



欧州で加速する浮体式洋上風力の商用化に向けた動き —2040年までに最大45GW洋上風力導入を目指す日本も浮体式に期待—

2021/7

三井物産戦略研究所
技術・イノベーション情報部 コンシューマーイノベーション室
趙 健

Summary

- 着床式に比べ設置可能面積が広い点でポテンシャルが高い浮体式洋上風力発電は、将来の導入拡大が期待される技術であり、日本においても大きな導入余地がある。
- これまでの実証事業を通じて複数の浮体技術が商用化手前まで進展するなか、課題となるコスト削減や運営ノウハウの獲得に向けて、欧州を中心により大規模な案件の推進が加速している。
- 今後欧州とアジアを中心に導入が拡大し、先行する欧州では2030年までの累計導入量は10GW以上と予想される。洋上風力産業の競争力強化を図る日本にとって、サプライチェーンの形成やノウハウの取得には欧州勢との連携が求められることとなる。

はじめに

陸上より風況がよく、大型風車を設置しやすい洋上での風力発電は、有望な再生可能エネルギーとして期待されている。洋上風力発電には、海底に直接基礎と風車を設置する着床式と、海底に係留した浮体基礎上に風車を設置する浮体式の2種類がある。現在は世界的に着床式を中心に導入が進展しているが、水深の制限などから適地は限られる。そのため洋上風力発電の導入拡大を目指すには、深海への設置が可能で、設置面積の拡大が見込める浮体式洋上風力の実用化は必要不可欠である。海底地形が急峻な日本においては、浮体式洋上風力の導入ポテンシャル¹は発電量ベースで原発約200基相当²の424GW³と推計され、着床式の128GWを大きく超えるが、着床式の2倍といわれる建設コストの削減が最大の課題となる。技術開発は日本と欧米が先行しているが、現在世界で系統に連系している発電容量74MWのうち、62MWを占める欧州が実証の規模においてリードしている。直近では、欧州を中心に浮体式風力の技術開発が商用化一歩手前まで進んでおり、大型実証案件が発表されるなど商用化に向けた動きの加速が予測される。本文ではその最新動向、要素技術と今後の展望について考察を行う。

¹ 一般社団法人日本風力発電協会試算。試算前提条件：排他的経済水域（EEZ）内、年平均風速7.0m/s以上、着床式水深10～50mの範囲、浮体式水深100～300mの範囲、案件当たり最低容量120MW以上を想定。

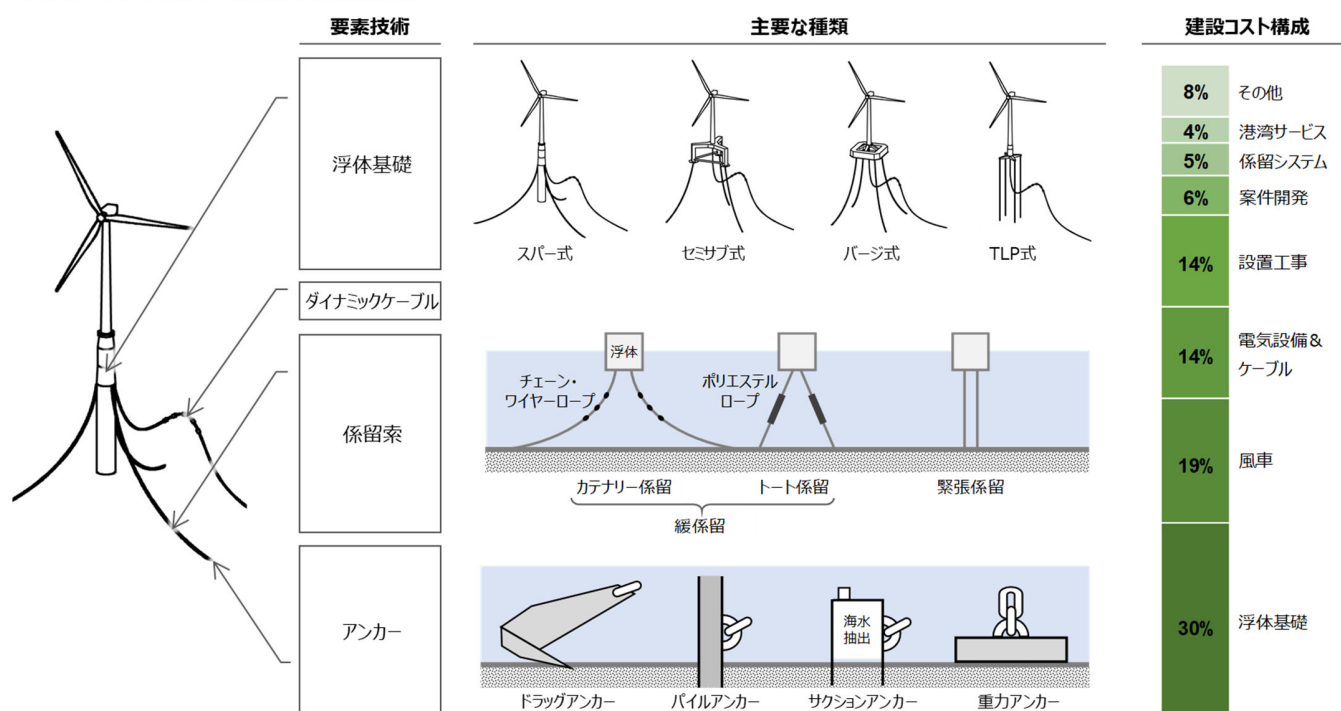
² 筆者試算。浮体式洋上風力設備利用率45%、原子力発電プラント出力1GW/基、設備利用率85%を前提として試算する場合、 $(424\text{GW} \times 45\%) \div (1\text{GW} \times 85\%) \approx 224.5$ 基の原子力発電プラントに相当する。

³ 1GW=1,000MW=1,000,000kW

浮体式洋上風力の主要要素技術

浮体式洋上風力は、厳しい気象条件および海流・潮流などの影響下でも安定した発電が求められており、大型風車を支える浮体基礎、耐久性と送電性能を両立するダイナミックケーブルおよび係留システムなど、図表1に示すような要素技術の確立が必要である。

図表1 浮体式洋上風力の要素技術

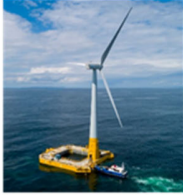


出所：

- 浮体基礎のイメージ：Ocean Engineering掲載論文「Human exposure to motion during maintenance on floating offshore wind turbines」(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002980181831254X> 2021年6月アクセス)
- 係留索とアンカーのイメージ：NEDO「浮体式洋上風力発電技術ガイドブック」(https://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku_guidebook.html 2021年6月アクセス)を参考に三井物産戦略研究所作成
- 建設コスト構成：ETIPWind (The European Technology & Innovation Platform on Wind Energy) 「Floating offshore wind factsheet」から三井物産戦略研究所作成

建設コストの3割を占める浮体基礎は最も重要な要素技術である。重さ数百トン以上の風車を支えながら、風、波浪の影響による揺れを最小限に抑制することが求められるほか、構造設計、製造工法、洋上の輸送と設置施工、メンテナンスなどにおける低コスト化も求められる。現状の主流浮体基礎は、主にスパーク式、セミサブ式、バージ式とTLP (Tension Leg Platform) 式に分類されており、技術成熟度、適応する水深、海域、係留方式と必要な海底地質条件、施工方法などは異なる(図表2)。これまでの研究開発と実証を通じて、スパーク式とセミサブ式との技術成熟度は、商用化手前(Pre-Commercialization)まで進展しており、バージ式も実証済みの段階に進んでいる。

図表 2 主流浮体基礎の特徴比較

	スパー式 SPAR	セミサブ式 SEMI-SUBMERSIBLE	バース式 BARGE	TLP式 TENSION LEG PLATFORM
実機写真・イメージ	 写真提供：戸田建設	 写真提供：(デンマーク)Vestas Wind Systems A/S	 写真提供：(仏)BW Ideol	 画像提供：三井海洋開発
技術成熟度（注）	高、30MW級パイロット案件実施済み	高、25MW級パイロット案件実施済み	中、3MW級デモ案件実施済み	低、水槽実験、技術実証の段階
復原性・安定性	重心が低く、復原性と安定性が高い	安定性が高く、揺れが少ない	揺れやすい	安定性が最も高く、揺れがほぼない
適応水深・海域	水深100m以上が必要、波浪条件が厳しい海域にも適する	水深40m以上から設置可能なため、適応海域が広い	水深30m以上から設置可能であるが、揺れやすいため静穏海域に適合	水深50m以上の海域に設置可能、軟弱地盤の海底には不適応
製造	構造が簡単で製造が容易、低コスト化が見込まれる	構造が複雑で、溶接作業が多く、製造工程が複雑	質量が高くなるが、構造が簡単で低コスト化が見込まれる	サイズが小さく、部品が少ないため製造しやすい
設置施工	風車の設置は洋上で実施するため、リフトクレーンが必要	風車とともに港で組み立ててから設置海域への曳航で設置可能	風車とともに港で組み立ててから設置海域への曳航で設置可能	風車とともに港で組み立ててから設置海域への曳航で設置可能。
係留システム	緩係留	緩係留	緩係留	緊張係留
メンテナンス	喫水が深いためメンテナンスが困難	帰港して大規模メンテナンスを行うことが可能	帰港して大規模メンテナンスを行うことが可能	構造が簡単でサイズも小さいためメンテナンスしやすい
メリット	製造が簡単で低コスト化が期待	適応海域が広く、組み立てと設置がしやすい	洋上施工の必要がなく、設置しやすい	安定性が高く、浮体構造がシンプル。占有する海底面積が小さい
デメリット	水深100m未満の相対的に浅い水域では設置困難	復原性維持のためには構造上質量が必要、製造の簡素化が課題	揺れが大きく、設置海域が限定される	係留システムのコストが高く、施工が困難。海底地盤条件に制限される
代表企業	戸田建設、(ノルウェー)Equinor	ジャパン マリンユナイテッド、(仏)Naval Energies、(米)Principle Power	(仏)BW Ideol、日立造船	三井海洋開発、(米)Glosten

注：Carbon Trust（英国政府により設立され、その後独立した環境コンサル組織）によると、技術成熟度評価は右記の9段階に分かれている：1.Initial Concept、2.Proof of Concept、3.Numerical Modeling、4.Tank Testing、5.Scaled Testing（＜1MW）、6.1～5MW Demo、7.>5MW Demo、8.Pilot（10～50MW）、9.Pre-Commercial（50～200MW）、これ以上は商業化段階

出所：Carbon Trust「Floating Wind Joint Industry Project Phase II summary report」、NEDO「浮体式洋上風力発電技術ガイドブック」、国土交通省「浮体式洋上風力発電施設技術基準（令和2年3月3日改正）」および各社公開資料を基に三井物産戦略研究所作成

ダイナミックケーブルは海中に浮遊しながら、浮体から変電所などに送電するケーブルであり、長期絶縁性、潮流や浮体基礎の動きによる損傷に耐えられる機械的強度、海流の影響による線形変動を抑える敷設計画などが求められる。また、将来の大規模浮体式洋上風力開発には、送電ロスが少ない220kV高圧ダイナミックケーブルの開発が期待されるが、現状の66kV製品よりケーブルが重く、硬くなるほか、曲げ半径が大きくなることでねじれ耐性が弱くなるなどの課題がある。

係留システムには構成要素として係留索とアンカーが含まれる。浮体と海底に固定しているアンカーをつなげる係留方式は、張力の強さによって緩係留と緊張係留に分けられる。緩係留は、チェーンの自重で安定性を保つカテナリー係留と初期張力を調整して緊張状態にある係留ラインの伸びによって係留力を得るトート係留の2種類を含む。カテナリー係留はアンカー設置施工が簡易であるが、占有海域面積が広く、船舶や漁業の妨げとなる可能性が挙げられる。ポリエステルロープを使用するトート係留は軽量化できるが、大把駐力⁴のアンカー設置が必要である。一方、緊張係留は強い張力で浮体を水中に引き込み、浮力を生み出す方式であり、高張力ケーブルなど高強度材料の開発が課題である。アンカーは設置と撤去の簡易

⁴ 把駐力：浮遊式海洋掘削装置をアンカー船位保持する際に係留力の基となるアンカーによる保持力をいう。（出典：独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構）

さから、現状ドラッグアンカー（drag-embedded anchor）と水圧差で固定するサクションアンカー（suction anchor）が最も多く使用されている。係留システムのさらなるコスト削減に向けて、低コスト材料開発、アンカーの共有や係留システムの最適化設計などの研究も行われている。

今後の実装と商用化に向けて、設置海域の水深、海況、海底地盤などの状況に合わせ、浮体と係留システムの最適な組み合わせが求められ、成熟度とコストのほか、当地の大型海洋構造物の製造や施工などサプライチェーンの状況を踏まえ、各要素技術を体系的に評価する観点が必要とされる。

上記に加え、浮体と搭載風車の一体化設計、浮体の量産化、低コスト施工、浮体式洋上変電所、姿勢制御、メンテナンスフリー技術なども今後の大規模商業化に必要とされる。

欧州を中心に増える大規模実証案件

欧州風力協会WindEuropeは2021年3月、これまでの実証を通じてセミサブ式、スパーク式などの浮体技術が確立しつつあるとして、今後の商用化に向けて、さらなるコスト削減と量産体制の構築には導入規模の拡大が必要と主張した。欧州ではすでに7カ国が今後10年の間に浮体式洋上風力発電を導入する予定であり、2022年までの累計導入量は300MWを上回る予定で、規模において世界をリードし続ける。世界各国における稼働予定事業を図表3に示す。

図表 3 各国で稼働する予定の浮体式洋上風力案件

稼働予定	国	案件名	開発事業者	発電容量 (MW)	風車出力 (MW)	買取価格 (ユーロ/MWh)	浮体基礎	浮体基礎提供企業
2021/2022	フランス	Eoliennes flottantes du golfe du Lion	Engie, EDPR, Caisse des Depots	30	10	240	セミサブ	Principle Power (PPI)
2021/2022	フランス	EolMed (Gruissan) Pilot Farm	Qair, Total	30	10	240	バージ	BW Ideol
2021/2022	フランス	Provence Grand Large	EDF Energy	25.2	8.4	240	TLP	SBM Offshore
2022/2023	フランス	Eoliennes flottantes de Groix et Belle-Ile	Shell/EOLFI、中国広核集団 (CGN)	28.5	9.5	240	セミサブ	Naval Energies
2021/2022	ノルウェー	Hywind Tampen	Equinor	88	8	オフグリッド	スパーク	Equinor
2022	アイルランド	AFLOWT	EMEC, SEAI, Saipem	6	6	不明	Hexafloat	Saipem
2023	米国・メイン州	Aqua Ventus I	University of Maine	11	11	190	セミサブ	University of Maine
2021/2022 (注)	日本	(仮称) 五島市沖洋上風力発電事業	戸田建設	22	2~5	不明	スパーク	戸田建設
2021	中国・広東省	Jie Yang	三峡集団	5.5	5.5	不明	セミサブ	Mingyang Smart Energy
2026	韓国・蔚山市	Donghae-1	韓国石油公社 (KNOC)、Equinor	200	不明	不明	スパーク?	

注：戸田建設が同事業の建設資金に充当するために発行したグリーンボンドの資金充当状況報告によると、2020年3月末時点では風力発電機を建設していない
出所 Carbon Trust「Floating Wind Joint Industry Project Phase II summary report」、4C Offshoreウェブサイト、各社公開資料から三井物産戦略研究所作成

北欧エネルギー大手のEquinor社は洋上石油開発のノウハウを活用し、スパーク式浮体Hywindを開発した。2017年よりスコットランド沖において発電容量30MWのHywind Scotland実証事業を実施し、2年間の平均設備利用率で54%を超える結果を出した。同社はさらに規模を拡大した88MWの浮体式洋上風力事業Hywind Tampenを北海で建設しており、2022年までに洋上石油施設に電力を供給する予定となっている。Equinor社

は同案件を通じてLCOE⁵を150ユーロ/MWh⁶以下に下げることが目標としており、2025年頃200MW超の本格的な商業化に進む予定としている。

2021年5月、フランスは北西部のブルターニュ沖における発電容量230～270MW規模の浮体式洋上風力事業の入札実施を発表し、フランスの浮体基礎メーカーBW Ideol社は社名非公開のユーティリティ企業と連携して入札に参加すると表明している。同案件の入札価格上限は、2015年に隣接海域で実施した実証事業の240ユーロ/MWhの半分である120ユーロ/MWhと定められる。2024年には、さらに500MW分の入札を予定しており、本格的な商業化に向けて動き出している。

2021年は、欧州以外のアジアでも進展があった。中国は5月、国有再生可能エネルギー大手の三峡集団がセミサブ式浮体を採用した5.5MW実証機を1基試作し、同社が広東省沖で進めている洋上風力ファームにおいて中国初の実証運転を行う予定と発表した。ノウハウを取得するために、フランスEOLFI社⁷の開発中案件に出資した国有原子力発電大手中国広核集団（CGN）も、広東省沖における大規模案件の実施を予定している。ここ数年で着床式洋上風力導入量を世界2位まで積み上げた中国は、今後浮体式においても躍進する可能性がある。世界の洋上風力大国トップ5入りを目指す韓国は、官民連携で2030年までに蔚山市沖において計6GWの浮体式洋上風力発電所の建設計画を5月に発表した。韓国石油公社とEquinor社が2019年から蔚山市沖において開発していた200MW案件も5月にFSを完了しており、2022年に着工、2026年に稼働開始を予定している。2018年に成立した「再エネ海域利用法」に基づき洋上風力の導入を加速する日本では2021年6月、促進区域の長崎県五島市沖における計16.8MWの浮体式洋上風力発電事業者の公募結果が発表され、戸田建設を代表とするコンソーシアムが事業者に選定された。

今後の展望

技術開発の加速と大規模案件の推進により、浮体式洋上風力のLCOEは2025年以降大きく下がると予想される。ETIPWindのレポートでは、2020年において165～202ユーロ/MWhであるLCOEは2030年までに53～76ユーロ/MWh（約7.1円～10.2円⁸/kWh）に下がると予想され、NEDOが実証研究で目指している2030年までに20円/kWh以下という目標を大きく下回る水準となる。さらに2050年までには、浮体式の予想平均LCOEは40ユーロ/MWhに下がり、着床式の37ユーロ/MWhに近づくと予想している（図表4）。

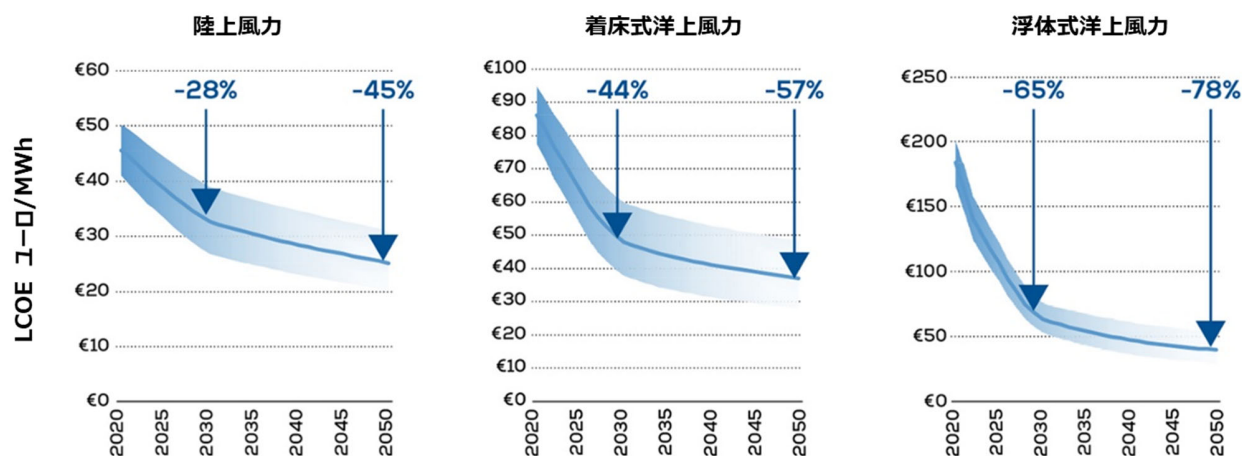
⁵ 均等化発電原価（Levelized Cost of Electricity）：資本費、運転維持費、燃料費など発電に要した費用を、生涯の発電量で割ることで求められる電力単価。

⁶ 1MWh=1,000kWh

⁷ 同社は2019年末にShell社の傘下に入った。

⁸ 為替レート：1ユーロ=134円

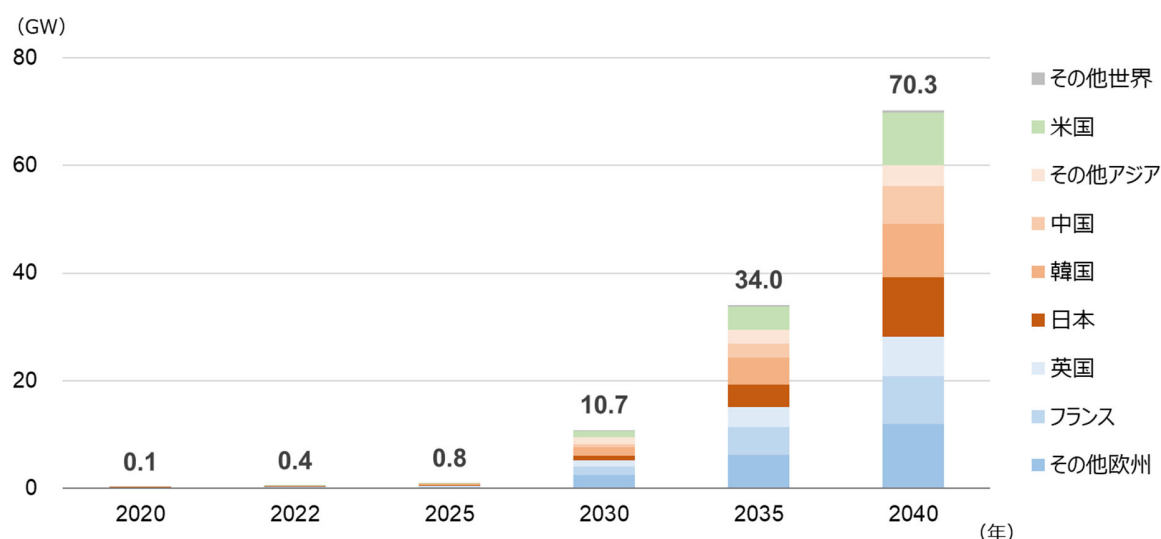
図表4 欧州の風力発電LCOE予想



出所 ETIPWind「Getting fit for 55 and set for 2050」(<https://etipwind.eu/publications/getting-fit-for-55/> 2021年6月アクセス)

コストダウンに伴い、浮体式洋上風力は今後欧州、アジアと米国を中心に導入が拡大する。Carbon Trustの予想では、世界の累計導入量は2030年までに10.7GW、2040年までに70.3GW（予想年間発電量約277TWh⁹）に到達すると見通している（図表5）。2035年以降、浮体式洋上風力の導入ポテンシャルと脱炭素達成の需から、アジアの累計導入量は日本、韓国と中国を中心に大幅増加し、欧州市場を逆転すると予想される。2040年までに浮体式も含む洋上風力30～45GWの導入を目指す日本においては、それらのうち約11GWを浮体式が担うと見込まれている。

図表5 世界の浮体式洋上風力累計導入量予想



注：2022年以降は期待値、2025年以降は推計値。「その他欧州」はポルトガル、スペイン、ノルウェー、ギリシャ、トルコを含む

出所：Carbon Trust「Floating Wind Joint Industry Project Phase II summary report」から三井物産戦略研作成

⁹ 筆者試算。平均設備利用率45%を用いて試算した場合、2040年70GW分の予想年間発電量は365日×24時間×45%×70.3GW≒277TWh。1TWh=10億kWh。

大規模実証案件を先行して進めながら、サプライチェーンの形成を目指す欧州は、部材量産化、洋上施工とメンテナンスのノウハウ獲得も進み、今後の浮体式洋上風力産業を主導する立場となる可能性が高まっており、有望なアジア市場への進出も予想できる。直近の日本、韓国や中国の動きを見ても、欧州勢と協力するケースが多くを占めている。浮体式を含む洋上風力の産業競争力強化およびアジア市場への進出を目指す日本としては、欠かせない要素技術開発、部材の量産化、施工技術の低コスト化と管理経験の習得において、先行する欧州勢と連携する必要があるため、足元の欧州動向は最も注目すべきものといえるだろう。

当レポートに掲載されているあらゆる内容は無断転載・複製を禁じます。当レポートは信頼できると思われる情報ソースから入手した情報・データに基づき作成していますが、当社はその正確性、完全性、信頼性等を保証するものではありません。当レポートは執筆者の見解に基づき作成されたものであり、当社及び三井物産グループの統一した見解を示すものではありません。また、当レポートのご利用により、直接的あるいは間接的な不利益・損害が発生したとしても、当社及び三井物産グループは一切責任を負いません。レポートに掲載された内容は予告なしに変更することがあります。

