

革新技術が描く電力系統の新たな可能性

産業調査ソリューション室 村松 周平、梅津 譜

要旨

- エネルギー政策ではS+3E(安全性と安定供給、経済効率性、環境適合)が基本方針となっているが、電力系統は、増加する電力需要に対応する供給力の確保と、電力に由来するGHGの削減の両立という困難な課題に直面している。再生可能エネルギーなどのクリーン電源の導入拡大と既存電源のクリーン化を並行して進める必要があるが、このような電源構成の変化は時間的および地理的な需給のミスマッチを生むため、電力系統全体における電力需給の調整や送配電網増強が欠かせない。
- 現在、クリーン電源の拡大余地を広げるペロブスカイト太陽電池や、再エネの拡大に伴って必要性の高まる蓄電池、長期エネルギー貯蔵技術(LDES)、デマンドレスポンス(DR)に期待が集まる。電力系統における課題は多様かつ複雑であるため、長期的にはより多様な技術開発と社会実装が求められる。

2050年カーボンニュートラル(CN)実現に向けて取り組みが急がれる中で、幅広い産業において、既存のシステム・プロセスからの脱却や、新技術導入の必要性が高まっている。

国際エネルギー機関(IEA)の「World Energy Outlook 2023(2023年版世界エネルギー見通し)」(WEO 2023)では、2030年までの温室効果ガス(GHG)排出削減目標量の8割を削減するための主要施策として、それぞれ23年比で①再生可能エネルギー設備容量を3倍とする、②エネルギー効率の改善ペースを2倍にする、③メタン排出を75%削減する、の三つが示され、23年12月の国連気候変動枠組条約第28回締約国会議(COP28)で118ヵ国によって誓約された。このうち、①の再生可能エネルギーを3倍とする施策は、GHG削減効果が大きいものの、既存電源に最適化された大規模集中型の電力系統からの転換や技術革新が必要であり、達成は容易ではない。

技術革新は、CN実現を経済合理的に進めていくためにも極めて重要である。WEO 2023では、50年ネットゼロ実現(NZE)に必要な技術のうち、現状成熟したものは20%程度であり、45%は量産化や技術革新によってさらなる価格低減が求められる技術、残り35%は現在市場に存在していない技術が占める。CN実現に向けて、革新技術の開発・実装を一層強化する必要がある、日本企業の競争力強化にとっても大きなチャンスとなる。

日本においても、電力由来のGHG排出量は国内総排出量のおよそ4割を占めており、CN実現に向けて電力系統のトランジションは重要な役割を担う。本稿では、電力系統が直面する課題を起点として、将来の電力系統のあり方や必要となる技術、さらに各技術に対するグローバル企業の投資動向を整理する。

1. 電力需要増加の可能性と脱炭素化

電力系統は、増加が見込まれる電力需要に対応する供給力の確保と、電力に由来するGHGの削減の両立という困難な課題に直面しており、これらの解決のためには、GHGを排出しないクリーン電源の導入拡大と既存電源のクリーン化を並行して進める必要がある。

近年、電力広域的運営推進機関(OCCTO)やIEAなど、多くの電力・エネルギー関連機関が、50年にかけての電力需要増加を予想している。具体的には、EV導入やヒートポンプ(HP)活用といった電化やデジタル化の進展などによる電力需要の増加量が、人口減少や省エネ推進による電力需要の減少量を上回ると試算される。特に、IoT化や生成AIの活用機会拡大に伴うデータセンター(DC)や通信ネットワークにおける電力需要増加の影響は大きく、IEAは「Electricity 2024」において、世界全体のDC電力需要が22年の4,600億kWh/年から26年に1兆kWh/年以上に達すると見込む。

こうした需要増加の可能性への対応と脱炭素化を両立するには再エネを始めとするGHGを排出しないクリーン電源のさらなる導入拡大が求められるが、足元では適地不足や発電コストの高止まりといった課題に直面していることから、革新技術の必要性が高まっている。例えば、これまで再エネ普及のけん引役であった太陽光発電については、軽くて曲げやすい特性から建築物壁面や耐荷重が小さい屋根などさまざまな箇所への設置が可能で、発電効率も高いペロブスカイト太陽電池に期待が集まる。同様に、風力発電については、広大な排他的経済水域(EEZ)を含む風況の安定した地域での開発に向けて、設置箇所の水深の影響を受けづらい浮体式洋上風力が鍵となる。さらには、日本の地理的特性を生かせる地熱発電や海洋エネルギーを用いた潮汐力発電・潮流発電なども再エネ普及拡大に向けた選択肢となろう。

原子力分野では、核燃料由来の熱を利用し水素製造も可能な高温ガス炉や、使用燃料や放射性廃棄物の削減が期待される高速増殖炉にも注目が集まる。加えて、現状技術成熟度は低いが、重水素を用いて安全に電力を生み出せる核融合も注目されており、米国を中心に多くのベンチャー企業が技術開発を進める。24年主要国首脳会議(G7)気候・エネルギー・環境相会でも、CN実現やエネル

ギー安全保障といった世界的課題に対する解決策として核融合技術が取り上げられており、今後世界的に取り組みが加速するであろう。

加えて、既存の主力電源である火力発電のクリーン化も重要である。日本の電力事業者や重工メーカーが中心となって水素・アンモニアなど混焼・専焼の技術開発を進めるほか、排出したCO₂の回収・貯留(CCS)や、カーボンクレジットの調達によるカーボン・オフセットも現実的な選択肢となる。

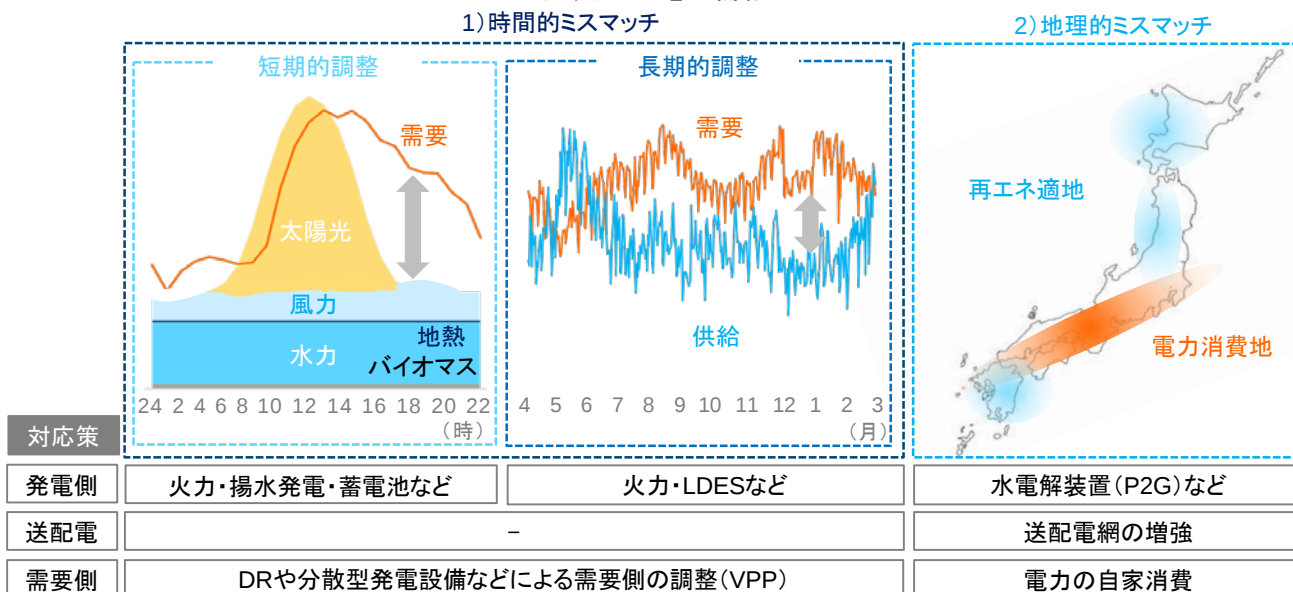
2. 電力需給のミスマッチ

今後は太陽光発電や風力発電を始めとするクリーン電源のさらなる導入拡大が期待される一方で、それに伴う電源構成の変化は時間的および地理的な需給のミスマッチを生むため、電力系統全体における電力需給の調整や送配電網増強の必要性が高まる(図表2-1)。

2-1. 時間的ミスマッチ

電力系統において、電気の品質を保ち停電などの障害を防ぐためには、電力の需要量と発電量を常に一致させる必要がある(同時同量の原則)。しかし、太陽光発電や風力発電といった時間や天候によって発電量が異なる変動型再エネ(Variable Renewable Energy、VRE)の拡大や、需給 balan

図表2-1 電力需給のミスマッチ



(備考) 各種資料により日本政策投資銀行作成

スの調整機能を有する火力発電の休廃止の進展により、今後電力の需給調整がよりいっそう難しくなると想定される。このことから、需給それぞれにおいて追加的な調整力の確保が求められる。

発電側においては、これまで調整機能を担ってきた火力発電や揚水発電に加えて、蓄電池を始めとしたさまざまな蓄電技術の導入が鍵となる。また、50年に向けて再エネの導入が進展すれば、蓄電池が得意とする短期的な調整のみならず、日単位から季節をまたぐような長期間の調整力の必要性が高まるため、既存技術に加えて長期エネルギー貯蔵技術(Long Duration Energy Storage:LDES)の導入が期待される。LDESとは長期間エネルギーを保存する技術の総称であり、電解液をポンプで循環させ、イオンの酸化還元反応によって充放電を行うレドックスフロー電池や、物質の温度差や相変化を利用した蓄熱発電、コンクリートなどの重量物の位置エネルギーによって充放電を行う重力蓄電などのさまざまな技術の研究開発・普及が進む(図表2-2)。

また、需給調整コストの削減に向けて、旧来は電力消費者という受動的な立場にあった需要側についても、能動的な調整力の提供が求められる。電力需要を調整するデマンドレスポンス(DR)や自家発電設備、蓄電装置などを個別に利用することに加えて、これら複数のソリューションをデジタル技術によって組み合わせ、仮想的な発電所のように機能させる仮想発電所(Virtual Power Plant:VPP)などの取り組みを通して、需要側が今後の系統における調整力確保に重要な役割を果たす。

2-2.地理的ミスマッチ

もう一方の課題である地理的ミスマッチとは、再エネの適地と電力消費地が物理的に離れており、発電した電気を何らかの方法で需要地に届ける必要が生じていることを示す。実際に日本全体を俯瞰すると、電力需要は太平洋ベルトに集中する一方、余剰地が豊富で、日射量や風況に優れた再エネ適地は北海道や東北、九州などに存在しており、再エネ適地と需要地を結ぶ送配電網の容量不足

図表2-2 主要なLDESと技術成熟度

名称	TRL(2023)	概要
揚水発電(PSH)	11	すでに広く活用される。下部貯水池の地下化(落差拡大)や海水の活用、小規模なモジュール化などの検討が進む
レドックスフロー電池	9	電解液をポンプで循環させ、イオンの酸化還元反応によって充放電を行う。バナジウムレドックス電池(VRB)が現在もっとも成熟している
水電解装置・燃料電池	9	水電解装置や(SOECなど)を用いて電力から水素を製造し、逆反応である燃料電池(SOFCなど)を用いて水素から電力を生成する
フライホイール蓄電	8	空気摩擦や回転摩擦を最小限に抑え、回転慣性として電気エネルギーを真空中のホイールに蓄える
熔融塩電池	8	300~350℃程度の熔融塩を電解液として使用する。日本ガイシがナトリウム硫黄電池(NAS電池)を実用化済み
顕熱蓄熱	8	金属・レンガ・熔融塩などの耐火性を有する物質を加熱することでエネルギーを貯蓄
液体空気エネルギー貯蔵(LAES)	7	極低温(<-196℃)まで圧縮した液体空気を保管することでエネルギーを貯蓄。液体空気を再加熱・膨張させることでタービンを回し発電する
重力蓄電	7	コンクリートブロックなどの物体を持ち上げることで、電力を位置エネルギーに変換。揚水発電と原理は同じだが、地理的制約が少ない
潜熱蓄熱	7	特定の温度において、固体・液体・気体の間で状態変化(相変化)する物質の潜熱を利用することでエネルギーを貯蔵
圧縮空気蓄電(CAES)	6	地下空洞などに圧縮した高圧空気を圧入することでエネルギーを貯蔵。LAESと比較してコストは安い、地理的制約が存在

(備考)1.各種資料により日本政策投資銀行作成

(備考)2.TRLとは、IEAが公表している各エネルギー技術の成熟度レベル(Technology Readiness Level)のこと。数字が大きいほど成熟しており、1~3がコンセプト段階、4~6がプロトタイプ、7,8が実証、9,10が商業稼働、11が成熟の段階にある技術

により、再エネでは出力抑制が余儀なくされている。

本課題への対応としては、①送配電網の新設・増強や②送配電網を用いない形でのエネルギー輸送といった電力輸送の高度化・効率化に加えて、③発電所付近への電力需要施設などの誘致や④電力需要地への発電所の設置(電力の自家消費)も有効であろう。特に、発電にかかわるkWh当たりのコストを示す発電コスト(LCOE)に加えて、送配電網の増強や需給調整費用などの追加発生費用も踏まえた統合コスト(System Integration Cost)を最小化するために③や④の取り組みが注目される。

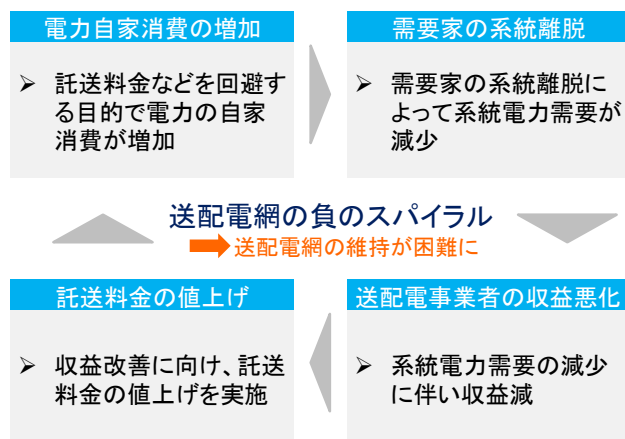
①送配電網の新設・増強については、23年にOCCTOが広域系統長期方針(広域連系系統のマスタープラン)を策定し、50年に向けた地域間連系線などの増強方策を示した。こうした増強に向けた革新技術としては、交流送電と比べて電力損失が少ない高圧直流送電(HVDC)が実用化済みであり、電気抵抗をゼロにすることで電力損失を大幅に抑制できる超電導送電技術も実証フェーズにある。また、②送配電網を用いない形でのエネルギー輸送としては、再エネ電源を用いて製造した水素やメタンの輸送(Power to Gas:P2G)や、船舶に蓄電池を搭載した電気運搬船の活用が検討される。

一方、③発電所付近への電力需要施設などの誘致としては、再エネ発電施設付近にデータセンター(DC)や工場などの電力多消費型施設を誘致することが考えられる。さらに、④電力需要地への発電所の設置については、DC・工場・商業施設などに太陽光パネルを設置し、生み出された電力を自家消費することなどが考えられる。この場合、通常時は電力需給が施設内で完結するため、送配電網の混雑が防止され、送配電網における出力抑制や系統増強の削減に資する。電力の自家消費に向けたクリーンな発電技術としては、小型の水素ガスタービンや小型モジュール炉(SMR)などの開発が進むほか、先に挙げたペロブスカイト太陽電池も建築物壁面や耐荷重の低い屋根などあらゆる場所へ設置可能なため期待が大きい。なお、ペロブスカイト太陽電池も他の再エネと同様に発電量

が変動するため、DRや需要側併設蓄電池を用いて施設内の電力需給調整を行い、逆潮流の抑制やインバランスの最小限化を行うことが期待される。また、住宅区域についてもペロブスカイト太陽電池やDRなどを用いて電力の自家消費を行うことにより、日本全体の統合コストの削減と地域の電力安定供給に資する地域マイクログリッドの構築が促進される。

一方で、現状の電力システムでは、電力自家消費の増加による需要家の系統離脱が、一般送配電事業者の収益性悪化、託送料金の値上げを通じて、さらなる系統離脱につながり、結果として送配電網の維持が困難になるという、送配電網の負のスパイラルと呼ばれる問題が発生する(図表2-3)。需要家にとって電力の自家消費は、系統(送配電網)使用時に発生する託送料金や再エネ賦課金が不要となるため、コスト削減に寄与する。一方で、一般送配電事業者の観点からは、系統電力需要の縮小により託送収益が減少するため、老朽化した送配電網の維持・更新や今後の増強に要したコストを回収するには託送料金の値上げを行わざるを得ない。その際、需要側にとっては、系統利用時と比較した際の自家消費の経済性が相対的に向上するため、系統離脱のインセンティブが高まる。このようなスパイラルによって、系統電力を利用する需要家の負担増や、今後の送配電網の改修工事などにかかわる資金不足が発生し、電力の安定供給に影響を及ぼす。

図表2-3 送配電網の負のスパイラル



(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

負のスパイラルが発生する主な要因は、一般送配電事業者が送配電網の固定費回収を従量料金を中心に行っていることであり、解決策として固定料金の引き上げも一案として考えられる。使用電力全量をオンサイトで調達するDCであっても、系統接続によって需給調整や、停電リスクの低減という便益を享受しているため、固定料金での費用回収額の引き上げも合理的な選択肢といえる。

3.企業の取り組みから見る新技術に対する期待

前節まででは、電力需要の動向やCNに向けた潮流をもとに、将来の電力システムのあり方や、必要となる技術を示してきた。本節では、実際の企業の取り組みをもとに各技術の注目度を明らかにする。特に、新技術にフォーカスする意味で、エネルギー大手のCVCや有名VCの投資先、テックアワード受賞企業、ユニコーン企業やグリーンイノベーション基金(GI基金)採択事業の中から今回のテーマである電力関連企業・事業を300社程度抽出し、事業内容に基づいて分類・集計した(図表3-1)。

石油ガス会社CVCの中では、Shell(イギリス)やEquinor(ノルウェー)、Chevron(アメリカ)、bp(イギリス)などの脱石炭・電化の流れに直面する大手企業が、事業転換を見据えた積極的なベンチャー企業への投資を進めている。投資先の技術分野は、

EV関連アプリケーションなどの需要側デジタル技術や、ハードウェアでは蓄電池・LDESなどの需給調整に関わるものが目立つ。一方電力会社は自社内で取り組んできた研究開発が中心であるため、ガス会社と比べると投資件数は少ない。

有名VCとしては、CN実現を目的としてビル・ゲイツが設立したBreakthrough Energyや電力系デジタル技術に特化したEnergy Impact Partners(EIP)、クライメートイノベーションファンドを運営するMicrosoftなど米国を中心として多くの有名プレイヤーが存在する。クライメートテック投資全体の中で、投資件数は電力分野向けが少なく、内訳は石油ガス会社と同様に蓄電池や需要関連デジタル技術への出資が目立つ。

テックアワードでは、クライメートテック分野でもっとも革新的な100社を選出するGlobal Cleantech 100や、デロイトが技術分野で急成長している500社をピックアップしたTechnology Fast 500、テクノロジーに焦点を置くビジネスメディアFast Company社によるNext Big Things in Techなど五つのアワードを選出した。選出企業の中では、電力消費の可視化やEVの電力系統への接続(V2G)などを行う需要関連や、需給調整などを行う送配電関連のデジタル技術が多い。

図表3-1 各投資先企業・事業の集計

ハード	石油ガス会社 CVC	電力会社 CVC	有名 VC	テックアワード	ユニコーン 企業	GI基金	合計
太陽光・熱	6	4	4	2	3	2	21
風力	1	1	1	3	0	2	8
その他再エネ	6	1	4	4	0	0	15
原子力	4	0	4	1	1	0	10
火力	1	1	3	1	0	0	6
送配電	0	3	3	0	1	0	7
蓄電池	15	2	12	9	7	1	46
LDES	8	2	5	6	0	0	21
EV	3	3	3	1	9	0	19
HP	0	0	0	1	0	0	1
その他電化	0	2	3	3	1	1	10
合計	44	19	42	31	22	6	164
デジタル	石油ガス会社 CVC	電力会社 CVC	有名 VC	テックアワード	ユニコーン 企業	GI基金	合計
発電	1	5	5	8	1	0	20
送配電	9	6	4	10	1	0	30
需要	38	12	18	18	2	0	88
全体	3	1	4	4	0	0	12
合計	51	24	31	40	4	0	150
総計	95	43	73	71	26	6	314

(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

評価額10億ドル以上・設立10年以内の未上場ベンチャーであるユニコーン企業に注目すると、低いライフサイクルGHGを強みにリチウムイオン電池(LiB)開発・販売を行うNorthvolt(スウェーデン)などの蓄電池メーカーや、Netaのブランド名でEVの開発を行う合衆新能源汽车(中国)などのEVメーカーの件数が多い。

また、日本では大企業が研究開発をリードしており、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)に造成されたGI基金では、日本政府の産業政策であるグリーン成長戦略における14の重点分野に基づき、ペロブスカイト太陽電池、洋上風力、蓄電池などの技術に係る研究開発・社会実装が進む。

これらの各件数を統合すると、スタートアップ投資などの領域においては、図表3-2、3-3の通りハードウェアでは蓄電技術(蓄電池+LDES)や太陽光発電、デジタル技術ではDRなどの需要関連への注目が高いといえよう。これは、前節までにおける分析とも整合的である。

ただし、本分析で用いた企業の投資行動は、現在の政策動向や技術の経済性、実装時期などを現実的に踏まえた上で、Low Hanging Fruitsと呼ばれる収益化が容易な領域で活発に行われていると考えられ、本稿の注目技術が必ずしも電力系統における最重要技術ではない点に留意が必要である。民間企業の資金が届かないHigh Hanging Fruitsに該当するような重要技術に対しては、十分な政府支援が必要となろう。

図表3-2 ハードウェアにおける注目領域

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	概要
注目度												
蓄電池												蓄電池は自動車・電力双方のCN実現において重要。LiBを上回る性能の新型蓄電池の開発が進む
太陽光												太陽光発電はIEA WEO 2023でもっとも導入が期待される再エネであり、技術開発にも注目が集まる
LDES												現状多様なLDES技術が開発されており、デファクトスタンダードは現状定まらず
EV他												EVに関する市場規模が急速に拡大する中で、さまざまなベンチャー企業が本領域に参入
その他再エネ												安定した再エネとして地熱発電に注目が集まる
原子力												核融合ベンチャーに対する注目がやや集まる。SMRや熔融塩炉などの核分裂系は既存大企業が取り組みを進める
電化												CO ₂ 排出量の多い高炉や冷却システムの電化に対して、やや注目が集まる
風力												大手風車メーカーが取り組む分野であり、ベンチャー企業の参入は限定的
火力												重機メーカーなどが取り組む分野であり、ベンチャー企業の参入は限定的
送配電												超電導ケーブルを除きすでに成熟した分野であるため、ベンチャー企業の参入は限定的
HP												IEAもHPを重要技術と定義するも、家電メーカーなどが取り組む分野であり、ベンチャー企業の参入は非常に限定的

(備考)1.各種資料により日本政策投資銀行作成
2.横軸は、IEAのTRLに基づく

図表3-3 デジタル技術における注目領域

注目領域		IoT	AI	その他	技術例
注目度	需要	○	○		DR自動指令、IoTデバイス制御
		○		○	電力消費量の可視化
			○	○	充電スポット管理、充電スポット表示アプリ
	送配電		○		インバランス調整
		○	○		ドローンによるデータ収集、画像認識を用いた設備保全
	全体			○	発電・送配電・小売の一元管理
			○	○	サイバー攻撃検知・防御、データ復旧
	発電	○	○	○	再エネ適地のマッピング、天候予測
			○	○	火力発電の燃料調達・運用最適化

(備考)各種資料により日本政策投資銀行作成

4.おわりに

電力系統において、既存技術のみを用いて、S+3E（安全性と安定供給、経済効率性、環境適合）もしくは海外で使われるAvailability（安定した供給）、Accessibility（幅広いアクセス可能性）、Affordability（経済性）と、Acceptability（環境や地域への適合性）の4Asで示される強靱で持続可能なエネルギー供給を実現することは困難である。15年のパリ協定から8年余りが経つ中、既存技術のコストは大幅に低減し、新たな革新技術の開発が進められているが、2050年CNという目標時期が近づいており、取り組みをさらに加速させる必要がある。短期的には、ペロブスカイト太陽電池などのクリーン電源技術や、蓄電池やDR、長期的にはLDESといった需給調整技術の早期の社会実装が

求められる。電力系統における課題は多様かつ複雑であるため、長期的には本稿に記載されていない技術も含めて、さまざまな技術開発が求められる。

また、CN関連技術に対しては、米中をはじめとする主要国が強力な産業政策を推し進めており、国際的な競争が激しくなっている。CN目標の達成だけでなく、革新技術の早期実装による収益機会の獲得が望まれる。両目標の実現に向けては、政策的な助成が期待されるとともに、回収が見込まれる場合には、リスクマネーを供給する余地がある。金融面においては、スタートアップや大企業の有する有望技術のカーブアウトなどへの投資、メザニンファイナンスといった取り組みを拡大することが期待されよう。

©Development Bank of Japan Inc.2024

本資料は情報提供のみを目的として作成されたものであり、取引などを勧誘するものではありません。
本資料は当行が信頼に足ると判断した情報に基づいて作成されていますが、当行はその正確性・確実性を保証するものではありません。本資料のご利用に際しましては、ご自身のご判断でなされますようお願い致します。本資料は著作物であり、著作権法に基づき保護されています。本資料の全文または一部を転載・複製する際は、著作権者の許諾が必要です。当行までご連絡下さい。著作権法の定めに従い引用・転載・複製する際には、必ず、『出所：日本政策投資銀行』と明記して下さい。

お問い合わせ先 株式会社日本政策投資銀行 産業調査部

Tel: 03-3244-1840

e-mail(産業調査部): report@dbj.jp