

## 気候変動問題の解決に取り組むクライメートテック — 誰が CO<sub>2</sub> 削減のためのイノベーションに投資するのか？ —

竹下 智

### ■ 要 約 ■

1. カーボンニュートラル実現のためには、既存の技術だけでは達成困難であり、革新的な新しいテクノロジーの開発・実用化・普及が必要である。その重要な担い手の一つとして、気候変動問題の解決に取り組むスタートアップ「クライメートテック（Climate Tech）」（気候変動に対処する革新的なテクノロジーの開発・事業化を目指すいくつかのセクターの総称）への期待が高まっている。
2. クライメートテックは、VC 投資における新たなフロンティアとなっている。2017 年以降のクライメートテックへの投資拡大の背景には、気候変動対策に特化したファンドの設立、著名投資家による大型ファンドの設立がある。
3. 注目分野として「CO<sub>2</sub> 除去」および「宇宙ベンチャー」があげられる。前者は化学反応を利用して大気中の CO<sub>2</sub> を回収する「DAC（直接空気回収）」や植林が含まれる。後者については、人工衛星技術を活用して気候変動問題へのソリューション提供を試みるスタートアップがある。
4. この分野では多額の投資を必要とする。スタートアップへの投資に関しては、その事業ステージに合致したエクイティ資金が必要となる。民間に任せることが出来る分野・投資については、出来る限り民間に任せ、政府は規制緩和やルール作りでサポートする、一方民間でリスクの取れない部分については、資金も含め積極的に関与する、そういった国をあげた戦略のデザインが必要であろう。

### 野村資本市場研究所 関連論文等

- ・竹下智「スタートアップ投資のフロンティアとなりつつある宇宙関連ビジネス」『野村資本市場クォーターリー』2020年夏号。
- ・竹下智「「起業家の宇宙時代」を支える新産業育成の仕掛け—X プライズ、NASA、ルクセンブルクの事例—」『野村資本市場クォーターリー』2020年夏号。
- ・竹下智「「農業・食」×「IT」×「金融」が描く未来—AgriFood Tech と FinTech を融合するスタートアップ」『野村資本市場クォーターリー』2019年夏号。

## I 「クライメートテック」とは？

### 1. 気候変動に対処するためのテクノロジー

2020 年以降、スタートアップ投資業界で「クライメートテック (Climate Tech)」というワードを目にするようになってきた。例えば、2020 年 1 月、セコイア・キャピタル (Sequoia Capital) のパートナーであるブライアン・シュライラー (Bryan Schreier) 氏が自身のツイッターで、「より多くのクライメートテックの起業家から話を聞きたい」とツイートしている<sup>1</sup>。

現状、「クライメートテック」に明確な定義があるわけではない。気候変動に対処する革新的なテクノロジーの開発・事業化を目指しているいくつかのセクターの総称として「クライメートテック」が使われており、セクター等の分類は調査会社によって異なる。例えば、クライメートテックへの投資状況をはじめて分析したとされるプライスウォーターハウスクーパーズ (PricewaterhouseCoopers, PwC) のレポート<sup>2</sup>では、図表 1 にあるようなセクター、テクノロジーをまとめてクライメートテックとしている<sup>3</sup>。

図表 1 クライメートテックに含まれるセクター・テクノロジーの例

セクター	概要
エネルギー Energy	再生可能エネルギー発電、送電網管理、代替燃料の生産・開発・販売、高効率・エネルギー集約型エレクトロニクス
モビリティ・交通 Mobility & Transport	低温室効果ガス (GHG)、航空輸送、海運、小型・大型道路輸送、マイクロモビリティ EV、バッテリー・燃料電池
食料・農業・土地利用 Food, Agriculture and Land Use	炭素集約的な動物由来の製品に代わる食品の生産方法、低 GHG 農業、低 GHG 肥料、森林再生
重工業 Heavy Industry	従来の材料 (化学物質、鉄鋼、プラスチックなど) に代わる低 GHG 素材、変革をもたらす循環モデル、リサイクル・材料効率化ソリューション
建築関連 Built Environment	高効率の家具・什器および冷暖房、スマートエネルギー消費管理、低 GHG 建設プロセス
GHG 回収・貯留 GHG Capture and Storage	大気中からの GHG 除去と貯蔵、組織や政府のカーボンフットプリントを監視・管理するシステム
気候・地球データ生成 Climate and Earth Data Generation	排出量削減に向けた地球・気候データの記録・分析、低 GHG 衛星・センサー

(出所) PwC 資料より野村資本市場研究所作成

<sup>1</sup> Bryan schreier @schreier, “We @Sequoia are actively investing in Climate Tech and Sustainability (more to come). Why? Because it is both our responsibility and a huge business opportunity (h/t@karaswisher). We’d love to hear from more Climate Tech entrepreneurs:” January 24, 2020.

<sup>2</sup> PwC, “The State of Climate Tech 2020 : The next frontier for venture capital,” September 2020.

<sup>3</sup> 他に Bloomberg NEF では、気候技術への投資を 6 つの主要な技術テーマ「エネルギー転換 (energy transition,)」 「輸送・新たなモビリティ (transport and new mobility)」 「農業・土地利用 (agriculture and land-use)」 「気候・森林 (climate and forests)」 「脱炭素化産業と建物 (decarbonizing industry and buildings)」 「循環経済と新素材 (the circular economy and new materials)」 に分類している。

世界各地で自然災害が多発するなど気候変動対策が急務となるなか「カーボンニュートラル (carbon neutrality) <sup>4</sup>」が世界的な潮流となっている。カーボンニュートラルとは、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) などの地球温暖化の原因とされる温室効果ガス<sup>5</sup> (Greenhouse gas、GHG) の「排出量の算定、削減、そして残りの排出量のオフセットのステップを通じてネット排出量がゼロであること」を指す。気候変動問題に関する国際的な枠組みである2016年の「パリ協定」では「世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べ2°Cより十分低く保ち、1.5°Cに抑える努力をする」ことを掲げている。続く2018年のIPCC (気候変動に関する政府間パネル) による「1.5°C特別報告書<sup>6</sup>」により、2050年までのカーボンニュートラル実現を目指す機運が一段と高まっている。

カーボンニュートラルを目指す上で最大の課題となるのは、まず大規模投資の必要性和資金調達の問題であろう。IRENA (International Renewable Energy Agency<sup>7</sup>) のレポート<sup>8</sup>によると (2050年までに地球温暖化を1.5°C以下に抑える) 「1.5°Cシナリオ」を達成するためには、2021年から2050年の今後30年間で131兆米ドルの投資が必要とされる。年平均にすると、毎年4.4兆米ドルの投資が必要となり、これは2019年の投資水準 (2.1兆米ドル) の2倍以上の規模に相当する。

もう一つの課題は、既存の技術だけでは脱炭素化を達成することが困難であり、革新的な新しいテクノロジーの開発・実用化・普及が必要という点である。例えば、国際エネルギー機関 (IEA) は、「2050年までにネットゼロを達成するためには、利用可能なテクノロジーのさらなる迅速な展開と、まだ市場に出ていないテクノロジーの広範な利用が必要である (略) 2050年には、削減量のほぼ半分が現在実証またはプロトタイプ段階にあるテクノロジーによるものである」と指摘している<sup>9</sup>。その重要な担い手の一つとして、スタートアップが期待されている。

具体的に、まずカーボンニュートラル実現のためには、電力部門の脱炭素化が大前提となる。非電力部門では、脱炭素化された電力による需要サイドのさらなる電化 (動力を電

<sup>4</sup> 「カーボンニュートラル」の他、「純排出量ゼロ」「ネットゼロ」「脱炭素」等が同じ意味で使われる。

<sup>5</sup> 温室効果ガスには、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>)、メタン (CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O)、フロン類が含まれる。温室効果ガス総排出量に占める割合 (2010年、CO<sub>2</sub>換算ベース) : CO<sub>2</sub> (76.0%) メタン (16.0%) N<sub>2</sub>O (6.2%) フロン類 (2.0%) (「IPCC第5次評価報告書」参照) 温室効果の大きさは気体によって異なり、例えばメタンはCO<sub>2</sub>の25倍、一酸化二窒素は298倍の温室効果がある。CO<sub>2</sub>は世界の温室効果ガスの76%を占める。

<sup>6</sup> 正式タイトルは「1.5°Cの地球温暖化：気候変動の脅威への世界的な対応の強化、持続可能な開発及び貧困撲滅への努力の文脈における、工業化以前の水準から1.5°Cの地球温暖化による影響及び関連する地球全体での温室効果ガス (GHG) 排出経路に関するIPCC特別報告書」 (Global Warming of 1.5°C an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty)

<sup>7</sup> 国際再生可能エネルギー機関：再生可能エネルギー (太陽、風力、バイオマス、地熱、水力、海洋利用等) の普及及び持続可能な利用の促進を目的として設立された国際機関。2011年4月に正式に設立。2020年7月現在、加盟国数は160か国とEU。外務省ウェブサイト参照。

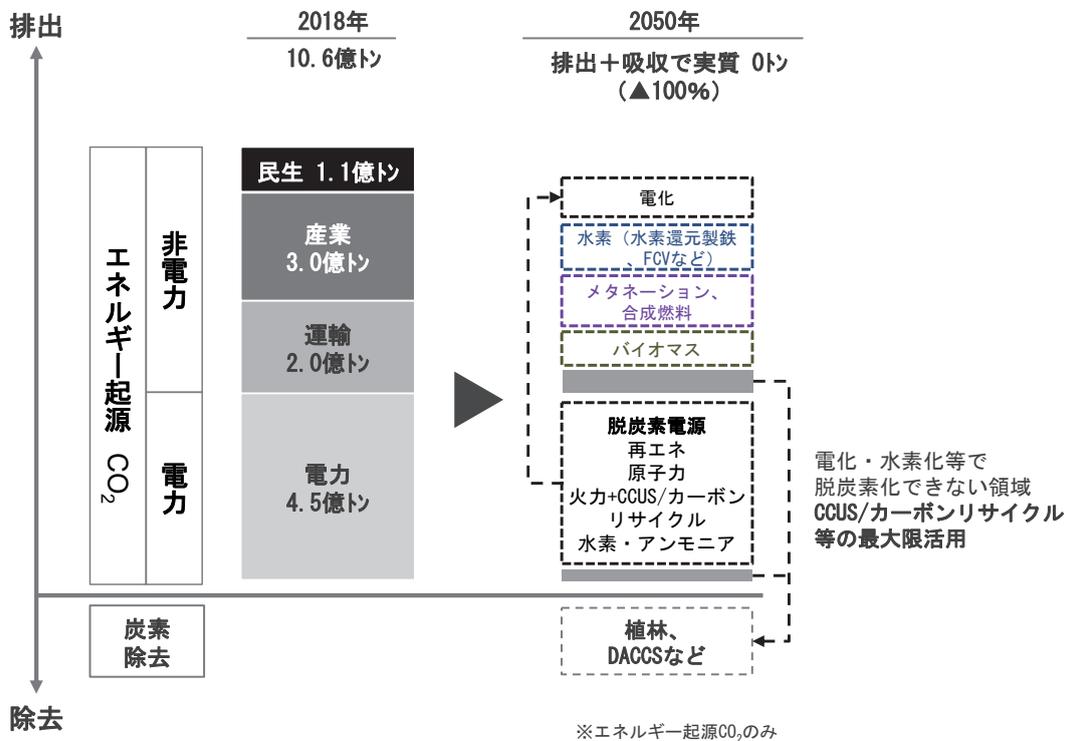
<sup>8</sup> IRENA, “World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway,” June 2021.

<sup>9</sup> IEA(International Energy Agency), “Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector”, May 2021.

気に変えること)、水素化<sup>10</sup>、メタネーション<sup>11</sup>、バイオマス等を通じて、CO<sub>2</sub>排出を抑制する。さらに、やむをえず排出されるCO<sub>2</sub>については、植林やCO<sub>2</sub>の回収・利用・貯留技術(Carbon Capture, Utilization and Storage:CCUS)等を組み合わせることで、相殺することを目指すことになる(図表2)。

輸送、商業・家庭でのエネルギー利用の大部分は、再生エネルギーへの代替が可能であり、脱炭素化の可能性が高い。太陽光、風力等の炭素排出を伴わない発電に関する主要技術は、効率性の頭打ち(plateau of productivity)、つまり投資をしても大きな革新を得ることが難しい段階に近づいている(図表3)。この段階のテクノロジーに対する投資は、技術開発よりもコスト削減に向けられるべきと考えられ、すでに効果が実証されている技術

図表2 カーボンニュートラルへの転換イメージ(日本)



(注) 「民生」は一般の人々の生活(家庭部門)や、事務所や店舗などの第3次産業(業務部門)を指す。

FCV(Fuel Cell Vehicle):燃料電池自動車。

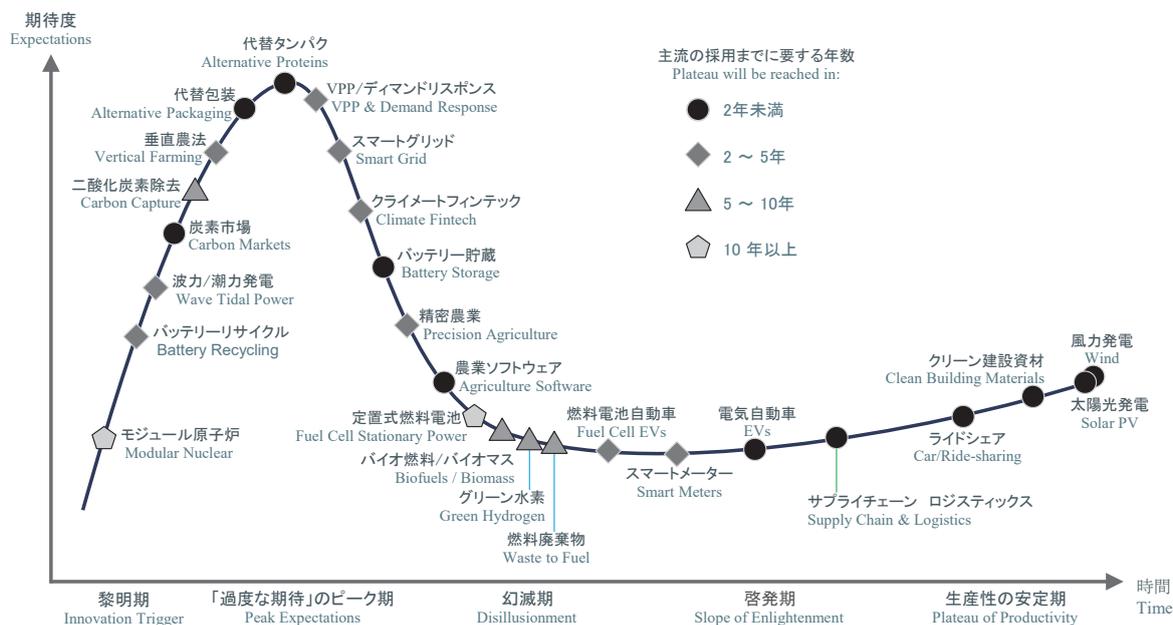
CCUS(Carbon dioxide Capture and Storage):二酸化炭素回収・貯留。

DACCS:炭素直接大気回収・貯留。DAC(Direct Air Capture:直接空気回収)とCCS(Carbon dioxide Capture and Storage:二酸化炭素回収・貯留)を組み合わせた名称。

(出所)資源エネルギー庁資料より野村資本市場研究所作成

<sup>10</sup> 水素に期待が集まる理由としては、単位質量当たりのエネルギー量が多く(エネルギー密度が高く)軽量であることから、(貯蔵容器にかかる重量を勘案しても)輸送が比較的容易であることがあげられる。また、水素の場合、火力発電所の燃料としての使用や燃料電池(の燃料)として直接発電することが出来るという使い勝手のよさもある。

<sup>11</sup> メタネーションとは、CO<sub>2</sub>と水素からメタンを合成する技術。メタンは都市ガスの主成分であるため、メタネーションが実現すれば、配管やガスコンロなど都市ガスの既存インフラを活用でき、都市ガスが普及している広い地域でCO<sub>2</sub>を削減することが可能となる。

図表3 「クライメートテック」関連テクノロジーのハイプ・サイクル<sup>12</sup>

(出所) Silicon Valley Bank, “The Future of Climate Tech,”より野村資本市場研究所作成

やソリューションを迅速に商業化する必要がある。この技術と商業化のギャップを埋める役割こそがVC（ベンチャーキャピタル）による投資に期待されている。

一方で、空気中のCO<sub>2</sub>の除去等の新しい技術は、いまだ研究段階にあり、実用化およびスケール化にはかなりの資本と時間が必要となる。今後は、資金制約の問題にも鑑み、ターゲットを絞った政府及び民間からの支援が必要になるだろう。

以上のことから、カーボンニュートラルを実現するためには、クライメートテックのスタートアップが目指す技術開発分野に、多くの投資資金を呼び込むことが重要となってくる。

## 2. 「クリーンテックへの投資」（2006～2011年）の教訓

かつて、気候変動対策として「クリーンテック（Cleantech）」をテーマに、ソーラーパネル、バッテリー、バイオ燃料、その他のエネルギーソリューションの開発に取り組む多くのスタートアップに多額の投資が行われたが、その多くは期待されたリターンをあげることは出来なかった。

マサチューセッツ工科大学（MIT）の3人の教授が2016年に発表した研究によると、「ベンチャーキャピタル（VC）は2006年から2011年までの間にクリーンテック・スター

<sup>12</sup> 「ハイプ・サイクル（Hype Cycle）」は、2,000を超えるテクノロジーの中から、注目すべき先進テクノロジー及びトレンドとしてまとめたものとして、米国調査会社のガートナー（Gartner）が1995年からグローバル版を毎年発表している。

トアップに 250 億米ドル以上の投資を実施し、投資額の半分以上を失った」とされる<sup>13</sup>。同研究では、2006 年から 2011 年までに資金調達（シリーズ A）を実施したスタートアップを対象としている<sup>14</sup>。2006 年はドキュメンタリー映画「不都合な真実（An Inconvenient Truth）<sup>15</sup>」が公開された年である。

同論文では、革新的なテクノロジーの商業化を目指したクリーンテック企業が、VC の投資モデルに適していなかった理由として、以下の 4 点をあげている。

- ① 新しい科学における問題点を解決するのに時間がかかるため、VC が望む 3~5 年の時間軸よりも長く、流動性が低い。
- ② 基盤となる技術を開発中であるにもかかわらず、工場建設のために数億米ドル規模の資金調達をたびたび必要とするなど、スケールするまでに多額の投資が必要。
- ③ 安価なシリコン太陽電池パネルや豊富な石油・ガスに対し小さな利幅で競合するため、R&D 投資も難しく、失敗を許容する余地がほとんどない。
- ④ 技術的に親和性の高いセクターの大企業（電力会社や大手メーカー）は、リスクの高いスタートアップを買収する可能性は低く、将来の成長を見越したプレミアムを支払うことを嫌う。

一般的な IT セクター、例えば BtoB または BtoC のソフトウェア・スタートアップの場合、製品開発の期間は 1~5 年、製品やサービスを市場に投入しリターンを得る収穫期間は 5~7 年とされる。この時間軸が一般的な VC のファンド期間（10~12 年）に反映されている。つまり、ファンド開始後 4~5 年で投資を行い、残りの 6~7 年での投資回収を目指すことになる。これに対し、ソフトウェアを除くクリーンテック・スタートアップでは、R&D および開発期間が非常に長く、かつ大規模な投資が必要となることから、通常の VC 投資には適しているとはいえない。

加えて、GAFAM<sup>16</sup>等の大手 IT 企業は、自社のサービスに組み込むことの出来るサービスを開発するスタートアップを積極的に（場合によっては多額のプレミアムを払って）買収するが、クリーンテックの場合は、資本集約型産業セクターでは、スタートアップ買収を実行する企業が少ないため、エグジットの機会およびリターンが限定される。上記研究で高い投資収益率をあげた数少ない事例のひとつとして、2014 年に Google（Alphabet）に 32 億米ドルで買収された「Nest（現 Google Nest）」がある。同社は室内の温度を調節して消費者の電気代を節約するスマート・サーモスタットを販売しており、ソフトウェア企業に近い。

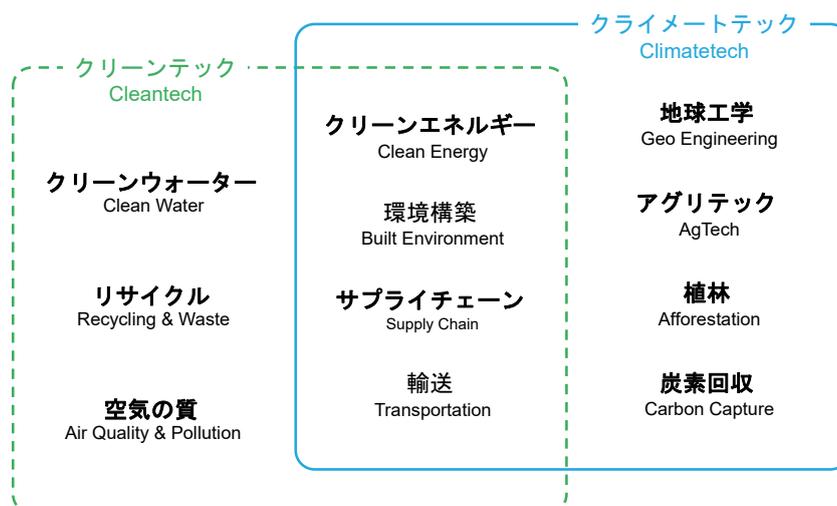
<sup>13</sup> Benjamin Gaddy, Varun Sivaram, Francis O’Sullivan, “Venture Capital and Cleantech: The Wrong Model for Clean Energy Innovation,” An MIT Energy Initiative Working Paper, July 2016.

<sup>14</sup> 同研究では、「クリーンテクノロジー企業（Cleantech companies）」を、エネルギー生成、エネルギー貯蔵、先進燃料、エネルギー効率、エネルギーソフトウェア、およびエネルギーソフトウェア機器のための技術を開発する企業、ならびにクリーンエネルギー技術を導入または同技術に資金提供する企業と定義している。なお、2003 年創業の電気自動車メーカー「テスラ（Tesla）」は、2004 年 4 月にシリーズ A を実施しているため、分析の対象には含まれていない。

<sup>15</sup> 2006 年製作の米国のドキュメンタリー映画。脚本・主演、アル・ゴア（Al Gore）元米国副大統領。

<sup>16</sup> Google、Apple、Facebook、Amazon、Microsoft。

図表4 「クリーンテック」と「クライメートテック」(イメージ)



(出所) Clean Energy Ventures 資料より野村資本市場研究所作成

### 3. 「クリーンテック」から「クライメートテック」へ

「クリーンテック」と「クライメートテック」はどう違うのか。単に、「クリーンテック 2.0」等ではイメージがよくないため新しい名称を使った、ということではない。この点に関して、Clean Energy Venture Capitalでは、図表4のように、クリーンテックとクライメートテックの違いを説明している。

例えば、「クリーンウォーター」は環境と人間の健康にとって重要な問題であるが、それだけではGHG排出量を積極的に削減することはできないため、クリーンテックには含まれるが、クライメートテックには含まれない。他方、農業・食料関連の「アグリテック (Ag Tech)<sup>17</sup>」は、環境への影響を最小限に抑えることよりも、高品質の食品生産のためのより効率的で害の少ない方法を開発することを主な目標としており、CO<sub>2</sub>やメタンガス削減のための有効な機会を提供し、GHG排出の影響緩和に貢献するため、クライメートテックに含まれる。

### 4. クライメートテック投資の意義と課題

「気候変動を解決する唯一の方法はイノベーションと市場の力である」ともいわれる。このイノベーションの担い手・主役としてスタートアップが期待され、多額の投資が集まる。ただし、単に投資が集まればイノベーションが起きるというわけではなく、イノベーションをスケール化、つまり持続可能な収益を生むだけのビジネスにまで成長拡大させる

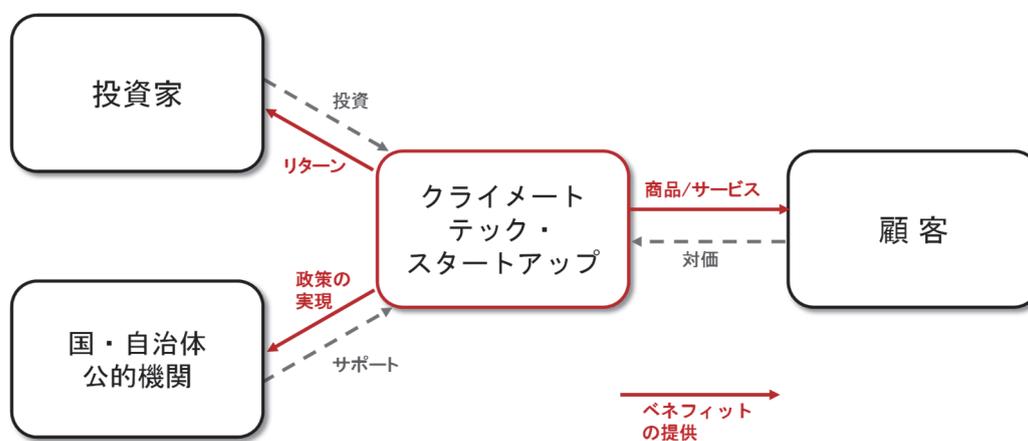
<sup>17</sup> アグリ・フードテック (AgriFood Tech) ともいう。竹下智「「農業・食」×「IT」×「金融」が描く未来— AgriFood TechとFinTechを融合するスタートアップ—」『野村資本市場クォーターリー』2019年夏号参照。

必要がある。

気候変動に限らず、規制や説得（教育）や強制によって解決できない問題をスタートアップが解決するには、現状の製品よりも優れた性能を持つ製品を作り、それにより需要を満たし、既存の産業・業界を置き換えることが求められる。その結果として当該スタートアップの企業価値があがり、エグジット等により投資家もリターンを得ることが出来る。

国（政府）等がスタートアップに対してサポートを行う際も、GHG 削減に加え他の政策目標達成等のベネフィットがあれば、もしくは他の政策実現に向けた取り組みの結果として（直接的／間接的に）GHG 削減が達成されるのであれば、GHG 削減のみを目的とする場合に比べ、政策としてのプライオリティが上がり、課題解決までの時間短縮、スタートアップのビジネスとしての成功および投資リターンの獲得の可能性が高まる（図表 5）。

図表 5 クライメートテック・スタートアップが提供するベネフィットのイメージ



(出所) 野村資本市場研究所

「代替肉（代替タンパク質）」を例にみてみよう。

農業分野からの GHG 排出は、主に農耕地への窒素施肥や家畜排泄物からの「窒素酸化物 (N<sub>2</sub>O)」と水田や牛などの家畜から発生する「メタン (CH<sub>4</sub>)」である。世界で最も権威ある科学雑誌の一つである米国のサイエンス誌に掲載された論文によると、「化石燃料の排出が直ちに削減されたとしても、地球規模の食糧システムからの排出だけで、温暖化を 1.5°C に制限することは不可能であり、2°C の目標を実現することさえ困難である。パリ協定の目標を達成するためには、食糧の生産方法を大きく変える必要がある」とされる<sup>18</sup>。

植物由来の代替肉を手掛ける Impossible Foods（米国、2011 年創業）の創業メンバーの一人は「環境のためとはいえ、我慢を強いる食品は広まらない。肉が好きな人たちが普通

<sup>18</sup> Michael A. Clark et al. “Global food system emissions could preclude achieving the 1.5° and 2°C climate change targets,” Science, Vol 370, Issue 6517 pp.705-708. November 6, 2020. 同論文では、食品システム戦略として、①食事パターン（植物を多く含む食事の世界的な採用）②カロリー摂取量（健康的なカロリー摂取の世界的な採用）③作物収量の増加（現在の最大可能収量比 50%増）④食品廃棄物の削減（食品ロスと廃棄物の 50%削減）⑤食料生産効率の向上（GHG 排出量の 40%削減）をあげている。

に『おいしい』と評価し、積極的に購入してもらう食品でなければ、肉の消費を抑えることにはならない」と述べている<sup>19</sup>。従来の動物由来の肉ではないというだけで、市場を置き換えることは出来ない。味、価格ともに普通の消費者にベネフィットを提供出来なければ、食肉を減らし GHG 排出を削減するという目標を達成することは出来ない。また、企業としての成功もない。

アグリフードテックへの国の関与として、シンガポールの事例は興味深い。同国の国土面積は東京 23 区ほどの大きさで非常に狭く、この土地に約 570 万人の人口を抱えている。さらに、同国内に占める農地の割合は約 0.9% と非常に小さく、同国の（カロリーベース総合）食料自給率は 10% 未満と先進国の中でも最低の水準にある（2018 年の日本の同食料自給率は 37%）。食料のほとんどを輸入に頼る国にとって、世界の食料システムへのいかなる影響も、国家の食料安全保障に深刻な影響を与えることになるが、食料生産を増やすのは容易ではない。そこで同国政府が取った戦略は「科学技術によって解決する」ことであった<sup>20</sup>。

シンガポール政府は 2019 年 3 月、2030 年までに必要な栄養の 30% を国内で製造するという目標「30x30」を掲げた。同国政府は 2025 年までに、最大 1 億 4,400 万シンガポールドルを食料関連の研究プログラムに割り当てる。シンガポール企業庁も、代替たんぱく質関連の世界的なアクセラレーター数社と提携した。さらに、2021 年 4 月代替たんぱく質の安全性を研究し、研究を支援するための「未来型食料安全ハブ（Future Ready Food Safety Hub、通称 FRESH）」を設立した。同国の環境相は「FRESH の重要な機能の 1 つは、食品安全性リスク評価のための研究開発能力と、新しい食品、機能性成分、新しい食品加工技術のプロトコルを強化することであり、また、シンガポールで“市場初”の食品を安全に導入できるようにするため、食品イノベーションのエコシステムを支援することにある」と述べている<sup>21</sup>。結果、シンガポールには多くのアグリフードテック・スタートアップが設立されている<sup>22</sup>。

また、炭素クレジット市場が、ブラジル等の畜産による森林破壊の問題を抱える国々における解決策になる可能性もある。つまり、牛肉等の輸出によって収入を得ている国が、炭素クレジットのほうで利益を生むことが出来るのであれば、畜産やプランテーション農業の必要性が減少する、ということである。後述する人工衛星を活用した GHG 監視につ

<sup>19</sup> 田中宏隆、岡田亜希子、瀬川明秀「フードテック革命 世界 700 兆円の新産業「食」の進化と再定義」『日経 BP』、2020 年 7 月。

<sup>20</sup> イスラエルは周囲の国との緊張関係もあり、食料自給率を上げることは安全保障上の課題でもあった。同国は国土の半分以上が砂漠であったため、節水農法・点滴灌漑等のシステム開発に力を入れ、現在の食料自給率は 90% を超えるといわれる。さらに近年も、アグリフードテックのスタートアップが続出し、世界の先端をいく技術が生まれている。

<sup>21</sup> Ministry of Sustainability and the Environment, “Speech at Launch Of The Future Ready Food Safety Hub at NTU - Ms Grace Fu,” April 27, 2021.

<sup>22</sup> シンガポールの SWF である「テマセク（Temasek）」や米国米食肉加工最大手の「タイソン・フーズ（Tyson Foods）」が出資する代替タンパク質（肉、魚介類、乳製品等）関連スタートアップを投資対象とする Big Idea Ventures の「New Protein Fund」の投資先スタートアップ 43 社を国別でみると、米国が 24 社と約半分を占め、次いでシンガポール（8 社）となっている（2021 年 10 月 17 日時点）。

Big Idea Ventures ウェブサイト<<https://bigideaventures.com/portfolio/>>参照。

いて「意義は理解できるがどこから収益を得るのか」という声があるが、プロジェクトベースの炭素クレジットを創出することで市場を開拓し、収益を確保し、加えて GHG 排出抑制を達成する可能性をもっている<sup>23</sup>。

ただし、炭素クレジット市場が機能するためには、クレジットの質に関する基準や評価の枠組みがグローバルに整備されることが必要となろう。

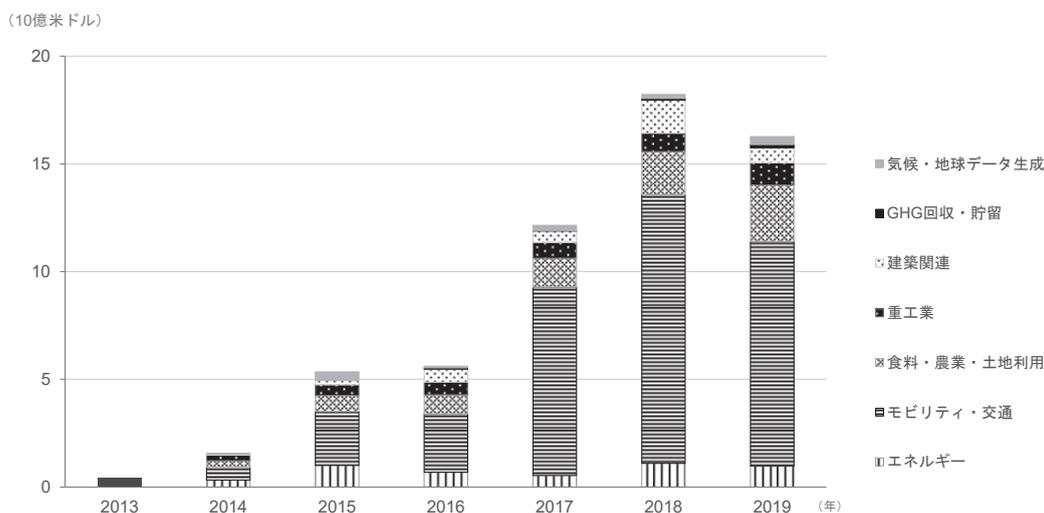
## II 「クライメートテック」への投資

### 1. 急拡大する「クライメートテック」への投資

前述の PwC のレポートによると、2013 年から 2019 年までの 7 年間で合計 595 億米ドルが VC から同分野に投資された。2013 年の約 4 億米ドルから 2019 年は約 163 億米ドル（590 件）と約 40 倍に増加している。2019 年 VC 業界全体で約 2,644 億米ドルを投資しており、そのうち 6%がクライメートテックへの投資であったとされる<sup>24</sup>（図表 6）。

前述の 2006 年から 6 年間のクリーンテックへの投資額（250 億米ドル）を既に大きく上回っており、同レポートの副題（The next frontier for venture capital）にあるように、クライメートテックは「VC（投資）における新たなフロンティア」となっている。

図表 6 クライメートテックへの VC 投資額（2013 年～2019 年）



（出所）PwC, “The State of Climate Tech 2020,”より野村資本市場研究所作成

<sup>23</sup> 炭素クレジットの需要は 2024 年には供給を上回ると予想されている。BCG, “The time for climate action is now,” April, 2021.

<sup>24</sup> PwC, “The State of Climate Tech 2020: The next frontier for venture capital,” September 2020.

また、同レポートではクライメートテックが成長した要因として、図表 7 にある点を挙げています。

たしかに、過去 10 年で太陽光発電など再生可能エネルギーの効率向上、ディープテックや IoT、AI などの技術的な進展等いくつかの要因が重なった結果ととらえることも出来るが、最大の要因は「多くの国や企業が 2050 年カーボンニュートラルにコミットした」ことであろう。以前のクリーンテックは、既存の製品・サービスとの競争であった。例えば、太陽光発電は既存の火力発電等との価格競争を強いられた。しかしながら、今後はカーボンニュートラルが前提となる。ビジネスの前提、ゲームのルールが変わったのであり、全ての経済主体がカーボンニュートラルの影響を受け、かつ変化のスピードを加速させることになる。

加えて、重要な点として、気候変動問題への取り組みとビジネス（利益）の両立を目指す企業家の増加があげられよう。

では、クリーンテックへの投資で指摘された課題（VC の投資モデルに適していないとされた理由）についてはどうであろうか。

2013 年から 2019 年の期間、約 2,700 の投資家が 1,200 社以上のクライメートテック・スタートアップに投資したとされる。しかし、クライメートテックに積極的に投資している投資家はまだ一部にとどまっており、大多数の投資家（75%以上）は、同分野への投資を 1、2 回しか行っていない。そもそも、クライメートテックという言葉が使われ始めたのは 2020 年以降であり、それまでは、投資テーマとして意識されていたわけではない。2000 年代のクリーンテック投資の教訓を参考に、慎重に投資先を選別してきたとみるべきであろう。事実、後述するクライメートテック・スタートアップ投資に特化した VC である「Breakthrough Energy Ventures」（2015 年設立）の創設パートナーの一人は「投資基

図表 7 クライメートテックが成長した要因

①	テクノロジーとインフラ Technology and infrastructure	低炭素技術、特に再生可能エネルギー（発電）およびバッテリー製造分野において、はるかに安価かつより広範に利用可能となった。
②	資金調達と投資家サイドの需要 Finance and investor demand	VC ファンドだけでなく他の投資主体から、多額の投資資金が利用可能となった。
③	政策とプロセス Policy and process	120 カ国の政府が相応の支出と政策措置を伴う脱炭素化をコミットしている。
④	人材 People	質の高い創業者や優秀な人材が、様々な分野でこの重要かつ緊急性の高い課題に引き寄せられている。
⑤	企業サイドの需要 Corporate demand	多くのグローバル企業がネットゼロにコミットし、その行動が加速している。より広範で具体的な ESG 目標を増加している。
⑥	消費者サイドの需要 Consumer demand	高品質かつ低炭素な製品やサービスにより、Beyond Meat、Tesla、Nest 等の著名な「勝ち組」が出てくるようになった。
⑦	起業家への刺激 Inspired founders	成功したスタートアップの増加が、気候変動の課題に取り組もうとする多くの起業家を刺激している。

(出所) PwC, “The State of Climate Tech 2020,”より野村資本市場研究所作成

準を厳格に定め、20年という長期の投資期間をもつことで、以前の失敗から学んだ」と語っている<sup>25</sup>。

たしかに、クライメートテックを取り巻く環境には大きな変化があったとはいえ、IT・ソフトウェア関連のスタートアップと比べ、製品・サービスを開始するまでの時間とコストを要することには変わりがない。これは、宇宙ベンチャー（Space Ventures）への投資のケースに似ている<sup>26</sup>。同分野では、スタートアップの達成しようとしているイノベーション、開発状況にあわせた投資家、投資資金とのマッチングが進展している<sup>27</sup>。

既存のVCへの出資だけではなく、企業によるスタートアップへの直接投資およびCVC（Corporate venture capital）の役割も増してきている。

## 2. 気候変動対策に特化した大型ファンドの出現

2017年以降のクライメートテックへの投資拡大の背景には、気候変動対策に特化したファンドの設立、しかも著名投資家による大型ファンドの設立があると考えられる（図表8）。

図表8 クライメートテックにフォーカスしたファンドの例

運営主体	設立	主なファンド
<b>【VC】</b>		
Breakthrough Energy Ventures	2015年	● Breakthrough Energy Ventures Fund（10億米ドル）2016年12月 ● Breakthrough Energy Ventures Fund I（1億ユーロ）2019年5月 ● Breakthrough Energy Ventures Europe SCSp（5,000万米ドル）2019年6月 ● Breakthrough Energy Ventures II（10億米ドル）2021年1月
The Westly Group	2007年	● Westly Capital Partners Fund III（1.3億米ドル）2018年7月
Energize Ventures	2016年	● Energize Ventures Fund（1.5億米ドル）2018年9月 ● Energize Ventures Fund II（3.3億米ドル）2020年11月
Energy Impact Partners	2015年	● Energy Impact Fund II（4億米ドル）2019年8月
Clean Energy Ventures	2017年	● Clean Energy Venture Fund（1.1億米ドル）2019年10月
Generate Capital	2014年	● Generate Capital Fund（10億米ドル）2020年2月
Lowercarbon Capital	2018年	● Lowercarbon Capital Fund（8億米ドル）2021年8月
<b>【PE】</b>		
TPG	1992年	● TPG Rise Climate Fund（54～70億米ドル）2021年7月
<b>【CVC】</b>		
Amazon	1994年	● The Climate Pledge Fund（20億米ドル）2020年6月
Microsoft	1975年	● Climate Innovation Fund（10億米ドル）2020年11月
<b>【アクセラレーター】</b>		
Google（Alphabet）	1998年	● Impact Challenge on Climate

（出所）各種資料より野村資本市場研究所作成

<sup>25</sup> “Clean tech 2.0: Silicon Valley’s new bet on start-ups fighting climate change,” *Financial Times*, March 24, 2021.

<sup>26</sup> 宇宙ベンチャー（Space Ventures）：エンジェル投資家やVCによって資金的に支援された宇宙関連ビジネスを手掛けるスタートアップ。竹下智「スタートアップ投資のフロンティアとなりつつある宇宙関連ビジネス」『野村資本市場クォーターリー』2020年夏号参照。

<sup>27</sup> 竹下智「スタートアップ投資のフロンティアとなりつつある宇宙関連ビジネス」『野村資本市場クォーターリー』2020年夏号参照。

### Breakthrough Energy Ventures

ビル・ゲイツ (Bill Gates) 氏、ジェフ・ベゾス (Jeff Bezos) 氏、ビノッド・コースラ (Vinod Khosla)<sup>28</sup>氏、ジャック・マー (Jack Ma、馬雲) 氏、ジョン・ドーア (John Doerr)<sup>29</sup>氏をはじめとする 15 人の著名な投資家が設立した「Breakthrough Energy Ventures」の目標は「最先端の研究開発を支援し、画期的な技術をスケールアップで変革的なソリューションに変える企業に投資し、研究室から市場へのイノベーションを加速する政策を提唱することによって、2050 年までに世界をネットゼロエミッションへと導くこと」である<sup>30</sup>。

最初のファンドである「Breakthrough Energy Ventures Fund」(2016 年 12 月ローンチ) は、10 億米ドルの出資を集めた。これが契機となり、「クリーンテクノロジー (クライメートテック) に向かう資金の流れを触媒する役割を果たし、他に誰もいなかった時代に道を開いた」と評される<sup>31</sup>。その後も「Breakthrough Energy Ventures Fund I」(2019 年 5 月、1 億ユーロ)、Breakthrough Energy Ventures Europe SCSp」(2019 年 6 月、5,000 万米ドル)、Breakthrough Energy Ventures II」(2021 年 1 月、10 億米ドル) をローンチし、計 4 本のファンドで総額 22 億米ドルの規模となっている。

### TPG Rise Climate Fund

世界でも最大規模の PE (プライベート・エクイティ) ファンドを運営する米国 TPG は、2021 年 7 月、気候変動対策分野に特化したファンド「TPG Rise Climate Fund」の組成を発表した。当初の運用規模は 54 億米ドル (最大コミットメント 70 億米ドル) と、この分野のファンドとしては過去最大規模となる。同ファンドでは 5 つの気候サブセクター、「クリーンエネルギー (clean energy)」「実現 (技術による) ソリューション (enabling solutions)<sup>32</sup>」「低炭素交通 (decarbonized transport)」「グリーン化産業 (greening industrials)」「農業・自然ソリューション (agriculture & natural solutions)」に焦点をあてている。

同社の発表によると、同ファンドの投資家には世界の主要な大手機関投資家および 20 社以上のグローバル企業が含まれており、従来の PE 投資とは一線を画している<sup>33</sup>。

<sup>28</sup> ビノッド・コースラ (Vinod Khosla) : 1955 年インド生まれ。サン・マイクロシステムズ (Sun Microsystems) 共同設立者の一人。2004 年、VC である「Khosla Ventures」を設立。米国シリコンバレーにあるインド人起業家支援組織「The Indus Entrepreneurs」の設立者の一人である。

<sup>29</sup> ジョン・ドーア (John Doerr) : 1951 年米国生まれ。ベンチャーキャピタリスト、KPCB パートナー。インテルを経て、1980 年以降コンパック、ネットスケープ、シマンテック、サン・マイクロシステムズ、Amazon、Google を含む多くの企業に投資を行う。

<sup>30</sup> Breakthrough Energy Ventures ウェブサイト。<<https://www.breakthroughenergy.org/our-story/our-story>>

<sup>31</sup> “Climate Tech Vs. Cleantech: Where Is Investment Coming From?,” *Cleantech Rising*, July 12, 2020.

<sup>32</sup> 「Enabling Technologies」(日本語では「実現技術」と訳される)には、例えば、「Robotics」や「Data Management and Analytics」が含まれる。後者は、材料業界の研究開発と製造のための大規模なデータインフラと高度な分析を提供することで新しい材料を発見に貢献した企業 (Citrine Informatics) 等がある。

<sup>33</sup> TPG Press Release, “TPG Announces \$5.4 Billion First Close of TPG Rise Climate Fund,” July 27, 2021. 投資家としては Allstate、AXA、The Hartford、Ontario Teachers’ Pension Plan Board、Public Investment Fund、Public Sector Pension Investment Board、School Employees Retirement System of Ohio、Silk Road Fund、State of Michigan Retirement System、Universities Superannuation Scheme (USS)、Washington State Investment Board。企業としては 3M、ADM、Allianz、Allstate、Alphabet、Apple、Bank of America、Boeing、Dow、Exor、FedEx、GE、General Motors、Honeywell、John Deere、Michael R、Bloomberg、NIKE、三井住友銀行、Smithfield Foods、TD Bank Group。

### Amazon Climate Pledge Fund

アマゾン (Amazon.com) は 2020 年「The Climate Pledge Fund」を立ち上げ、当初 20 億米ドルの資金を提供し、「低炭素経済への移行を促進する製品とソリューションを提供する先見の明のある企業」に投資を行っている (図表 9)。

アマゾンは、投資先企業の製品・サービスを実際に利用し、自社のサプライチェーンを含む GHG 排出抑制に活用することを目指しているように見受けられる。例えば、出資先の一つである「Rivian<sup>34</sup>」に対して、すでに 10 万台の EV 配送バンを発注済みとされ、2030 年までに配送車両のすべてを再生可能エネルギーによるものに置き換えるとしている。

他の投資家を見ると、大手ミューチュアルファンド (Fidelity、T. Rowe Price) からの出資もみられる。ミューチュアルファンドは上場株式への投資がほとんどであるが、一部の大型ファンドではパフォーマンスの向上だけでなく「次のディスラプター」を探すことを目的に、非上場企業への投資 (クロスオーバー投資) を行っている<sup>35</sup>。

図表 9 アマゾン「The Climate Pledge Fund」の投資先

企業名	本社	設立	事業	他の投資家
BETA Technologies	米国	2017 年	電動垂直離着陸 (eVTOL)	Fidelity Management & Research Company
CarbonCureTechnologies	カナダ	2007 年	低炭素コンクリート	Microsoft Breakthrough Energy Ventures
Infinium	米国	2020 年	再生可能な電気燃料ソリューション	三菱重工業
Ion Energy	インド	2017 年	バッテリー管理ソリューション	
Pachama	米国	2018 年	炭素回収の影響を検証	Breakthrough Energy Ventures
Redwood Materials	米国	2017 年	リチウム電池や電子機器廃棄物のリサイクル	Ford Motor カナダ年金制度投資委員会 Goldman Sachs Asset Management
Rivian	米国	2009 年	電気自動車	T. Rowe Price Ford Motor Fidelity Management & Research Company
Turntide Technologies	米国	2013 年	モーター	カナダ年金制度投資委員会 Breakthrough Energy Ventures
ZeroAvia	米国	2017 年	水素エンジン航空機	Breakthrough Energy Ventures Shell Ventures

(出所) Crunchbase データ等より野村資本市場研究所作成

<sup>34</sup> Rivian は 2021 年 11 月 10 日、NASDAQ 上場。

<sup>35</sup> クロスオーバー投資については、竹下智「上場・非上場の垣根を飛び越えるクロスオーバー投資 – 米国ミューチュアルファンドによるプレ IPO 株式投資の実状 –」『野村資本市場クォーターリー』2020 年冬号参照。

### Google.org 「Impact Challenge on Climate」

Google のフィランソロピー部門である「Google.org」は 2021 年 4 月、EU の気候変動イノベーション機関（climate innovation agency）である「EIT Climate-KIC<sup>36</sup>」と協力し、より環境に優しく、回復力のある未来に向けた欧州の進展を加速するための技術を利用することを目的とした大胆なアイデアに資金を提供「Impact Challenge on Climate」を実施した。選出された 11 の組織はアイデアを形にするために、総額 1,000 万ユーロの資金提供を受ける（1 組織当たり 50 万～200 万ユーロ）<sup>37</sup>。

さらに、注目すべきは、Google の社員（Googlers）が最大 6 カ月間、フルタイムかつ無給で選出されたチームと働くことができることである。

## III クライメートテックの注目分野

### 1. 二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）除去

#### 1) DAC（Direct Air Capture、直接空気回収）

国際環境 NGO の WRI（World Resources Institute、世界資源研究所）のレポートによると、「GHG 排出量を削減する努力は常に優先されるべきであるが、気候（変動対策）目標を達成するためには、CDR（Carbon Dioxide Removal、CO<sub>2</sub>除去）—空気から直接炭素を除去するシステム—も必要であり、おそらく今世紀半ばまでに 10 億トン規模になる」と予測されている<sup>38</sup>。「ネガティブエミッション技術（Negative Emission Technologies、NETs）」も CDS と同じような意味で使われる（図表 10）<sup>39</sup>。

CDR 技術の一つとして、化学反応を利用して大気中の CO<sub>2</sub> を回収する「DAC（Direct Air Capture、直接空気回収）」の重要性が高まっている。CO<sub>2</sub> 排出の多い火力発電所や工場などから CO<sub>2</sub> を回収する技術は一般的に「CCS（Carbon Capture and Storage）」と呼ばれており、大気中から直接 CO<sub>2</sub> を回収する DAC とは区別される場合が多い<sup>40</sup>。大気中の CO<sub>2</sub> 濃度はわずか 0.04% であり、排ガスや他の混合気体から捕捉するよりも技術面のハードルが一段と高い。

<sup>36</sup> EIT Climate-KIC は、世界最大規模の環境ビジネスアイデアコンテスト「Climate Launchpad」を開催している。  
<<https://globalfinal.climatelaunchpad.org/>>

<sup>37</sup> Impact Challenge on Climate ウェブサイト <<https://impactchallenge.withgoogle.com/climate2020>>

<sup>38</sup> World Resources Institute, “Direct Air Capture: Definition, Cost, & Considerations,” January 6, 2021.

<sup>39</sup> この他に、成層圏（高度 20km 程度）に浮遊状の微粒子（エアロゾル）を注入し、地球を覆う人工的な雲を作ることで直接気候を冷やす「太陽放射改変（Solar Radiation Modification, STM）」がある。STM と CDR をあわせて、人工的に直接的に気候システムに介入して地球温暖化対策とする「気候工学（climate geoengineering）」と称される。STM については、杉山昌弘「気候を操作する温暖化対策の危険な「最終手段」」KADOKAWA、2021 年、等を参照。

<sup>40</sup> オーストラリアのシンクタンク「グローバル CCS インスティテュート（Global Carbon Capture and Storage Institute）」のレポートによると、2020 年末時点で「世界には 65 の商用 CCS 施設があり、そのうち 26 施設が操業段階にある。操業中の CCS 施設で回収および恒久的に貯留可能な CO<sub>2</sub> は、年間約 40Mt」とされる。Global Carbon Capture and Storage Institute, “Global Status of CCS 2020,” December 1, 2020.（同レポートの日本語訳「世界の CCS の動向 2020 年版」2021 年 4 月 2 日）

図表 10 ネガティブエミッション技術 (NETs)

ネガティブエミッション技術	概要
炭素捕集貯留 (CCS)	一般に化石資源に由来する発生した CO <sub>2</sub> を分離回収、貯留する技術。発電所、製鉄工場などの CO <sub>2</sub> 排出が多い場所で採用されることが多い。厳密には、ネット・ネガティブとはならない
バイオエネルギー・二酸化炭素捕集貯留 (BECCS)	バイオマスエネルギーの燃焼により発生した CO <sub>2</sub> を捕集貯留する技術
直接空気回収 (DAC)	大気中の CO <sub>2</sub> を直接捕集する技術。CCS との組み合わせでネット・ネガティブとなる
土壌炭素貯留	有機物を土壌に貯蔵・管理する技術。CO <sub>2</sub> 貯留量が、自然分解による土壌からの CO <sub>2</sub> 放出量より多い場合に土壌炭素貯留となる
バイオ炭	有機物を熱分解により炭化し土壌に埋設することにより炭素を固定する技術。土壌炭素隔離技術の一つ
風化促進	ケイ酸塩鉱物などの岩石を粉砕し表面積を大きくするなどして、風化を人工的に促進する技術。風化の過程で CO <sub>2</sub> を吸収
海洋肥沃	海洋に養分を散布することにより生物学的生産を促す技術。最終的に大気中からの CO <sub>2</sub> の吸収量の増加を見込む
植林・再生林	樹木による CO <sub>2</sub> 吸収を促進する技術

(出所) 一般社団法人産業環境管理協会 (JLCA) 資料より野村資本市場研究所作成

米国バイデン大統領は就任以来、パリ協定への再加入、クリーンエネルギーやクリーン車両の購入、化石燃料に対する補助金の廃止などの気候変動に対する取り組みを打ち出している。また、2021年7月、米国エネルギー省は「化石エネルギー局 (Office of Fossil Energy)」を「化石エネルギー・炭素管理局 (Office of Fossil Energy and Carbon Management)」に改称し、新たな優先課題として「工場や発電所からの CO<sub>2</sub> の放出を防止し、大気中から CO<sub>2</sub> を除去し、新たな製品へと加工、永久に貯留するテクノロジーや手法の開発」をあげている<sup>41</sup>。2021年8月に上院で可決された総額1兆米ドル規模のインフラ投資計画においても、DACプラントの開発に数十億米ドルを拠出するとされる。

CO<sub>2</sub> 除去に関しては、他のイノベーション同様スタートアップに対する期待も高い。米国シリコンバレーの著名アクセラレーターである「Y-Combinator」は、2018年10月、大気中の CO<sub>2</sub> を除去する技術に取り組むスタートアップへの呼びかけを行うとともに、「フロンティア技術」と呼ぶ、以下の4つのアプローチを提案している。

- ① 植物プランクトンを遺伝子操作して CO<sub>2</sub> を貯蔵可能な炭素に変える (genetically engineering phytoplankton to turn CO<sub>2</sub> into a storage-ready form of carbon)
- ② 岩石が CO<sub>2</sub> と反応する自然のプロセスをスピードアップする (speeding up a natural process in which rocks react with CO<sub>2</sub>)
- ③ 炭素を処理する無細胞酵素を作る (creating cell-free enzymes that can process carbon)
- ④ 地球の砂漠を埋め尽くしてオアシスを作る (flooding Earth's deserts to create oases)

<sup>41</sup> U.S. Department of Energy, “Our New Name is also a New Vision,” July 8, 2021.

### Climeworks

スイスのスタートアップ「Climeworks」（2009年設立）は、2021年9月、アイスランドの首都レイキャビク近郊に建設した世界最大の CO<sub>2</sub> 直接回収・貯留プラント「Orca」が稼働を開始したことを発表した<sup>42</sup>。同プラントは（自動車 800 台の年間 CO<sub>2</sub> 排出量に相当する）年間 4,000 トンの CO<sub>2</sub> を捕集する能力を持つとされる。

Orca の仕組みは、備えられた大きなファンが大気中の空気を取り込み、中央部のフィルターで CO<sub>2</sub> を捉え、その後、CO<sub>2</sub> を水と混ぜ合わせ、地中深くに送ることで、岩石に溶け込み、2 年ほどで石灰化する。石灰化した CO<sub>2</sub> は恒久的に保存できるため、空気中の CO<sub>2</sub> を直接減らすことが可能となる。

### X-Prize（賞金付きコンテスト）

2021 年 1 月、イーロン・マスク（Elon Musk）氏は技術開発とイノベーションの促進を目的としたコンテストを主催する非営利団体「X プライズ財団（XPRIZE Foundation）」と連携し、CSS 技術開発を目的とする賞金総額 1 億米ドルのコンテスト「\$100M Prize For Carbon Removal」の開催を発表した。賞金を獲得するためには、2025 年のアースデイ（4 月 22 日）までを期限として、年間 1,000 トン規模の CO<sub>2</sub> 除去の実証、年間 1 メガトン（1 ギガトン、100 万トン）規模のモデル化、将来的に年間メガトン規模の除去を持続的に達成するプランを提示する必要がある<sup>43</sup>。

社会的な問題解決や技術進歩を促すために、賞金付きコンテストの形式で幅広くアイデアを募集するという手法では X プライズ財団は先駆けで、最初の有人弾道宇宙飛行を競う賞金付きコンテスト（Ansari XPRIZE、賞金 1,000 万米ドル）を実施し、優勝チームが開発した技術・機体が現在の Virgin Galactic に引き継がれ、それまで存在しなかった商業宇宙旅行の市場創設につながっている<sup>44</sup>。

過去の実績をみても、革新的なイノベーションをうみだしさらに商業化への道筋を示すためには、明確なマイルストーンを定めた賞金レースのような取り組みも有用といえよう。

## 2) 植林

大気中から CO<sub>2</sub> を除去する最も安価で最も自然な方法は、間違いなく植林することである<sup>45</sup>。加えて、森林には CO<sub>2</sub> 吸収、水源の涵養、大気の浄化、土壌の生産性向上、より良い景観をもたらすなど、住民の暮らしの質を高めるさまざまな作用がある。

<sup>42</sup> Climeworks News, “Climeworks begins operations of Orca, the world’s largest direct air capture and CO<sub>2</sub> storage plant,” September 8, 2021.

<sup>43</sup> XPRIZE Foundation ウェブサイト <<https://www.xprize.org/prizes/elonmusk>>

<sup>44</sup> 竹下智「「起業家の宇宙時代」を支える新産業育成の仕掛け—X プライズ、NASA、ルクセンブルクの事例—」『野村資本市場クォーターリー』2020 年夏号参照。

<sup>45</sup> 樹木が吸収し蓄積する二酸化炭素の量は一本一本異なる。例えば、適切に手入れされている 36~40 年生のスギ人工林は 1 ヘクタール当たり約 302 トンの二酸化炭素（炭素量に換算すると約 82 トン）を蓄えていると推定される。また、この 36~40 年生のスギ人工林 1 ヘクタールが 1 年間に吸収する二酸化炭素の量は、約 8.8 トン（炭素量に換算すると約 2.4 トン）と推定される。林野庁ウェブサイト参照。

国連食糧農業機関（FAO）によると、世界の森林面積は 40 億 6,000 万ヘクタールで、国土面積の 31%を占めている。1990 年以来世界全体で森林面積は 1 億 7,800 万ヘクタール減少しており、これはリビア（世界 16 位）の国土面積とほぼ同じである<sup>46</sup>。

企業の CSR 活動など、世界中で植林プロジェクトは数多く存在するが、社会的インパクトと持続可能な林業にフォーカスしたインパクト投資ファンドに、年金基金、ファミリーオフィス、大学の基金等が投資を行っている。GIIN（Global Impact Investing Network<sup>47</sup>）のレポート（2019 年）によれば、34 のファンドが総額 94 億米ドルを運用している。ほとんどのファンドが、リスク調整後の市場金利リターンを求めており、年率換算した粗利益の期待値は年率 7%~18%で、中央値では年率 8%を目標としているとされる<sup>48</sup>。

また、林業を投資対象とする新たなファンドも出てきている。2021 年 4 月 Apple は、森林再生プロジェクトに投資する総額 2 億米ドルのファンド「Restore Fund」の設立を発表した<sup>49</sup>。これは、環境保護団体「Conservation International」とゴールドマン・サックスとの共同プロジェクトで、大気中から少なくとも年間 100 万トンの CO<sub>2</sub>削減（乗用車 20 万台分の排出量に相当）を目指す一方、林業への投資が十分なリターンを生む投資モデルであることを提示することで、森林再生に向けた投資活動を拡大することを目的としている。また同社は、2030 年までに製品、製造プロセス、サプライチェーン等のバリューチェーン全体をカーボンニュートラルにすることに関して、直接的に削減できる CO<sub>2</sub>排出を 75%と見込んでおり、残り 25%については、このファンドを通じて大気中から CO<sub>2</sub>を削減することで解決しようと考えている。

植林を本業（ビジネス）とするスタートアップも出てきている<sup>50</sup>。また、この分野は地域的な広がりもみられる（図表 11）。

<sup>46</sup> FAO, “Global Forest Resources Assessment 2020,” 世界の森林面積は 40 億 6,000 万ヘクタールで、国土面積の 31%を占めている。

<sup>47</sup> Global Impact Investing Network (GIIN) : インパクト投資の活性化を目的にロックフェラー財団を中心とした投資家により創設されたグローバルなネットワーク。社会的・環境的なインパクト評価指標の標準化を目指している。

<sup>48</sup> GIIN, “Scaling Impact Investment in Forestry,” April 2, 2019.

<sup>49</sup> Apple, “Apple and partners launch first-ever \$200 million Restore Fund to accelerate natural solutions to climate change,” April 15, 2021.

<sup>50</sup> 「Forest Carbon Tech」と称されることもある。PitchBook, “Climate Tech,” Q3 2021.

図表 11 「森林」関連のスタートアップの例

企業名	本社	設立	概要	直近の ファイナンス
DroneSeed	米国	2015年	ドローンを活用した植林ソリューション。樹種や土壌などから樹木が生育しやすい場所をセンチメートル単位で精緻に特定したうえで、ドローンが自律飛行し、種子に肥料、病害虫防除剤を混ぜた特殊カプセルを上空からまく。	36百万米ドル (2021年9月、 シリーズA)
NCX (SilviaTerra)	米国	2010年	樹木の大きさを測定し、樹木が吸収できるCO <sub>2</sub> 量を計算し、森林所有者がどれだけのカーボンオフセットを販売できるか決めるために、衛星画像、森林調査、コンピュータープログラムを利用。	17.9百万米ドル (2021年4月、 シリーズA)
OroraTech	ドイツ	2018年	既存の衛星データを活用した森林火災把握サービスを研究機関やNGO団体向けに提供。資金調達により、世界中の森林火災をほぼリアルタイムで特定できる自社の超小型衛星コンステレーションの構築を目指す。	5.8百万ユーロ (2021年1月、 シリーズA)
Komaza	ケニア	2006年	利用されていない土地を持つ農家が同社の指導のもとで苗木を植える。その後、長い年月をかけて木々が育ち、伐採されると農家に報酬が支払われる。「林業版Airbnb」とも呼ばれる。	28百万米ドル (2020年7月、 シリーズB)
Land Life Company	オランダ	2013年	土地の劣化を食い止めるために、ドローン、AI(人工知能)、モニタリングアプリケーションなどのデータとテクノロジーを活用。植林事業を本業として長期的かつ恒常的に行っている上、豊富な知識とノウハウを持つ専門家を自社に擁し、関連技術の開発も自社で行う。	3.5百万ユーロ (2018年10月、 シリーズA)

(出所) 各種資料より野村資本市場研究所作成

## 2. 宇宙ベンチャー（衛星監視／クライメートソフトウェア）

宇宙関連ビジネスを手掛けるスタートアップ「宇宙ベンチャー（Space Ventures）」を主な投資対象とするファンドを手掛ける「Space Capital」と米国のシリコンバレーバンク（Silicon Valley bank、SVB）が共同で執筆したレポート「The Great Climate Opportunity」において、「宇宙技術は、世界の気候市場を可能にする上で基本的な役割を果たす。重要な気候変数（情報）の半分以上は宇宙からしか測定できず、正確な天気予報（のためのデータ）の99%は宇宙からしか得ることが出来ない<sup>51</sup>。（衛星）打ち上げサービス、衛星コンポーネント、クラウドコンピューティングがコモディティ化したことで、起業家が新しい気候変動対策ツールを開発する際の障壁が低くなった」「宇宙関連技術への投資は、気候変動に関する命題を明確に説明する上で不可欠であり、農業、エネルギー、金融、保険、物流、IT、気象など隣接する産業全体にわたる独自の視点を提供する」と述べている<sup>52</sup>。

事実、IPCCは各国のGHG排出量を正確に把握するためのガイドラインにおいて、人工衛星の活用を盛り込んでいる。特に統計手法やインフラが整備されていない新興国においても、人工衛星から観測した地上のCO<sub>2</sub>等データをもとにGHG排出量の把握につなげることが可能となる。

<sup>51</sup> World Economic Forum, “Six ways space technologies benefit life on Earth,” briefing paper, September 2020.

<sup>52</sup> Space Capital, Silicon Valley Bank, “The Great Climate Opportunity,” August 2021.

すでに、衛星技術を活用して気候変動問題に関するソリューション提供を試みるスタートアップも出てきている（図表 12）。

先述のアマゾン The Climate Pledge Fund の投資先の一つである「Pachama」（2018 年設立、本社米国）は、2021 年 4 月 1,500 万米ドルの資金調達（シリーズ A）を実施している。投資家には、リードインベスターである Breakthrough Energy Ventures の他 Lowercarbon Capital 等が名を連ねる。創業者で連続起業家の Diego Saez Gil 氏は、南米旅行で森林破壊の惨状を目の当たりにし同社を起業したという。

また、気候に焦点を当てた衛星コンステレーション（小型衛星群）企業である「Muon Space」（2021 年設立、本社米国）は、設立から間がないにもかかわらず 2021 年 10 月、1,000 億米ドルの資金調達（シードラウンド）を実施している<sup>53</sup>。

上記のような企業は、「クライメートソフトウェア（気候変動対策ソフトウェア）」（のスタートアップ）として取り上げられることもある<sup>54</sup>。人工衛星の製造や打ち上げといったハード面ではなく、データの収集・分析・活用といった IT 企業に似たビジネスモデルとして捉えられている。すでに、衛星の打ち上げビジネスには SpaceX をはじめ民間企業が参入している。また、基地局を含むオペレーションについても Amazon が運営する

図表 12 クライメートテック関連宇宙ベンチャーの例

会社名	本社	設立	概要	直近の ファイナンス
GHGSat	カナダ	2011 年	温室効果ガス(GHG)、大気質ガス(Air quality gas)、およびその他の微量ガス排出のリモートセンシングを目的としたグローバルな排出モニタリングサービスを提供。同社のサービスでは、地理座標を使用して世界中の産業施設からのガス濃度を測定。また、GHG および大気質ガスの測定を、同等の代替手段に比べて数分の 1 のコストでより正確に行うことができ、事業者が環境をクリーンに保つことを可能にする。	45 百万米ドル (2021 年 7 月、 シリーズ B)
Muon Space	米国	2021 年	気候に焦点を当てた衛星コンステレーション（小型衛星群）企業。リモートセンシング・コンステレーションプラットフォームを構築し、顧客に重要な気候および地球システムのデータを提供する。	10 百万米ドル (2021 年 5 月、 シードラウンド)
Regrow Ag	米国	2016 年	作物を追跡、監視、管理するために設計された自動農業プラットフォームを開発。同社のプラットフォームは、ドローンや衛星に搭載された精密なハイパースペクトルカメラを使ったリモートセンシング画像を提供することで、作物パフォーマンスの推定や診断を行い、農家や農学者がストレスの特定などの現代的な作物生産の問題を知ることを可能にし、化学物質を節約して収量を増やすことができる。	23.5 百万豪ドル (2021 年 8 月、 シリーズ A)
Pachama	米国	2018 年	森林による炭素回収を検証・監視する AI とリモートセンシングのプラットフォームを開発し、森林の保全と再生のための資金調達を支援している。同社のプラットフォームは、機械学習、衛星画像、ドローン、LIDAR 技術を組み合わせて、森林の保全と再生の規模を拡大することで、顧客の炭素排出を森林の保護と復元に振り向けることを可能にする。	15 百万米ドル (2021 年 4 月、 シリーズ A)

（出所）Space Capita および Crunchbase データより野村資本市場研究所作成

<sup>53</sup> Muon Space, “Muon Space Raises \$10 Million Seed Financing to Improve Data-Driven Climate Action,” October 6, 2021.

<sup>54</sup> 例えば、“Climate Software Startups Are Suddenly A Hot Investment,” *Crunchbase News*, October 14, 2021. など。

「AWS Ground Station」を利用することで、独自のアンテナ・基地局をもつことなく、利用した時間分だけの課金で衛星と通信することが出来る<sup>55</sup>。商業化までのコストの低下および時間の短縮により、今後この分野への参入の増加、さらなる投資資金の流入が予想される。

日本でも、JAXA ベンチャー<sup>56</sup>に認定された「DATAFLUCT」（2019年設立、本社東京）では衛星データを活用し、大気中のCO<sub>2</sub>濃度と経済活動を可視化する環境モニタリングサービスの提供を開始している。同社は2021年4月、東京大学エッジキャピタルパートナーズを引受先とする第三者割当増資（シリーズA）により3億円の資金調達を実施している<sup>57</sup>。

## IV 終わりに／日本への示唆

2050年カーボンニュートラルをコミットする国や企業が増加したことで、クライメートテック関連のスタートアップを取り巻く環境も大きく変化してきている。脱炭素は、温暖化対策であると同時に、成長機会でもあるという認識のもと、各国とも技術開発やスタートアップへの支援に取り組んでいる。

クリーンテック／クライメートテック分野の情報提供を行っている Cleantech Group（米国、2002年創業）は、2010年から毎年「GLOBAL CLEANTECH 100」として注目すべき100社のクライメートテック・スタートアップ（ユニコーン企業を除く）を選出している。この100社のリストには、日本企業は1社も入っていない（図表13）。

これについては、日本にクライメートテック分野で注目すべきスタートアップが存在しないというわけではなく、海外投資家を含めグローバルな知名度が低い、つまり海外への発信力が乏しいとみるべきであろう。クライメートテックに限らず、国内のスタートアップ（の経営者）は、ビジネスの立ち上げの場を含め、日本にこだわることなく、広く世界に目を向ける必要がある。

他方、日本としては、そういったスタートアップに魅力的な環境を整備する必要があるのはいうまでもない。先述のシンガポールのアグリフードテックに対する支援やルクセンブルクの宇宙資源ビジネスを手掛けるスタートアップ誘致のための支援策（資金、法的、人的サポート）<sup>58</sup>は、国の政策と合致した分野に焦点を当てた施策として参考となろう。

いずれにせよ、この分野では多額の投資を必要とする。特に、スタートアップへの投資に関しては、その事業ステージ（シード、アーリー、ミドル、レイター）に合致したエクイティ資金が必要となる。事業の収益化が実現された段階（レイター・ステージ）であれ

<sup>55</sup> <<https://aws.amazon.com/jp/ground-station/>>

<sup>56</sup> 宇宙航空研究開発機構（JAXA）の知的財産や JAXA の業務で得た知見を利用して事業を行う、JAXA の職員が出資し設立したベンチャー企業（スタートアップ）。

<sup>57</sup> 同サービスに利用する GHG 観測技術衛星「GOSAT（Greenhouse gases Observing SATellite、愛称：いぶき）」は2009年1月に打ち上げられた主要な GHG である CO<sub>2</sub> とメタンガスの濃度を宇宙から観測することを専門とした、世界初の人工衛星である。

<sup>58</sup> 前掲脚注43参照。

図表 13 GLOBAL CLEANTECH 100 (2022 年)

本拠地 カテゴリー	計	米国	カナダ	ドイツ	英国	中国	フランス	イスラエル	スウェーデン	スイス	オーストラリア	ベルギー	デンマーク	フィンランド	ギリシャ	香港	インド	韓国	オランダ	ノルウェー	スペイン
		計	100	51	14	8	5	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
エネルギー・電力 Energy & Power	41	22	5	6	2		1	1		1	1							1		1	
資源・環境 Resources & Environment	21	10	6		2	1				1		1									
交通・輸送 Transportation & Logistics	14	6	2	1		1								1	1		1				1
農業・食料 Agriculture & Food	12	6		1	1			1					1			1				1	
材料・化学製品 Materials & Chemicals	11	6	1			1	1		2												
実現技術 Enabling Technologies	1	1																			

(出所) Cleantech group, “GLOBALCLEANTECH100 2022,”より野村資本市場研究所作成

ば、国内外の VC、PE ファンド、年金基金等からの投資をいかに獲得するかがカギとなる。一方、研究開発段階（シード、アーリー・ステージ）では、公的資金に加え、富裕層等のエンジェル投資家による投資の流れを拡大させる必要がある。

また、大企業についても VC への投資に加え、CVC を設立しスタートアップ投資を行う企業も増えてきている。エグジットまでの期間が長いスタートアップへの投資において、今後 CVC の役割は重要になってこよう。

日本政府は、2020 年 12 月に「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を策定、GHG 排出削減の観点から取り組むべき 14 の重要分野を設定している。この 14 分野の知財競争力について主要 8 カ国（米国、中国、韓国、台湾、英国、ドイツ、フランス）を比較したデータ（「エネルギー白書」2021 年版）によると、「日本は比較的高い知財競争力を保有している<sup>59</sup>」。これらの知財を含め、これからのテクノロジーをどうやって社会実装までもっていき、さらに収益を生むビジネスとして立ち上げることが出来るかが課題である。大企業とスタートアップの連携において、資金提供とともに知財におけるサポートも有用であろう<sup>60</sup>。加えて大企業の人材の活用（スタートアップへの派遣等）にも期待したい。

また同成長戦略では「政府の 2 兆円の予算を呼び水として、民間企業の研究開発・設備投資を誘発（約 15 兆円）し、野心的なイノベーションへ向かわせる。世界の ESG 資金約 3,000 兆円も呼び込み、日本の将来の食い扶持（所得・雇用）の創出につなげる」との記

<sup>59</sup> 資源エネルギー庁「エネルギー白書 2021」（アスタミューゼ（株）「令和 2 年度エネルギーに関する年次報告書に係る脱炭素関連技術の日本の競争力に関する分析作業等」の分析）。

<sup>60</sup> 竹下智「米国の特許を利用したベンチャー支援プラットフォームーベンチャー企業の株式を対価に特許訴訟対策ー」『野村資本市場クォーターリー』2018 年冬号参考。

述もみられる<sup>61</sup>。その際、スタートアップへのファイナンスに関しては、X-Prize 財団による賞金コンテストや米国航空宇宙局（NASA）の COTS プログラム（民間企業による国際宇宙ステーションへの貨物/人員輸送システムの開発支援）のような、マイルストーンを決め、その都度資金を提供するような取り組みも検討に値しよう<sup>62</sup>。

民間に任せることが出来る分野・投資については、出来る限り民間に任せ、政府は規制緩和やルール作りでサポートする。一方、民間でリスクの取れない部分については、資金も含め積極的に関与する。そういった国をあげた戦略のデザインが必要なのではないだろうか。

本レポートで触れた DAC、森林（植林）、衛星監視等のスタートアップによるイノベーションのスピードアップ、スケール化において、排出権の「市場化」「金融ビジネス化」、つまり「排出権取引市場」の本格的な整備が必須である。日本においては、国内全域をカバーするものであることはもちろん、海外で創出されたクレジットとの互換性も必要である<sup>63</sup>。

さらに、政府には、炭素クレジットの質に関する基準や評価の枠組みについて、国際的な議論への積極的な参加、先導的な役割を期待したい。そこにこそ、新たな成長戦略としてのハード（実際の製品）を伴うテクノロジーを裏付けとした新たなビジネス分野の創出があるのではないだろうか。

---

<sup>61</sup> 内閣官房等「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」令和3（2021）年6月18日。

<sup>62</sup> COTS プログラムについては、前掲脚注 43 参照。

<sup>63</sup> 関雄太「カーボンプライシングへの市場メカニズム導入と森林投資」『野村サステナビリティクォーターリー』2021年秋号参考。