必要がある。

### 2.3.2 し尿を含む汚水の浄化技術

汚水・排水処理においても上記の浄水技術と同じくRO膜、UF膜、MF膜が使用されているため、ここでは処理方法に着目する。

#### 2.3.2.1 生物学的な処理

し尿を含む汚水の処理手法として、生物学的な処理法が挙げられる。この生物学的処理は、以下の7つの手法に分けられる；①活性汚泥法、②生物膜法、③担体法、④嫌気性処理法、⑤生物学的消化脱窒法、⑥生物学的脱リン法、⑦アナモックス法。いずれの手法においても、

細菌・カビ・原生動物などの生物群を用いてし尿を含む有機性排水の処理を行う。このとき、②生物膜法と③担体法では、生物群が膜や担体に担持されており、自由に処理槽（反応槽）内を浮遊することはない。

生物学的な処理は、対象となる生物群が有機性の汚染物質を分解するため、生物群にとって分解しやすい環境を整える必要がある。また、処理環境中に存在する微生物の大多数が一般的な寒天培地などで培養できないとされており、培養可能な微生物の割合が多い活性汚泥においても1～15%に留まる<sup>28)</sup>。つまり、未知微生物群が、活性汚泥の中に存在し、有機性汚染物質を分解していることになる。この生物学的な処理を更に効率的に進めるには、微生物群に対して詳細な理解を深め、排水処理プロセスにフィードバックする必要がある。更に、抗菌剤、抗生物質、解熱鎮痛剤など生物学的な処理が出来ない物質の除去方法についても検討を行う必要がある。

#### 2.3.2.2 物理化学的な処理

物理学的な処理として、①沈降分離、②凝集分離、③浮上分離、④ろ過、⑤膜分離、⑥活性炭吸着、⑦酸化分解、⑧消毒の8つの手法が挙げられる。多くが液中に存在する固物質の表面電荷や比重などを利用することで分離を行っている。活性単吸着法は、微量有機物質の除去に極めて有効であり、多くの浄水場で用いられている。

酸化分解法では、オゾンやOHラジカルの強い酸化力を利用して汚染物質を酸化分解する。特に、酸化力が強いOHラジカルでは、生物学的処理により分解し難い物質も分解が可能であり、ダイオキシン類や農薬に対しても大きな効果が期待される。OHラジカルの形成には、紫外光や超音波<sup>29)</sup>を照射したり、試薬を用いたフェントン反応<sup>30)</sup>を利用したり、ペルオキシ二硫化イオンに紫外光を照射<sup>31)</sup>したり、プラズマを照射する<sup>32)</sup>ことで得ている。ただし、PGの水循環を担うには、プラズマ処理に限らず本格的な利用に向けては、処理量、処理効率、装置コスト、ランニングコスト、メンテナンス周期などを解決する必要がある。

電解処理により汚水・排水を処理する手法も確立され、実排水での運用例を以下の表2に示す。

表 2 実排水に対する電解処理事例<sup>33)</sup>

| アノード<br>材質  | カソード<br>材質 | 処理対象                     | 初期 COD <sub>o</sub><br>[g/L] | 電流効率<br>[%] | エネルギー効率                               | 除去率<br>[%]                  | 排水中 Cl <sup>-</sup><br>濃度 [g/L] |
|---|------------|--------------------------|------------------------------|-------------|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Ti/Pt   | SUS304     | オリーブ油工場排水                | 178.22                       |             | 1.27 ~ 4.73 kWh/kg ~ COD <sub>o</sub> | 41 ~ 76 (COD <sub>o</sub> ) | 24.3                            |
| Ti/Pt   | SUS304     | 一般下水                     | 1.047                        |             | 12.4 kWh/kg ~ COD <sub>o</sub>        | 89 (COD <sub>o</sub> )      | 8                               |
| Ti/Pt   | Pt         | 化学工場排水                   | 1.361                        | 18          |                                       | 40 (COD <sub>o</sub> )      |                                 |
| Ti/Pt   | Ti/Pt      | 製革工場排水 (最終処理水)           | 0.093                        | 12          |                                       | 65 (COD <sub>o</sub> )      | 1.84                            |
| Ti/Pt   | Ti/Pt      | 製革工場排水 (二次処理水)           | 0.235 ~ 0.458                | 18.2 ~ 25.8 |                                       | 62 ~ 64 (COD <sub>o</sub> ) | 2.47 ~ 2.56                     |
| Ti/Pt   | Ti/Pt      | 製革工場排水 (原水)              | 1.774                        | 6.1 ~ 7.4   |                                       | 46 ~ 70 (COD <sub>o</sub> ) | 2.562                           |
| Ti/Pt-Ir  | Ti/Pt-Ir   | 製革工場排水 (最終処理水)           | 0.146                        | 25          |                                       | 57 (COD <sub>o</sub> )      | 1.846                           |
| Ti/Pt-Ir  | Ti/Pt-Ir   | 製革工場排水 (二次処理水)           | 0.176                        | 6.9 ~ 9.4   |                                       | 19 ~ 43 (COD <sub>o</sub> ) | 1.935                           |
| Ti/Pt-Ir  | Ti/Pt-Ir   | 製革工場排水 (原水)              | 1.774                        | 21          |                                       | 11 (COD <sub>o</sub> )      | 2.562                           |
| Ti-Ta-Pt-Ir   | SUS316L    | オリーブ油工場排水                | 1.475                        |             | 32.2 ~ 82.1 kWh/kg-COD <sub>o</sub>   |                             | 塩分 1 ~ 4 %                      |
| 鉄   | 鉄          | 煙草工場排水                   | 1.120 ~ 1.245                |             | 55.6 ~ 116 kWh/kg-COD <sub>o</sub>    | 42 ~ 60 (COD <sub>o</sub> ) | 0.460                           |
| Ti/Ru <sub>0.5</sub> Ti <sub>0.5</sub> O <sub>2</sub> | SUS304     | 繊維工場排水                   | ~ 0.225                      |             | 154.0 ~ 822.3 kWh/kg-TOC              |                             | 3.55                            |
| Ti/RuO <sub>2</sub>                                   | SUS304     | オリーブ油排水                  |                              | 7 ~ 48      |                                       | 17 ~ 93 (COD <sub>o</sub> ) | 0.800                           |
| Ti/RuO <sub>2</sub>                                   | Ti         | 蒸留所排水                    | 9.54                         | 7           | 2.82 kWh/kg-COD <sub>o</sub>          | 89.62 (COD <sub>o</sub> )   | 35.5                            |
| Ti/RuO <sub>2</sub><br>BDD                            | Ti<br>Ti   | 下水・繊維工場排水の RO 膜<br>処理濃縮液 | 0.151 ~<br>0.171             | 15<br>35    |                                       |                             | 0.595 ~<br>0.804                |
| BDD   |            | 自動車工場油含有排水               | 2.57                         | 61 ~ 95     |                                       | 99 % (COD <sub>o</sub> )    |                                 |

電解処理は、一般下水以外にも工業排水の浄化にも有効な手段の 1 つといえる。しかしながら、電極として Pt を用いることから電極コストが広範な利用を妨げている。電解技術による汚水・排水の浄化再生は、PG と非常に親和性が高い。PG への搭載に向けて、電極触媒の選定が必須といえる。

### 2.3.3 し尿を含む汚水や海水、河川、雨水からの直接水素製造技術

直接水素製造技術は、1.3.3 でも述べたように、汚水・排水を用いる場合と海水を用いる場合でアプローチが異なる。元々、光電気化学として水の光分解に端を発する光触媒における水素製造技術に対して、これまでに数多くの研究開発がなされている。その中で、反応系中に色素や犠牲剤といった有機物質を投入することで、高効率で水素が得られることは既に一般化している。このため、既存の光触媒の系に、シャンプーなどの pH 調整剤であるトリエタノールアミン<sup>34)</sup>や、メタノールやギ酸、エチレングリコールなどを混和させる<sup>35)</sup>ことで評価を行っている。現段階では、有機化合物を電解液等に混入させた模擬的な排水を用いる場合が多く、実排水を用いた実験は非常に少ないと想像される。このため、実用化までコスト、耐久性、処理速度など多くの検討項目が残されている。特に、数多くの物質を含む実排水では、単純な系では起こり得ない吸着状態や競争反応が生じる可能性も十分にある。したがって、現時点では、し尿を含む汚水・排水から直接水素を製造できる電極触媒種および電極構造の検討が必須と言える。

海水からの直接水素製造は、酸素発生とは異なり熱力学的に近い競合反応が存在しない

ため、問題が少ないように思われるが、干渉イオンや中性領域である海水では想定するような触媒活性を得ることは難しい。近年における海水の直接分解に関する研究動向を纏めた review<sup>36)</sup>には、2016年以降に検討された電極触媒の一部が紹介されている。毎年のように新しい触媒が提案されているが、実際に商業ベースの水素製造が出来るまでには、更なる高い安定性と水素発生活性が求められている。加えて、電解槽に使用する電解質膜などの検討を行う必要がある。

他方で、海水をRO膜で淡水化した後に、電解技術により水素を製造する手法も提案されている。これは、現時点では最も現実的な選択と言えるが、RO膜の耐久性やメンテナンス、デバイスサイズなど考慮すると、可能な限り海水を直接電解し水素を得る検討を行うことが望ましいと思われる。

## 2.4 3つの循環に必要な電解技術およびPG関連技術

### 2.4.1 PGに適した反応器

PGでは利用できるスペースが限られているため、大型装置の配置は難しい。また、様々なプロセスを連続的に行うため、フロー系で他のプロセスと接続が容易なシステムが望ましい。工業的によく用いられる熱による反応は、エネルギー効率や安全性の観点から屋内で小規模の使用を想定しているPGに不向きであると考えられる。一方、電解プロセスはスイッチのオンオフによる起動停止追従性に優れ、熱による反応の暴走も起こりにくいため、PGでの使用が検討される。しかし、電解反応は電極表面で進行する不均一反応であるため、反応場はその平面に限られる。また、反応の進行には電極間での電解質の移動を必要とする。反応の原理上生じる制約を最小限にし、自由かつ高効率な電解反応を実施するため、様々な電解リアクターが考案されている。特に、マイクロフローリアクターのような非常に小さい反応器を複数接続することで、PGのエネルギー循環・炭素循環を円滑に実現できると思われる。

## 3. 当該目標に関連する研究開発の動向（全体）、海外動向及び日本の強み

### 3.1 エネルギー循環

#### 3.1.1 太陽光発電を主とした再生エネルギー利用

海外の大型プロジェクトとして、Horizon2020(欧州)、Sunshot イニシアティブ(米国)などがあり、基礎から応用研究まで広範な研究開発が行われている。一方で、日本では、劣化診断の高度化、大規模グリッドを想定したシステムの最適化が注目される傾向にあると推測される。CRDSの研究開発の俯瞰報告書では、日本、米国、中国、韓国の研究開発は、現状を維持すると評されているが、欧州は基礎研究および応用研究ともに上昇傾向と評されている。

#### 3.1.2 水素製造・貯蔵技術

II章 2.1.2 で述べたように、PG に適した水素製造技術として固体高分子型水電解が挙げられるが、貴金属材料による高コストが課題である。貴金属使用量低減に向けた研究開発として、2018 年に東芝がスパッタリング法を用いたナノ構造制御技術により省貴金属電極の開発に成功した。従来はアノードに粉末触媒およびコーティング材として数、g/cm<sup>2</sup>の貴金属が使用されていたが、この技術により 0.1 mg/cm<sup>2</sup>まで貴金属量を減らすことに成功した<sup>37)</sup>。

常温常圧でエネルギー密度が高い水素貯蔵が可能である有機ハイドライドにおいては、脱水素反応工程の触媒の耐久性が課題となっていたが、2009 年に千代田化工がラボスケールによる寿命試験にて連続 1 年以上にわたり安定的に水素発生が可能な脱水素触媒の開発に成功した。この触媒は白金を 1nm 以下のアンダーナノサイズの粒子として、アルミナ担体の表面全体にわたって高分散させた新規触媒である。2011 年にこの触媒を工業的に製造、調達できる体制を確立した。その後、パイロットプラントを建設し、2013 年から 2014 年までの間に延べ約 10000 時間の運転を行い、安定して作動することを確認した<sup>2)</sup>。

### 3.1.3 燃料電池の高出力化・長寿命化

固体高分子形燃料電池の高出力化および長寿命化の鍵となるカソード触媒開発に関しては、主に国外を中心としてナノレベルでの触媒構造制御により、使用する白金の使用量を低減しつつ、活性を最大化するような白金合金ナノ構造体の研究開発が盛んに実施されている。また、2040 年以降における固体高分子形燃料電池の普及期を目指し、触媒から貴金属を完全に排除した非白金触媒も国内外で盛んに研究開発が進められている。世界に先駆けて燃料電池車の発売に国内の自動車会社はこぎつけたが、基礎研究レベルでの研究者人口に占める中国の研究者の割合は論文の報告数から考えるとかなり高い。今後、国内の研究者が触媒開発および燃料電池自動車開発における主導権保持するためには、革新的な触媒開発が必要であろう。

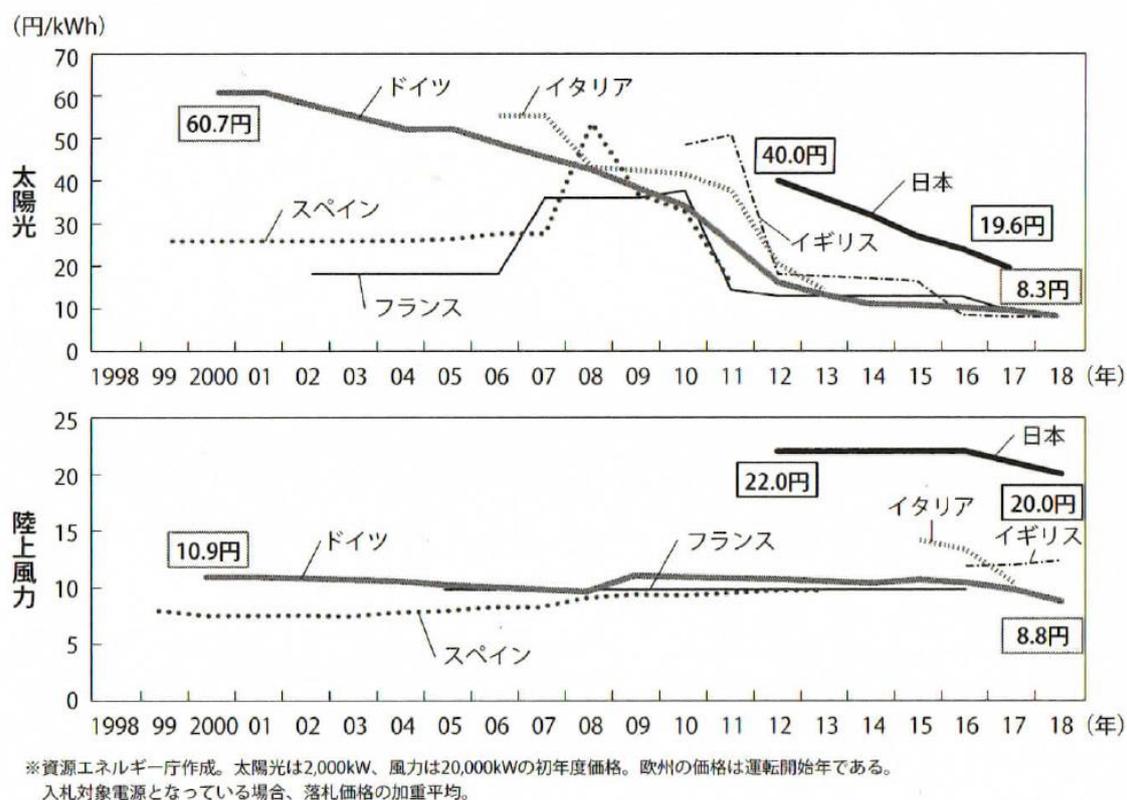
### 3.1.4 蓄電池の小型大容量化

現状では、特に、全固体電池の開発が活発である。具体的には、活物質と固体電解質間に良好なリチウムイオンの伝導経路を構築する技術開発が注目を集めている。硫化物系がメインで検討されてきたが、近年では酸化物系の固体電解質が注目されている。酸化物系は硫化物系に比べてイオン伝導度が低い、かつ電解質—活物質の界面構築に対して高い技術が要求される。現在では、NEDO や JST のプロジェクトにより産官学連携の研究開発が進められている。

### 3.1.5 固定買取制度 (FIT) と発送電分離

II章 2.1.5 で述べたように、日本の再エネの導入量は FIT を契機に増加傾向にあるが、欧州と比較するとまだ少ない。この差の大きな要因の一つはコストである。日本と欧州の再エ

ネコストの推移を次の図 15 に示す。再エネの規模をより大きくするためには低コスト化に向けた取り組みが急務である<sup>23)</sup>。



(注) 1ユーロ=120円、1ポンド=150円で換算

図 15 日本と欧州の再エネコストの推移<sup>23)</sup>

立地制約の解消のために自家消費が求められる中で、ネットメータリング制度が海外の一部の国・地域で導入されている。この制度は、自家消費を目的とする小型分散型電源の導入促進のために、電気の売買を差し引き、繰越なども行って小売料金を計算する制度である。米国などではこの制度の導入が、家庭用太陽光発電などの小型分散型電源の普及に大きな役割を果たした<sup>20)</sup>。また、米国では北東部州を中心に、ハリケーンによる停電の経験から、政府がより堅牢な電力供給システムの構築を支援しており、その支援を受け、マイクログリッドの導入が進んでいる。北東部地域に加え、再生可能エネルギーを中心とした分散電源が拡大している西海岸において、マイクログリッドの導入が進んでいる<sup>4)</sup>。

II章 1.1 で言及した非同期連系は、日本のように地域で電力の周波数に違いがあるような場合に有効であり、周波数変換所ではすでに用いられている。海外では、欧州大陸とスカンジナビア半島との間、米国メキシコ間、米国カナダ間、ブラジルとその近隣諸国の間などが非同期連系で繋がれており、中国内部には20を超える直流送電プロジェクトが計画されている。ロシアと中国の間の系統接続点にも BTB による連系が使われることが計画されて

いる<sup>3)</sup>。

欧州は図 16 のように電力システムを整理することで再エネに適した電力システムを構築している。しかし日本は孤立した島国であり、図 17 のようなくし型の電力システムであるので、欧州のシステムをそのまま適用することはできない。したがって、BTB を駆使したデジタルグリッドを用いることが重要になる<sup>5)</sup>。

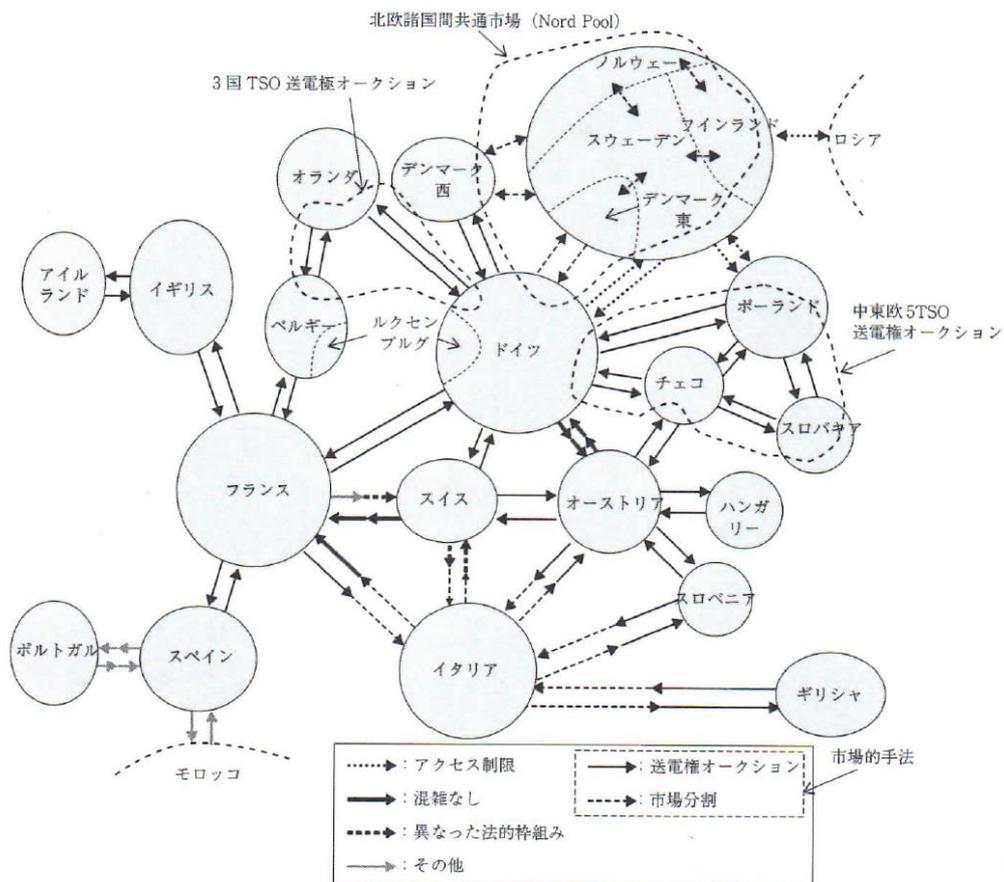


図 16 欧州の電力システム<sup>3)</sup>

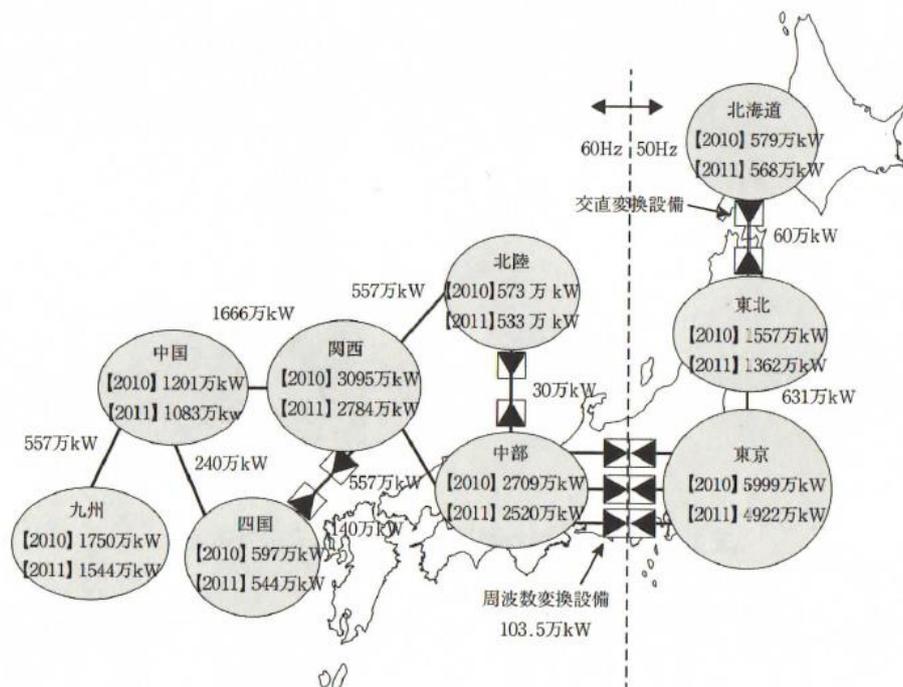


図 17 日本の電力系統<sup>3)</sup>

## 3.2 物質循環

### 3.2.1 プラスチック製品のリサイクル<sup>38)</sup>

プラスチック製品のリサイクルは、近年の中国を含むアジア諸国の廃プラスチック輸入規制の強化や、海洋プラスチック問題により、国内外を問わず重要な問題と認識されている。具体的には、我が国では、2019年5月に「海洋プラスチックごみ問題対応アクションプラン」や「プラスチック資源循環戦略」が策定され、NEDOの主導で「革新的なプラスチック資源循環プロセス技術開発」が2020年から開始されている。このプロジェクトでは、①高度選別システムの開発、②材料再生プロセス開発（マテリアルリサイクル）、③石油化学原料化プロセス開発（ケミカルリサイクル）、④高効率エネルギー回収・利用システム開発が行われている。ただし、これらは、大規模かつ多量な廃プラスチックの処理を想定していると革新的なプラスチック資源循環プロセス技術開発の基本計画から読み取れる。

また、EUでは2018年に欧州プラスチック戦略が発表され、アメリカでは、2017年にアメリカ合衆国エネルギー省エネルギー効率・再生可能エネルギー局の主導で、Reducing Embodied-energy And Decreasing Emissions; REMADEが開始され、リサイクルやリユース全般に関する資金提供が行われている。したがって、各国で廃プラスチック利用に関する研究開発が活発化しているといえる。

### 3.2.2 アミノ酸の製造

#### 3.2.2.1 フォトレドックス触媒を利用した直接カルボキシル化による $\alpha$ -アミノ酸合成

フォトレドックス触媒を用いると、CO<sub>2</sub>の一電子還元が起こり、ラジカル受容体であるアルキン、アルケン、有機ハロゲン化物、およびアミンと反応を起こすことが知られている。Fanらはベンゾフェノンケチミン誘導体のカルボキシル化による、 $\alpha$ -アミノ酸合成を達成した(図18)<sup>39)</sup>。合成手順を簡略化し、太陽光を駆動力とした合成プロセスであるが、反応基質の求核性を高めることが必要となり、化学量論量の有機金属試薬や高価な遷移金属触媒を使用しなければならないという問題点を有している。

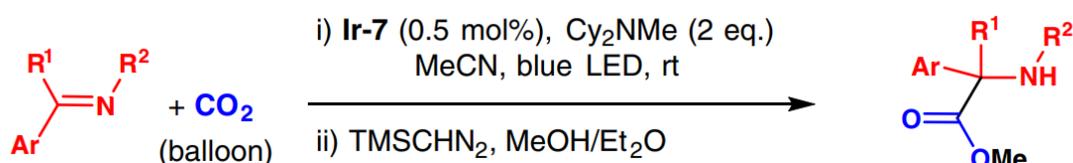


図18 直接カルボキシル化による $\alpha$ -アミノ酸合成

### 3.2.2.2 有機電解合成を用いた電解カルボキシル化による $\alpha$ -アミノ酸合成

毒性の高いシアン化物や化学量論量の有機金属試薬を必要としない合成プロセスとして、有機電解合成による $\alpha$ -アミノ酸合成法が報告されている<sup>40)</sup>。電極でのbenzylideneanilineの二電子還元による電解カルボキシル化反応を利用した合成プロセスである。しかし、benzylideneaniline還元体の安定化が必要であり、犠牲陽極を用いた合成法に限定される。

### 3.2.3 アンモニアの合成

アンモニア合成ハーバーボッシュ法をはじめとする従来のアンモニア合成触媒にはFe系触媒が利用される。しかし、Fe系触媒は高圧を必要とするため、Ru系触媒の研究が進められている。産総研では既に、Ru/CeO<sub>2</sub>(Cs-Ru/MPC)触媒の開発および実証実験(20Kg/day)が行われている。実証実験では触媒層入口温度400°C、反応圧力5.0 MPaG、H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>比1.0 mol/molで水素転化率25.4%を達成した。

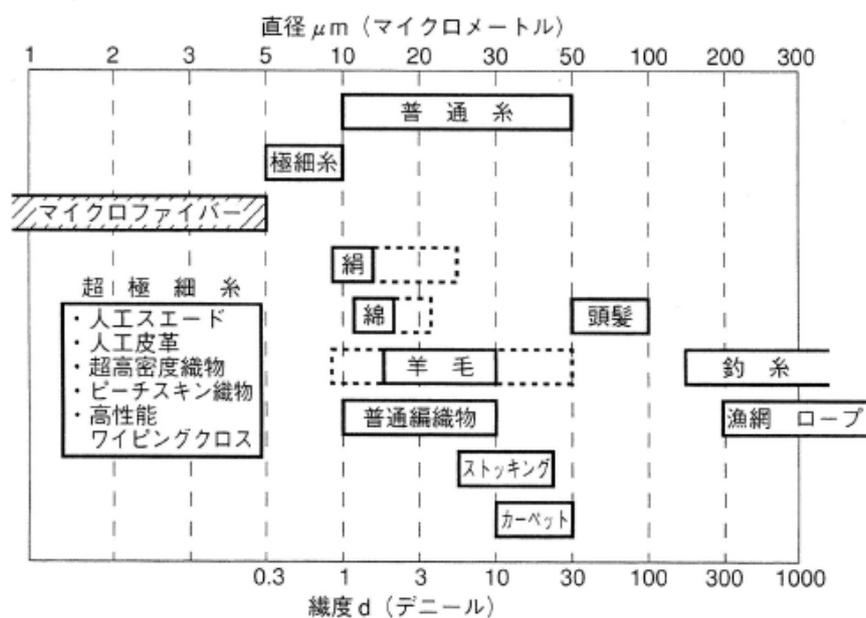
伊藤らは電解質にLi<sub>3</sub>N(0.5 mol%)を含んだLiCl-KCl-CsCl共融混合物を用いて、Niカソードおよび、カーボン質アノード(ガラス状カーボンあるいはホウ素ドーパダイヤモンド)の電極触媒で300°C、常圧の窒素下でアンモニア電解合成を達成した。この電解プロセスでは、カソードで窒素が還元されニトリドイオン(N<sup>3-</sup>)となり、水と反応しアンモニアが生成する。産業利用に向けて研究開発が進められている<sup>18)</sup>。

### 3.2.4 3Dプリンター

3Dプリンターを衣料に応用する取り組みはベルギーのマテリアライズ社など多くから発信されている<sup>41)</sup>。しかし、いずれもモードに類するもので繊維ではなく鎖帷子の様な構造となっており、実用的な衣類ではない。3Dプリンターで繊維を重ねて布を作る取り組み

としてはナイキ社が2019年に発売した Nike Zoom VaporFly Elite Flyprint がある<sup>42)</sup>。これはスニーカーのアップー部に3Dプリンターで製造した布を用いている。3Dプリンターでは網目の位置や密度を自由に設定できるため、場所ごとに最適な収縮性にできるメリットがある。しかし、製造には一般的な3Dプリンターが用いられており繊維の太さは400 $\mu$ mとなっている。

図19は衣料に用いられる繊維の太さをまとめたものである。肌に直接触れるような衣料品の繊維の太さは10~30 $\mu$ m程度である。合成繊維はノズルから押し出した樹脂を延伸することで、所望の細さまで加工している。粘弾性の問題から一般的なポリマーを10~30 $\mu$ m程度のノズルから押し出すことは難しく、MEX方式の3Dプリンターでこのような小さなノズルを用いた例はない。



出所：松井雅男 1992年3月25日付（織研新聞）

図19 衣類の繊維と太さの分類

食品特にフェイクミートを3Dプリンターで作る取り組みとしてはスペインのNovameat社とイスラエルのRedefineMeat社などから発表されている<sup>43)</sup>。いずれもMEX方式の3Dプリンターが用いられており、ノズルからたんぱく質を押し出すことで筋繊維を再現し、肉に近い食感を得ている。また、両社とも2021年中にレストランでの提供がアナウンスされている。

### 3.3 水循環

水循環に関わる国内外の最新動向については、JST 研究開発戦略センター（CRDS）が纏

める研究開発の俯瞰報告書 pp 471～pp 484 に記載されており、詳細はそちらに譲る。

PG を構成する水循環技術において、カギとなる技術の 1 つに RO 膜などが挙げられる。日本の RO 膜に関する研究開発は、1970 年代前半から行われ、1974 年からの国家プロジェクトとして行われた海水淡水化 RO 膜の国産化を目指した技術開発により世界をリードする技術となった。しかし、飲料水に対して大きな問題を抱えていない現状も少なからず影響を及ぼしている可能性もあるが、欧米や中国に対して絶対的な優位性はない。CRDS による分析からも水質汚染が問題となっている中国は、基礎研究から応用研究まで幅広く研究開発が行われている。また、日本の淡水化技術および浄水技術を俯瞰すると現在停滞傾向にある。したがって、産学協働も含めて基礎から社会実装まで推進する必要がある。

海水や污水などからの直接水素を製造する技術に関しては、研究者人口の違いもあるが報告数が多くないため日本の存在感が高いとは言えない。これらは、近年急速に報告数が増えている分野であるため、現時点で国内の研究者が目を向ければ、世界をリードする存在にも成り得ると期待している。

### 3.4 PG に適した反応器

#### 3.4.1 薄層型電解槽(キャピラリーギャップセル)

薄層型電解槽は電極間距離の近さから、支持電解質の大幅な削減を目的に設計されたリアクターである。実際に、ドイツの BASF 社は薄層型電解槽を用いてフタリドと  $\epsilon$ -ブチルベンズアルデヒドの両極電解合成の工業生産を行い、支持電解質の使用量を低減した<sup>44)</sup>。

#### 3.4.2 電解フローマイクロリアクター

化学反応を行うマイクロデバイスをマイクロリアクターといい、数十～数百  $\mu\text{m}$  程度の流路幅に設計されている。通常はフロー系であり、連続的な生産が可能である。電解合成においては、流路壁を電極として利用することで、効率的な反応を実施できる。このような反応器を電解フローマイクロリアクターという。従来のビーカーやフラスコのようなバッチ式リアクターを用いた化学反応と比較した特徴を示す<sup>45, 46)</sup>。

##### (a) 極めて大きな比表面積

反応器をマイクロ化することにより、体積あたりの電極の比表面積は非常に大きくなる。これにより、電解反応を著しく促進することが期待される。また、流路の壁面からの熱移動が迅速に起こることになるため、精密な温度制御が可能である。

##### (b) 精密な滞在時間(反応時間)の制御

フローマイクロリアクター内の流れは、流路幅が狭いために乱流状態にはならず、層流状態を維持することができる。そのため、リアクターの流路長や内部流体の流速を決めれば、リアクター内における滞在時間、すなわち反応時間を制御することが可能になる。さらにフロー系であることにより、反応後の生成物は系外へと速やかに排出されるため、生成物の分解や副反応なども抑制することができる。

### (c) 高速混合

通常、混合をするためには分子拡散が必要となるが、分子拡散に要する時間は拡散距離の二乗に比例する。そのため、反応容器をマイクロ化して分子の拡散距離を格段に短くすることで、従来の反応器では実現できないような高速混合が可能になる。

### (d) 容易なスケールアップ

フローマイクロリアクターを用いてスケールアップする場合、一つのリアクターの反応条件について最適化した後に、フローマイクロリアクターの数を増やすことで生産量を増大させることができる。このように、従来のような化学工学的検討を原則として必要とせず、容易にスケールアップを行うことが可能である。

これらの特性は工業生産に有用だと考えられているが、電解反応に必要な支持塩の添加がグリーンケミストリーの観点から望ましくないとされている。しかし、マイクロフローリアクターの電極間距離がマイクロオーダーであるという特徴を活かして、支持塩の使用量を大幅に低減する研究が進められている<sup>47)</sup>。

## III.社会像実現に向けたシナリオ

### 1.挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題

PG はパーソナルスケールの閉空間で外部から太陽光発電を主とした再生可能エネルギーのみでエネルギー循環、水循環、物質循環を最終的に達成するシステムであり、その詳細な循環統合プロセスを図 20 に示す。PG のコア技術として、全ての循環の根幹に位置する「電気化学（電解）」と形を生み出す「3D プリンター」である。

PG 実現に対するシステムとして最も上流となる課題はエネルギー収支の成立性である。PG 全体に導入される電力は再生可能エネルギーのみであり、中でもモビリティの観点から主に太陽光発電による供給が適している。太陽光発電において個人居住スペースを 20~36 m<sup>2</sup> とすると日本の気候では出力 4.5 kW 程度で一日当たりの電気量は 14~15 kWh となる。一方、現在日本人一人、一日当たりの消費電力量は試算にもよるが平均 6~10 kWh であり、4~9 kWh が水循環、物質循環に使用可能である。現在製品化されている装置でも電解による排水処理装置で 0.5~1 kWh であり、飲料化に 0.8~1kWh となる。排水処理装置の小型化の課題があるものの、現時点で太陽光発電量の 30~50%を物質循環に使用する事は十分可能となると共に、今後の性能向上、小型化による技術開発が期待される。



### 1.1.2 水素製造・貯蔵技術

現在の水素製造技術としてはナフサや天然ガスなどの化石燃料からの水蒸気改質、水素貯蔵技術として高圧水素ガスや液化水素が主流であるが、2030年頃までに副生水素や褐炭などの海外の未利用エネルギーからの水素製造技術の開発および実証、有機ハイドライドや液化水素の形態での水素貯蔵技術の開発および実証を実施していく。これらと同時進行で2040年頃を目処に、再生可能エネルギーを活用したCO<sub>2</sub>フリーの水素製造に関する開発および実証も実施していく。以上を踏まえて2040年頃からCO<sub>2</sub>フリー水素の製造、貯蔵を本格化していくというシナリオである<sup>48)</sup>。

### 1.1.3 燃料電池の技術

NEDOの水素・燃料電池戦略ロードマップに従うと、2030年以降では水素ステーションおよび燃料電池車の普及拡大期に入るとことを目指し、より高活性を示す革新的な電極触媒の開発、高耐久性を実現するためのセル開発等が進められている。カソードおよびアノード両方に触媒として白金が用いられているので、普及拡大期においては、現状の白金使用量のままでは燃料電池車の普及を妨げる可能性が考えられている。白金レスもしくは究極的には白金を一切含まない触媒開発がより一層激化すると予想される。

### 1.1.4 蓄電池の技術

2025年までに、硫化物系固体電解質を中心とした全固体電池の量産化が目指されている。これと同時に次世代型として先進硫化物系や酸化物系電解質で構成される全固体電池の開発も実施される方針である。また、2040年頃までに革新型蓄電池として、リチウム―硫黄、リチウム―空気で構成される蓄電池開発を目指し、現在も基礎研究が進められている。これらの研究開発を通して、自動車用や定置用蓄電池を本格化していくというシナリオである<sup>49)</sup>。

### 1.1.5 再生可能エネルギーの本格的な社会導入

デンマークでは、個人が風車を立てて風力発電によって電力を得る市民風車という取り組みが行われており、個人単位で発電設備を持つことはPGの実現に大きく貢献する。デンマークでこの市民風車が成功した要因は、風車メーカーによる手厚いメンテナンス体制であると考えられている。風車の投げ売りではなく、メンテナンスをきちんとサポートすることで風車のオーナーにとっても安心であるし、メーカーとしてはメンテナンスという商品を生り続けることができるので、双方に利がある仕組みである<sup>50)</sup>。

日本国内でもエネルギーの分散化の取り組みを進んでおり、愛知県豊田市では、小規模でのエネルギーの地産地消をテーマとした「豊田市スマート実証プロジェクト」が行われている。このプロジェクトでは、生活の質を落とさずに、無理なく快適に生活圏全体でのエネル

ギーと交通の最適利用を達成する次世代型の地方都市型低炭素社会システムの構築を目的としている。新築分譲した67住宅を対象に、燃料電池、家庭用蓄電池、太陽光発電などを導入し、省エネ家電をEMSによって最適に管理し、家庭の電力供給、機器制御の最適化などを実施している<sup>51)</sup>。

II章 1.1.5 で述べた BTB を応用して、周波数制約から解放され、再エネ等の自家発電設備を搭載した電力システムがデジタルグリッドである。このデジタルグリッドでは電力のやり取りが多方向にスムーズに行えるため、再エネを大量導入した際の系統安定化に大きく貢献すると考えられる<sup>3)</sup>。

## 1.2 物質循環

物質循環では、プラスチック製品であるポリマーを電解技術によりモノマーまで解重合し、再度重合過程を経て、最終的に3Dプリンターにて衣料品などに成形することを前提としている。また、フェイクミートも電解によるアミノ酸合成に端を発し、3Dプリンターにて形作られる。このため、電解によるポリマーの解重合技術と3Dプリンター技術は、物質循環においては非常に重要な要素技術である。

### 1.2.1 電気化学的プラスチック解重合（ポリマー⇔モノマー変換）

PGで炭素循環を実現させるためには、3Dプリンターのフィラーに使用されるポリ乳酸やポリエチレン等の汎用プラスチックを小規模レベルで分解する必要がある。プラスチックの油化技術は大掛かりな設備投資と大量の廃プラスチックの確保が必要となるため、PG向き技術ではなく、小規模で家庭内でも実現可能なプラスチック解重合(分解)技術開発が必要である。電気化学的手法によるポリマー解重合システムの利点は、反応制御が容易さ(電圧印加の制御)、メンテナンスの容易さ(電極の抜き差し)、再生可能エネルギーとの親和性等があるため、高活性触媒が開発できれば、パッケージ化が可能になり、PGに適した電解システムが開発できると考えられる。

現時点での電気化学的プラスチック解重合の取り組みとして、例えば、アノードでのポリプロピレン電気化学的解重合とカソードでの水素発生を組み合わせた350°Cでの高温での電気分解が報告されており、約68%の変換効率でC1-C5炭化水素の生成が確認されている<sup>52)</sup>。この実験では、STEP (Solar thermal electrochemical process)と称して、高温条件が必要であるが、用いる電極触媒等を最適化することで、より低温での反応が実現できるかもしれない。また、ポリ(メタクリル酸)メチル (PMMA) の電気化学的プラスチック解重合の予備実験として、モデル化合物としてピバル酸メチルの電解および水素発生も報告されている<sup>53)</sup>。モデル化合物のPt電極表面での電解の進行を確認してはいるが、ポリマー(PMMAを含む)の溶解性や分解生成物による被毒および活性低下を回避する方策が必要である。他にも、ポリ乳酸の原料および加水分解生成物である乳酸の電気化学的酸化も微生物<sup>54)</sup>やイリジウム触媒<sup>55)</sup>を用いて達成されている。なお電気化学システムではないが、光触媒として

酸化亜鉛ナノロッドを用いた低密度ポリエチレンからなるマイクロプラスチックの光化学的分解<sup>56)</sup>等も報告されているため、半導体電極を用いた光電解によるプラスチック解重合も原理上可能である。

これら現状での報告を踏まえると、電極触媒の生成物選択性を向上させることができれば、PGで電気化学システムを用いたポリマーの解重合は十分に実現可能であると考えられる。

### 1.2.2 電解によるアンモニア合成

PGにおいてアンモニアは肥料に利用されることを想定しているが、その空間的制約から電解による合成法が最も適している。SPE型電解槽を用いたアンモニアの電解合成においてSPEと作用極の電極触媒が検討されているが、I. AmarらはSPEとして混合 $\text{NH}_4^+/\text{H}^+$ 伝導体Nafion膜を利用し空気と水から常温・常圧でアンモニアの生成に成功した<sup>57)</sup>。水の電解酸化により生成したプロトンがカソードで還元され、カソード電極触媒上に吸着した窒素と反応し、アンモニアが生成する。1.6Vという水の電気分解と同等の電圧印加で最大のアンモニア生成速度となる、エネルギー効率に優れた電解法である。更なる省エネルギー化、生産性の向上のため、触媒や反応器の改善によってPGの制約をクリアするアンモニア合成法を確立する必要がある。

### 1.2.3 電解によるアミノ酸合成

アミノ酸合成はPGにおいて食物供給に繋がるため、十分な生成量を確保する必要がある。このキーとなる研究として近年Naito等はベンズアルデヒドとアニリンを出発基質とし、脱水剤を用いてベンジルアミンを系中で発生させた後、電解フローマイクロリアクター中にて電解カルボキシル化を行い、 $\alpha$ -アミノ酸の連続フロー合成を達成した<sup>58)</sup>。フローマイクロリアクターを用いた反応であるため、電解還元を受け生成するカルボキシラートアニオンの即時的な系外排出により、犠牲陽極などの安定剤を必要としない合成プロセスである。PG内で運用可能なレベルに達する為には、さらに電解条件、触媒条件の検討を重ねることが必要である。

### 1.2.4 3Dプリンター技術の確立

3Dプリンターに限らずポリマーを10~30 $\mu$ 程度の繊維に延伸なしで直接ノズルから押し出して成形することは難しい。この手法で衣類を造形するためには、ポリマー自体の物性をドラスティックに変更する新たな技術もしくは、延伸機構を造形ヘッド内に盛り込むなどの工夫が必要となる。

MJT方式ではインクジェット(以下IJ)ヘッドを用いて材料を吐出する。3Dプリンターに用いられるIJヘッドのノズル径は20 $\mu$ m前後であり、所望の径と同程度である。MJTでは通常、ポリマーではなくモノマーを吐出し、造形面に着弾した直後にUVを照射して重合す

ることで硬化させる。IJヘッドから吐出された液体は吐出直後は柱状であるが、数十  $\mu\text{sec}$ . 後には表面張力で分断、凝集して滴状になる。この方法で繊維を造形するためには柱状の時点で固化させること、さらに空中を飛翔する繊維を所望の位置に堆積させ前層に密着させることが課題となる。

もし、何らかの方法で短い繊維が液中に分散するような状態を作ることができればSL方式の3Dプリンティングが可能となる可能性もある。しかしこの方法では均質な布しか造形できない。前述のNike Zoom VaporFly Elite Flyprintの様に3Dプリンター特有の機能性の高い布を造形することはできなくなる。

フェイクミートの造形に関しては前述のようにすでに商業ベースでの活動が開始されようとしており、社会的な要請次第では10年以内に広く普及する可能性もある。しかし、原材料は植物由来のたんぱく質であり、ここに合成物質を持ち込むハードルは高い。

特に肉を食する等行為自体、単に栄養摂取というだけでなく嗜好的な意味合いも強いことから、単に安全性の確保だけではなく風味・風合いといった嗜好品としての要求にもこたえられるものを作る必要がある。

### 1.3 水循環

各生活空間で水循環を実施することを念頭におくと、小型、迅速、低コスト、メンテナンスフリーが望まれる。一般に浄化技術は、様々なフィルターを用いて実施されているが、安全性、システムの規模、コスト、メンテナンス性などを考えるとPGには不向きである。特に、既存のろ過技術では、医薬品などを分解・除去することが出来ないため飲料用にも周辺環境に戻すこともできない。そこで、PGでは比較的に小型、迅速、低コストの電解技術の水循環技術の中心に据える。

#### 1.3.1 し尿を含む生活排水および周辺環境水の電解による浄化技術の確立

現在、全国の一人当たりの平均生活用水使用量は284 L/dayと国土交通省の「令和元年版日本の水資源の現況」に報告されている。この量は、既に開発が進んでいるし尿から飲料水を得る技術だけでは賅えない。このため、284 L/dayを達成するには、し尿を含む家庭から排出される全ての排水を循環する必要がある。また、各生活空間に設置することを想定すると、この排水浄化システムは小型である必要があり、出来る限りメンテナンスフリーを実現する必要がある。更に、浄化システム全体の寿命は、30年以上となることが望ましい。

実際の生活排水には毛髪などの固形物が存在する。このため、ある程度の大きさの固形物は、フィルターにより分別する必要がある。分別された固形物は、他の有機廃棄物と併せて資源化を行う。したがって、尿に含まれる無機物イオン、有機物、細菌、ウイルス、医薬品や生活排水に含まれる界面活性剤、無機物イオン、有機物イオン、化学物質の浄化が期待される。

現在、排水処理の一種として電気分解が検討されており<sup>59-61)</sup>、一部実用化されている。

ただし、多くの場合に電極として板状の金属や酸化物が用いられている。これらの結果から、電解により排水を浄化することが可能であると判断されるが、PGに導入するには更なる高効率化が必要である。このため、PGでの水循環を実現するには、反応場が多く長期安定性に優れた新たな電極触媒の開発が求められる。

### 1.3.2 微生物を利用した電気化学的発電および水素発生（し尿からの水素発生）

有機廃棄物を燃料として用い、電気化学的に発電およびエネルギーとなる水素を発生させることができれば、PGにおける水循環だけでなく、エネルギー循環・物質循環の実現に対しても大きく貢献達成できると期待される。

例えば、触媒としての微生物と電極を組み合わせた微生物燃料電池を用いることで発電することが可能である。微生物が有機物を分解する際に放出される電子をアノードで集め、カソードで酸素を還元することで水を得る。下水処理への導入が検討されており、抵抗  $27\Omega$  接続時において平均約  $0.7\text{ W/m}^3$ -MFC20%充填時の電力生産を達成した報告がある。<sup>62)</sup> アノードの開発が進められており、グラフェンやカーボンナノチューブなどのナノ炭素材料を電極基板とした電極開発が進められている<sup>63, 64)</sup>。微生物を用いる場合は、微生物の種類にもよるが基本的には  $\text{CO}_2$  として分解、放出されるため、排出される  $\text{CO}_2$  を固定化する direct air capture (DAC) 技術および固体高分子膜 (PEM) を用いたフロー型  $\text{CO}_2$  電解還元<sup>65)</sup> の融合が必要である。現状は  $1\text{ L}$  を超えるスケールでの実証例がなく、研究に用いられてきたセル構造が最適でないことから、対費用効果などの実用性は評価しにくい。今後は燃料電池セルや PEM 型水電解セルの知見を活かした最適なセルを設計し、実用性を検証する必要がある。

カソードでの反応を水素発生反応(プロトンの還元)とすれば、同様のセットアップで電圧の印加(エネルギー供給)は必要であるが、水素を発生させることが可能である。グルコースなどの単純有機物をはじめ、家畜の排泄物、混合都市ごみの液分(LPW: The liquid fraction of pressed municipal solid waste)を電解した例がある<sup>66)</sup>。LPWの電解では、 $1\text{ g}$ の分解された有機物からおよそ  $60\text{ mmol}$ の水素が生産されている。投入した有機物の約8割が分解されており、生物化学的廃棄物処理装置として機能することが確認された。微生物を用いる場合、微生物の安定性(生育条件の確保)と反応速度が課題である。PGを実現する場合は、微生物での知見を踏まえた上で、人工電極触媒を開発し、活性、生成物選択性、耐久性の向上が必要である。

### 1.3.3 海水から直接電解による水素製造

海水から直接水素を製造する技術開発は、II章1.3.3にて述べた通り、近年急激に進められている。この技術開発に関する最初の課題は、塩素もしくは過塩素酸の発生を抑えることにある。このため、海水からの水素製造を実現するには、海水に存在するアニオン種の影響を最小限とし、過電圧を低減させる電極触媒の開発が必須である。また、省スペースを実現

するには、反応効率を上げる必要がある。したがって、電極触媒の形態や触媒層の構造化も検討項目の一つとして考えられる。また、PGの水循環を想定するため、メンテナンスを行う前提としても、電極触媒等には30年程度の耐久性が求められる。

加えて、海水の直接電解における副産物といえる濃厚海水の処理または利用方法も検討する必要がある。また、電解槽内部および接続配管には濃厚海水を流通させるため、耐腐食性に優れた素材を使用する必要がある。

#### 1.4 電解槽の小型化<sup>67)</sup>

PG内で行われる電解反応を限られたスペースで完結させるために、容積が小さく連続生産が可能な反応器の開発が求められる。マイクロフローリアクターは先述した特性から、省スペースかつ精密な合成を可能とする反応器として期待されているが、反応器一つあたりの生産量は少ない。生産量を増加させるために、ナンバリングアップという手法が考案されている。これはマイクロフローリアクターを並列に接続する方法であるが、それぞれのマイクロフローリアクターへの原料の供給に課題が残されている。ポンプ自体の大きさや、流路内に析出した生成物が流路を狭めることによる圧力損失などが問題となっている。洗浄や分解が容易な前記課題をクリアする構造を持つマイクロフローリアクターを開発すれば、長期的な運用も可能となる為、PGでの利用が可能になると考えられる。

## 2. 2030年・2040年・2050年のそれぞれにおける、達成すべき目標（マイルストーン）、マイルストーン達成に向けた研究開発

2030年までに達成すべき技術的な目標を以下に示す。

エネルギー循環では、太陽光発電における発電コストを7円/kWh、実用モジュールの変換効率を25%とし、燃料電池の発電性能を6kW/L、システムコストを4,000円/kW以下に到達することを目標とする。また、HEMSで使用する二次電池は500Wh/kgおよび15年以上の長寿命化を達成する。これらの目標を達成するためには、既存技術の昇華が必要であり、2030年以外にも2040年、2050年含め、NEDOが主導している太陽光発電、燃料電池および二次電池に関するプロジェクトとの協働が必須である。

物質循環では、PET樹脂以外のポリマーをモノマーまで分解する技術の創製を目指す。また、電解技術を利用したアミノ酸合成技術の確立を目指す。更に、小規模でのアンモニア合成技術の確立も目指す。これらの目標を達成するには、ポリマーの完全分解に関する知見を深める必要がある。加えて、各電解技術に適した電極触媒の開発が必須といえる。

水循環では、し尿や生活排水などから100L/dayの飲料水を生成できる水循環システムの確立を目指す。また、住宅用規模へのスケールダウンも同時に検討する。加えて、他循環との密接に関連する有機廃棄物や海水からの直接電解による水素製造技術の確立も目指す。これらの目標を達成するには、各電解技術に適した電極触媒や電解槽の開発が必要である。PGシステムに関してパーソナルスケールでの使用による電解槽、燃料電池の小型化、マ

イクロリアクター技術の確立をする。エネルギー、水循環のシステムの確立、物質循環の原理的実証をする。

2040年までに達成すべき技術的な目標を以下に示す。

エネルギー循環では、実用モジュールの変換効率を30-35%とし、燃料電池の発電性能を7-8kW/L、システムコストを3,000円/kW以下に到達することを目標とする。また、HEMSで使用する二次電池は600Wh/kgおよび15年以上の長寿命化を達成する。

物質循環では、PET樹脂以外のポリマーを95%以上モノマーまで分解する技術の確立を目指す。再生可能な3Dプリンター樹脂による高分子材料循環を確立する。

水循環では、200L/dayの飲料水を生成できる水循環システムの確立を目指す。また、住宅用規模へのスケールダウンおよび長期耐久性・低コスト化を実現するために必要な技術開発の方針についても同時に検討する。

PGシステムに関してパーソナルスケールでの物質循環のシステムを確立し、三循環の統合システムの稼働を達成すると共にエネルギーバランスを成立させる。

2050年までに達成すべき技術的な目標を以下に示す。

エネルギー循環では、太陽光発電実用モジュールの変換効率を40%とし、燃料電池の発電性能を9kW/L、システムコストを2,000円/kW以下に到達することを目標とする。また、HEMSで使用する二次電池は700Wh/kgおよび15年以上の長寿命化を達成する。これらの目標を達成するためには、既存技術の昇華では達成することが難しいと思われる。このため、ゲームチェンジャーとなり得る要素技術の開発が必須である。

物質循環では、電解技術を利用することでポリマー⇄モノマー変換が自在に行うことが出来る技術を確立する。また、アミノ酸およびアンモニア合成を電解技術により実現し、3Dプリンターによりフェイクミートなどを作製する手法を確立する。

水循環では、各生活空間規模の小型水循環システムの構築を目指す。この目標を達成するには、水循環に関する各要素技術が確立されており、長期耐久性、低コスト、メンテナンス性を保証できる水準である必要がある。

PGシステムに関してパーソナルスケールでの三循環のシステムのコスト削減とパッケージング化により商用化する。

### 3. 目標達成に向けた国際連携の在り方

目標設定に応じて国際連携の在り方が大きく変わるため、PGに関しては国際連携に際して慎重な判断が必要である。

国内における過疎化、少子高齢化、都市機能集中化に対する解決案として、PGを国内で定着させるのであれば無理をしてまで国際連携を推進する必要性はない。水循環、エネルギー循環、炭素循環に関連する電解および燃料電池等に関する研究開発競争は非常に熾烈であるため、個々の技術は今後着実に進展するであろう。それらをいかに統合してPGを構築するのが重要となるため、もし海外の企業等に主張となる技術の特許等で抑えられた場

合には、国際連携を回避できないが、国内技術で十分な場合は特に国際連携の必要はない。ただアメリカの起業から製品化までの速度は日本のそれとは比較にならないくらい速いため、そのようなスピード感を持ってアイデア先行で研究開発を推し進めるのであれば、海外の投資家とのコミュニケーションは必要不可欠であろう。

また、もし PG を海外へ輸出、販売、もしくは海外でも同様な技術が独自に開発されるになれば、PG の国際標準規格化、法整備等が必要になるかもしれない。PG は居住地の制限からの解放と同時に、自然災害や内戦等によって家を手放さないといけない人たちへ、快適かつ循環可能な家(PG)を提供可能である。例えば、紛争や難民地域の NGO 団体との連携等は検討に値すると考えている。

#### 4. 目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方

PG は、エネルギー循環、物質循環、水循環の異なる 3 つの循環にて構成される。このため、これまでの研究課題のように単一の分野だけで実現できる技術ではない。特に、物質循環では、研究を推進する上で新たな学際分野を構築する必要があると考えられる。このため、高分子化学の知識だけでなく、電気化学や生物学と言った幅広い知見を有した研究者との協働が必須である。また、PG は各家庭に設置されるシステムであるため、3 つの循環を統合するシステムを設計するシステムエンジニアの力も必要となる。したがって、PG を実現するには、分野・セクターを超えた協働無くして実現できないと考える。

#### 5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)

(目標達成に向けて取り組むうえでの倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

エネルギー・物質・水の 3 つの循環から構成される PG を社会に実装していくためには、いくつかの解決すべき社会的課題が存在する。

エネルギー循環では、生活空間毎に、太陽光や水素によって発電し、蓄電池との併用によって、安定的なエネルギー供給を行うシステムが構築される。そこでは、技術的な課題に加えて、発電コスト、固定買取制度 (FIT)、発送電網、地域電力マネジメントなどに関する課題の解決が必要になる。

ZEH (Zero Energy House) に代表されるように、自宅でのエネルギー需給は進んできているが、PG で想定する 3 つの循環システムに必要なエネルギー量を賄うためには、移行期間として、再生可能エネルギーコストを支える新たな固定買取制度 (FIT) の設定が必要である。また、PG は、エネルギー消費部門であると同時にエネルギー生産部門でもあることから、PG 間および IG 間でのエネルギー需給バランスを調整するシステムとこれを管理するための地域電力会社などの設立が必要である。

物質循環では、大気中の CO<sub>2</sub> を原料の一つに利用しながら、衣料品およびプラスチック製品のリサイクル、アミノ酸合成に基づくフェイクミートの製造、有機廃棄物を活用した農作物の生産などを行うシステムが構築される。そこでは、技術的な課題に加えて、社会イン

フラとしての廃棄・リサイクルシステムのスリム化、農産物・食品・プラスチック産業の知財産業への移行などへの対応が必要である。

PGによって、家計部門からの生ごみ、古着、プラスチックごみなどの排出はなくなるが、これ以外の家計部門からの廃棄物の処理・リサイクルシステムについては、本プロジェクトでは考慮していないことから、PGと既存の廃棄物処理システムとの役割分担や移行プロセスのあり方を議論する必要がある。また、食品や衣料品については、PGごとに、栽培方法、レシピ、デザインなどのデータに基づいて生産されることから、こうした製品のPG外部からの購入は限定的なものになり、当該産業は知財産業化していくが、自然資本の中での農産物や食品の生産などは、生態系保全、地域文化の形成などの多元的な機能も持っていることから、PGとの機能分担については、技術的な進展を踏まえながら、社会的合意を形成していく必要がある。

水循環では、安全な飲み水を確保し、汚水の排出をなくすことができる水の完全循環システムが構築されるが、そこでは、技術的な課題の解決に加えて、既存の巨大な上・下水道施設からの転換を行っていく必要がある。

人口が減少していく日本社会において、上・下水道施設は、増大していく維持管理コストや取水コスト、利用料金の地域・世代間格差の大きさなどが重大な問題となっている。独立分散型社会インフラであるPGは、こうした課題を解決できる新たな社会インフラである。ただし、大都市圏のために構築されている、ダム、取水施設、浄化施設、給排水網などの巨大な上・下水道システムからPGを中心としたシステムへの転換には、社会的に大きなコストがかかる。そこでは、当該設備の維持管理費用、更新、除去、費用負担などを考慮しながら、転換を進めていく必要がある。また、ダムなどは、上水施設としての機能以外にも防災、発電などのさまざまな機能を担っており、PGへの転換にあたっては、多元的な観点からの検討が不可欠である。

PGが実現する3つの循環システムは、場所、職業、年齢、家族構成、収入などを問わず、人々が、環境に負荷を与えないで、快適に生活していくための新たな社会インフラや産業基盤であり、居住空間の分散を可能にすると同時に、都市圏においては、それぞれが自立した社会インフラを持つグリッドから構成される、ネットワーク型都市構造を創り上げることができる。既存の社会インフラから、PGに基づく新たな社会インフラへの転換を進めていくためには、PGを導入するエリアを対象として、グリッドの規模と機能、環境への影響、生活の安全性、ライフサイクルコストといった多様な側面をシミュレーションすると同時に、地域住民、行政、事業者などのステークホルダーで情報を共有し、社会的な合意形成を図っていくことが不可欠である。

#### IV. 結論

ムーンショット型研究開発事業ミレニアプログラムにおける新たな目標検討のためのビジョンとして、本調査研究では2050年までに、全ての人がエネルギー・物質・水をパーソ

ナルに循環させる自立型生活空間を得られる社会を実現することを提言する。この実現のため、我々は「パーソナルグリッド(PG)」というコンセプトを提唱し、分散型社会の構築に寄与する。PG およびそれが目指す分散型社会がもたらすのは、人間生活の環境への調和化、外的災害からの生命の防御、文化的自由への選択肢の保障である。

この 30 年間、歴史的に科学技術と人間社会の流れはパーソナル化の方向に進んできた。科学技術は本質的に衰退することは無い。その為、この流れは 30 年後に向かい更に発展し、更に加速することが予想される。PG は時代の流れの中で、必然的に要求されるシステムである。PG の中核に位置する電解技術、燃料電池技術は現在、日本が世界のトップレベルであり、更にシステム統合化は日本が得意とする技術の一つである。日本が PG 技術に対して世界をリードし、展開する下地は十分に出来ている。

## V. 参考文献

1. 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第2版, pp. 59, 142-151, 199-201, 森北出版株式会社(2014).
2. 高薄一弘, 水素の製造・輸送・貯蔵技術と材料開発事例集, pp. 5-186, 株式会社技術情報協会(2019).
3. 阿部力也, デジタルグリッド, pp. 94-101, 株式会社エネルギーフォーラム(2016).
4. 株式会社野村総合研究所, エネルギー業界の破壊的イノベーション, pp. 17, 73-75, 株式会社エネルギーフォーラム(2018).
5. 諸富徹, 電力システム改革と再生可能エネルギー, pp. 10, 45-54, 株式会社日本評論社(2015).
6. プラスチック循環利用協会「プラスチックリサイクルの基礎知識 2020」.
7. 保坂直紀, 海洋プラスチック, 角川新書.
8. プラスチック循環利用協会「LCA を考える」.
9. R. Geyer, J.R. Jambeck, K. L. Law, *Sci. Adv.*, 3, e1700782 (2017).
10. PlasticsEurope, *Plastics—the Facts 2020*.  
<https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>
11. Y. Ashida, K. Arashiba, K. Nakajima, Y. Nishibayashi, *Nature*, 568, 536 (2019).
12. 菅原正孝 監修, 水処理化技術の最新動向, シーエムシー出版; 松山秀人 監修, 水処理用分離膜の開発最前線, シーエムシー出版.
13. 排水汚水 処理技術集成 vol. 2, エヌ・ティー・エス.
14. 環境省 環境技術実証事業 広報冊子 自然地域トイレし尿処理技術  
<http://www.env.go.jp/policy/etv/document/index4.html>
15. 静岡県公式ホームページ, ふじのくに, 現在の富士山トイレ  
<http://www.pref.shizuoka.jp/kankyoku/ka-070/fujisanpage/toile/present.html>
16. GatesNotes THE BLOG OF BILL GATES, Why the world deserves a better toilet,

- November 05, 2018.  
<https://www.gatesnotes.com/Development/Sanitation-showcase>
17. THE WALL STREET JOURNAL, ビル・ゲイツ氏が挑む「未来のトイレ」, November 12, 2018.  
<https://jp.wsj.com/articles/SB11632224690678093907204584588870414334030>
  18. 宇宙航空研究開発機構, 宇宙ステーション・きぼう 広報・情報センター, レオナルド (多目的補給モジュール)  
<https://iss.jaxa.jp/iss/ulf2/mission/payload/mplm/#wrs>
  19. 井村順一, 原辰次, 次世代電力システム設計論, p. 3, 株式会社オーム社 (2019).
  20. 西村陽, 巽直樹, まるわかり電力デジタル革命キーワード 250, pp. 27-32, 一般社団法人 日本電気協会新聞部 (2018).
  21. プラスチック循環利用協会「2019年 プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況」.
  22. 日本環境設計 TECHNOLOGY, <https://www.jeplan.co.jp/technology/>
  23. 長山浩章, 再生可能エネルギー主力電源化と電力システム改革の政治経済学, pp. 73, pp. 97-98, 東洋経済新報社 (2020).
  24. PRTIMES, P & G/慶應義塾大学田中浩也研究室 「リサイクルプラからフェイスシールド」 エス. ラボ (株) /丹青社/テラサイクル社/ナノダックス社と協力して、全国の聾学校等へ約1万個を寄贈, 2020年6月12日  
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000031.000031986.html>
  25. CANON News & Topics, リサイクルプラスチック 100%の3Dプリンター用フィラメント2種類を独自開発, 2020年11月19日  
<https://ecology.canon/news/201119.html>
  26. CleanTechnica, Humans Worth Their Salt? The Price Of Desalination = Brine Disposal, January 17, 2019  
<https://cleantechnica.com/2019/01/17/humans-worth-their-salt-the-price-of-desalination-brine-disposal/>
  27. MIRAI PORT, 海水の淡水化～その副産物が大きな問題に, 2019年6月13日  
<https://www.mirai-port.com/planet/225/>
  28. R. Amann, W. Ludwig, K. H. Schleifer, Microbiol. Rev., 59, 143 (1995).
  29. Y. G. Adewuyi, Environ. Sci. Technol., 39, 3409 (2005).
  30. G. Chen, G. E. Hoag, P. Chedda, F. Nadim, B. A. Woody, G. M. Dobbs J. Hazard. Mater., 87, 171 (2001).
  31. H. Hori, A. Yamamoto, E. Hayakawa, S. Taniyasu, N. Yamashita, S. Kutsuna, H. Kiatagawa, R. Arakawa, Environ. Sci. Technol., 39, 2383 (2005).
  32. J. S. Clements, M. Sato, R. H. Davis, IEEE Trans. Ind. Appl., IA-23, 224 (1987).

33. 排水汚水 処理技術集成, エヌ・ティー・エス, vol. 2, pp 254
34. C. Li, H. Wang, D. Lu, W. Wu, J. Ding, X. Zhao, R. Xiong, M. Yang, P. Wu, F. Chen, P. Fang, J. Alloys Compd., 699, 183 (2017).
35. K. R. Reyes-Gil, D. B. Robinson, ACS Appl. Mater. Interfaces, 5, 12400 (2013).
36. S. Dresch, F. Dionigi, M. Klingenhof, P. Strasser, ACS Energy Lett., 4, 933-942 (2019).
37. 東芝レビュー, 特集「PEM 水電解用省貴金属電極」, 73 巻 3 号, 2018 年 5 月.
38. 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 環境部, 「革新的プラスチック資源循環プロセス技術開発」基本計画.
39. Y. Ito, T. Nishikiori, H. Tsujimura, Electrochemistry, 86, 21 (2018).
40. X. Fan, X. Gong, M. Ma, R. Wang, P. J. Walsh, Nat. Commun., 9, 4936 (2018).
41. FASHION UNITED, Materialise: How 3D printing will bring flexibility to the fashion industry, March 8, 2019  
<https://fashionunited.uk/news/business/materialise-how-3d-printing-will-bring-flexibility-to-the-fashion-industry/2019030842041>
42. KELLER SPORTS, NIKE FLYPRINT: AN UPPER MADE WITH A DEM 3D PRINTER  
<https://www.keller-sports.com/guide/nike-flyprint/>
43. UNRESERVED FOOD& DINING, 3D-Printed Steaks to Rival Impossible Foods in the Fake Meat Industry, Fake it til you make it, January 16, 2020  
<https://www.unreservedmedia.com/3d-printed-steaks-impossible-foods-fake-meat/>
44. M. Atobe, Electrochemistry, 83, 463 (2015).
45. B. P. Mason, K. E. Price, J. L. Steinbacher, A. R. Bogdan, D. T. McQuade, Chem. Rev., 107, 2300 (2007).
46. 富樫盛典, 遠藤喜重, 三宅亮, マイクロリアクタによるプロセス革新と環境負荷低減, 情報機構(2010).
47. Wats, K.; Baker, A.; Wirth, T. J. Flow Chem. 2014, 4, 2.
48. NEDO 水素・燃料電池戦略ロードマップ 2016 年改訂版  
[https://www.hkd.meti.go.jp/hokne/hydrogen/roadmap\\_gaiyou.pdf](https://www.hkd.meti.go.jp/hokne/hydrogen/roadmap_gaiyou.pdf)
49. 林 克也, 年報 NTT ファシリティーズ総研レポート, 31, 43 (2020).
50. 安田陽, 再生可能エネルギーのメンテナンスとリスクマネジメント, p. 13, 株式会社インプレス (2017).
51. 鈴置保雄, 再生可能エネルギー有効利用の最前線, pp. 268-269, 一般社団法人 エネルギー・資源学会 (2016).
52. T. Jiang, X. Zhao, D. Gu, C. Yan, H. Jiang, H. Wu, B. Wang, X. Wang, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 204, 110208 (2020).
53. N. Grimaldos-Osorio, F. Sordello, M. Passananti, P. Vernoux, A. Caravaca, J. Power

- Sources, 480, 228800 (2020).
54. I. Shitanda, K. Takamatsu, A. Niiyama, T. Mikawa, Y. Hoshi, M. Itagaki, S. Tsujimura, J. Power Sources, 436, 226844 (2019).
  55. C. Chen, J. Zhang, L. Li, K. Wang, G. Luo, Ind. Eng. Chem. Res., 56, 3560 (2017).
  56. T.S. Tofa, K. L. Kunjali, S. Paul, J. Dutta, Environ. Chem. Lett., 17, 1341 (2019).
  57. I. A. Amar, R. Lan, C. T. G. Petit, S. Tao, J. Solid State Electrochem., 15, 1845 (2011).
  58. Yuki Naito, Y. Nakamura, N. Shida, H. Senboku, K. Tanaka, M. Atobe, J. Org. Chem., (2021). <https://doi.org/10.1021/acs.joc.1c00821>
  59. G. Vlyssides, P. K. Karlis, N. Rori, A. A. Zorpas, J. Hazard. Mater., B95, 215 (2002).
  60. L. Chen, Y. Zhang, C. Ma, Chem. Eng. J., 393 124514 (2020).
  61. H. Feng, Z. Chen, X. Wang, S. Chen, J. Crittenden, Chem. Eng. J., 413, 127492 (2021).
  62. K. Iida, K. Mastubara, M. Ito, A. Mugita, N. Yoshida, Y. Genda, M. Sakoda, こうえいフォーラム, 28, 1 (2020).
  63. 加納 健司, バイオ電池の最新動向, シーエムシー出版 (2011).
  64. 渡邊 一哉, 微生物燃料電池による廃水処理システム最前線, エヌ・ティー・エス (2013).
  65. Irkham, S. Nagashima, M. Tomisaki, Y. Einaga, ACS Sus. Chem. Eng., 9, 5298 (2021).
  66. X. Xie, G. Yu, N. Liu, Z. Bao, C. S. Criddle, Y. Cui, Energy Environ. Sci., 5, 6862 (2012).
  67. 武藤 明德, 公益社団法人 化学工学会, 77, 778 (2013).