

生産拡大への転換点を迎える次世代電池向けシリコン系負極



MITSUI & CO.
GLOBAL STRATEGIC
STUDIES INSTITUTE

—サプライチェーンの連携と需要の確保が勝負の鍵を握る—

三井物産戦略研究所

技術・イノベーション情報部 インダストリーイノベーション室

趙健

Summary

- 次世代電池用負極の有力候補であるシリコン系負極（Si負極）は技術の進歩により、その性能が実用化できるレベルに近づいており、2024年以降米国、韓国、中国などで生産が拡大している。
- 中国が圧倒的なシェアを占める黒鉛負極と違い、Si負極の産業化競争の勝負はこれからだ。電池材料と製造設備産業のスケールメリットを生かせる中国は大規模生産と低コスト化で先行すると見られるが、製造技術と製品性能においては米国などが先行している。
- 充電時の体積膨張等の課題解決にはカーボンナノチューブ、バインダーなど新規材料の開発が必要である。Si負極企業のみならず、サプライチェーン全般の連携が鍵になる。

1. 注目されるシリコン系負極（Si負極）

エネルギー密度¹や充電速度などの性能で現行のリチウムイオン二次電池²（LIB）を上回る次世代LIBの開発において、シリコン材料を用いたSi負極が有望な負極として注目されている。

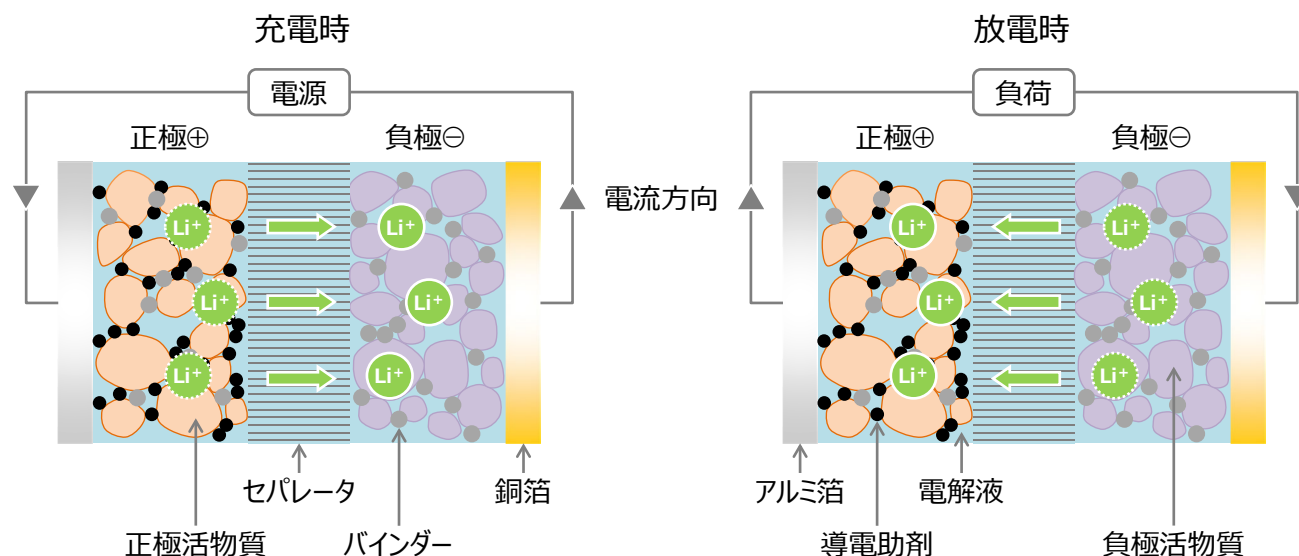
リチウムイオンが正極と負極の間を移動することで充放電を行うLIBにおいて、リチウムイオンを充電時に貯蔵し、放電時に放出する役割を担う負極は、LIBの性能を大きく左右する材料である（図表1）。現行主流の黒鉛負極のリチウムイオン貯蔵能力はその理論容量の限界に近付いており、電池性能向上のボトルネックの一つとなっている。一方、シリコンの理論容量は黒鉛を大きく上回り、資源も豊富であるため、有望な次世代負極材料として研究開発されてきた。しかし、充電時の体積膨張が大きく、劣化が早いという課題があったため、黒鉛に微量のシリコン材料を混ぜるといった使われ方にとどまっていた。

2020年代以降、新しい材料や製法の開発により、体積膨張の抑制技術が進展したため、Si負極のスマートフォンへの応用が増えているほか、性能もEVなどに実装できるレベルに近付いている。特に米国、韓国、中国のSi負極企業を中心にその開発と実装が加速しており、2025年を境目に、試作品の小規模生産から量産体制へ転換すると見られる。

¹ 単位質量、または単位容積当たりに取り出せるエネルギーの量。Wh/kg、Wh/Lなどの単位で示される。

² 充電して繰り返し使える電池（出典：国立研究開発法人産業技術総合研究所）

図表1 リチウムイオン電池の構造と充放電の仕組み



出所 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) 「focus NEDO 2018 No.69」から三井物産戦略研究所作成

2. LIB負極の課題とSi負極の開発動向

2-1. LIB負極の課題とシリコン材料の負極応用

黒鉛負極材には主に人造黒鉛と天然黒鉛の2種類があり、合わせてLIB負極市場の9割以上を占める。ただし、いずれも電池の電気貯蔵性能を左右する容量指標が理論容量に近付いており、さらなる性能向上の余地が小さい。また、その世界生産の6割以上を占める中国が輸出規制を強化しているため、原料調達リスクが顕在化した。現行LIBより性能が高く、調達安定性の高い次世代電池の開発を行うには、新規の負極が必要である。

理論容量が黒鉛の10倍以上であるシリコンとリチウム金属は有力候補として挙げられている。リチウム金属はサイクル寿命が短いという致命的な課題がある。その原因は充放電に伴うリチウムイオンの樹枝状結晶の発生だが、その抑制技術が未確立なため、実用化にはまだ時間がかかる。シリコンは体積膨張率が高いため、それを100%使用する負極の実用化はまだ難しいが、粒子のナノサイズ化など、体積膨張を抑制する加工を施したシリコン材料を従来の黒鉛材料に添加したSi負極の実装はすでに始まっている。

2-2. Si負極の種類と開発動向

現行のSi負極材は酸化シリコン系のSiO_x (0 < x ≤ 2) と、カーボンとシリコンの複合材料 (Si/C) が主流になっている。黒鉛との配合率は5~10%程度とまだ低く、容量など性能改善効果は限定的である (図表2)。今後、性能の安定性を保ちながらシリコン材料の割合を高めることが技術競争の鍵となる。

SiO_xの体積膨張は2倍程度に抑えられ、Si/Cと比べるとサイクル寿命が長いため、一部のハイエンドスマートフォンなどに先行して実装されている。ただし、導電性が低いほか、初回充電時に不可逆の反応でリ

チウムシリケート化合物が形成され、電池の充放電に働くリチウムイオンが減るため、初回の充電容量に対する放電容量の比を示す初期クーロン効率が著しく低下するという欠点がある。初回充電時のリチウムイオン消費分をあらかじめ負極に添加するプレドープという手法があるが、黒鉛負極の約10倍以上といわれる高コストが普及の障害になっている。

他方、これまでSi/Cは主にボールミル法で製造されていたが、シリコン粒子の凝集と不純物の混入が起こりやすく、サイクル寿命が短いなどの課題がある。（米）Group14 Technologies（Group14）が開発した、多孔炭にシリコンのナノ粒子を堆積するCVD（化学気相堆積）法で作製したSi/Cは、多孔炭の空洞構造によるシリコン膨張の吸収効果があるほか、サイクル寿命も改善された。

図表2 各種負極材の性能比較

指標	単位	黒鉛		シリコン		リチウム
材料の理論容量	mAh/g	372		4,200		3,862
	mAh/cm ³	837		9,786		2,047
膨張率	%	12		320		100
主流負極材料		天然黒鉛	人造黒鉛	SiOx	Si/C	金属リチウム
商用化段階		大量生産	大量生産	導入初期	導入初期	開発中
市場シェア(注1)		14.0%	83.0%	1.9%		n/a
容量	mAh/g	340~370	310~360	1,400~1,700	1,300~2,200	3,862
電気伝導率(注2)	S/m	10 ⁴ ~10 ⁶	10 ³ ~10 ⁵	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻¹	10 ⁻¹ ~10 ³	10 ⁷
サイクル寿命	回	1,000~	1,500~	1,000~	500~	300~
初期クーロン効率	%	90~93	90~96	65~75	85~90	90~95
クレート(注3)		○	○	○	△	○
安全性		△~○	○	△	△	×
コスト		○	○	△	△	×

注1 2024年実績

注2 物質中における電気伝導のしやすさを表す物性量である。単位はジーメンズ毎メートル（S/m）

注3 クレートは、電池の充放電速度を示す指標である。定電流充放電測定の場合、電池の理論容量を1時間で完全充電（または放電）させる電流の大きさを1Cと定義している。クレートが高いほどより短時間で充放電できる

出所 Sigmaaldrich公開情報（<https://www.sigmaaldrich.com/JP/ja/technical-documents/technical-article/materials-science-and-engineering/batteries-supercapacitors-and-fuel-cells/recent-developments-in-silicon-anode-materials?> 最終アクセス 2025年7月18日 1100時）、SNE Research公開情報

（https://www.sneresearch.com/en/insight/release_view/430/page/0?s_cat=%7C&s_keyword=、最終アクセス 2025年7月17日 1000時）、各種公開情報から三井物産戦略研究所作成

3. 世界におけるSi負極の生産拡大

世界主要Si負極企業の現状の生産能力と拡大計画を図表3に示した。

図表3 主要企業のSi負極の生産能力

企業	材料	容量 (mAh/g)	生産能力 (千トン/年)				備考
			所在地	稼動中	建設中	計画中	
(中) Shanshan Technology	Si/C	1,800~2,200	中国	10.0	30.0		2025年から生産開始、主に消費者電子向けの小規模出荷
(中) Yuling New Energy	SiO _x	1,650~1,700	中国	10.0	20.0		2023年12月稼働開始 開発中
	Si/C	1,900~2,200					
(中) BTR	SiO _x	1,500	中国	5.0			2,000mAh/g以上Si/Cを開発中。 2025年から出荷開始の予定
	不明		中国		15.0	25.0	
(韓) Daejoo Electronic Materials	SiO _x	1,300~1,700	韓国	3.0		100.0	2021年から生産開始、2030年までに10万トン/年計画
(米) Group14 Technologies	Si/C	1,900	韓国	2.0			2024年9月から出荷開始 (注1)
			米国	0.12			パイロットラインは2019年から稼働開始
			米国		4.0		2025年内稼働開始の予定
(中) GUIBAO	SiO _x	n/a	中国	1.0	3.0	7.0	建設中工場は2025年内稼働開始予定
(中) Shandong Shenghua New Material Technology	SiO _x	n/a	中国	0.5			電解質溶媒大手、長期的に3万トン/年の生産能力を計画
	Si/C	1,650~1,800	中国	0.5			
(中) Physgs	SiO _x	1,700	中国	0.5		3.0	計画中工場は環境アセスメント中
	Si/C	1,630~2,175	中国	0.1	1.0		2025年内稼働開始の予定
(米) Amprius Technologies	Si (注2)	3,400	中国	0.4		19.6	2022年から稼働開始
(中) PTL New Energy Technology	Si/C	1,800	中国	0.4		10	2025年7月からテスト生産開始
	SiO _x	n/a	中国			2.1	時期未定
(米) Sila Nanotechnologies	Si/C	1,500	米国	0.3		2.0	2025年4月からテスト生産開始
信越化学工業	SiO _x	n/a	日本	n/a			高容量、高出力製品を開発
(仏) NOVACIUM SAS	SiO _x	n/a	フランス	n/a			2025年3QまでSi負極使用電池出荷開始の予定
(中) Liyang Tianmu pilot battery material Technology	Si/C	n/a	中国		8.0		2025年Q1生産開始の予定。2千トン/年の多孔炭材料生産も計画中
	SiO _x	1,200~1,500	中国			1.8	
	Si/C	1,300~2,000	中国			0.6	
(米) NanoGraf	SiO _x	1,000~2,500	米国		2.5		2024年9月工場建設を発表
(中) Novusilicon	Si/C	1,850~1,950	中国		2.0	18.0	2025年3Qテスト生産開始の予定
(中) Solid New Material Technology	SiO _x		中国			0.1	2024年から小規模生産、湖南省にて1千トン/年の多孔炭事業が稼働中
(英) NEXEON	Si (注3)		韓国		1.5		2025年から納品開始の予定
(中) Carbon ONE New Energy Group	Si/C	1,800~2,075	中国			2.0	2025年7月から環境アセスメント開始

※太字表記の企業について、本文中にはより詳細な説明が含まれる

注1 設立時はGroup14 (25%出資) と (韓) SK inc. Materials (75%出資) との合併事業だった。2025年8月、Group14は (韓) SK inc. Materialsの持ち分を全て取得し、100%出資の自社工場にしたと発表

注2 シリコンナノワイヤと呼ばれる微細な柱状構造の100%シリコン使用負極

注3 多孔質シリコン (10%まで) と黒鉛のハイブリッド型

出所 各種公開資料から三井物産戦略研究所作成

スタートアップを中心とする米国企業は世界トップレベルの技術力を有する。Group14は、エネルギー密

度がLIBを50%上回るSi/C負極を開発し、100社以上のEVや消費者向け電子製品メーカーに出荷している。

(米) NanoGrafが開発したSiO_x負極は、エネルギー密度がLIBより30%高いほか、kWh当たりのコストを人造黒鉛と同等に抑えることができたため、黒鉛負極の代替が期待される。日本と韓国企業は特にSiO_x負極を得意とする。例えば信越化学工業は独自の方法でSiOに導電性を付与し、初回放電容量減少の改善など、従来品より高い性能を実現している。

中国では、電池負極産業と高性能次世代電池開発における主導権維持のため、Si負極を重要な要素技術と位置付ける。黒鉛負極大手を中心に開発と生産拡大を加速しており、計画中の案件も含めた生産能力は世界最大だ。ただし、現行製品は性能面において日米企業と比べて特段の優位性がない。また、新工場の多くは先行したGroup14に追随し、将来のEV用電池における応用の拡大が期待されるSi/Cの生産を行う予定である。

4. 実装拡大に必要なサプライチェーン連携

Si負極の実装拡大には、技術課題の解決、継続的な性能向上と製造コストのさらなる削減が必要である。その達成には、Si負極企業のみならず、電極添加剤、Si原料、製造設備と電池メーカーなどを含めたサプライチェーン全体の連携が必要である。

4-1. Si負極向け材料の開発に向けた負極企業と材料企業の連携と事業機会

体積膨張などSi負極の主要課題の解決策として、導電助剤として使用されるカーボンナノチューブ³ (CNT) や高性能バインダー⁴など新規の電極添加剤の開発と実装が期待される。優れた導電性と機械強度を備えるCNTは、シリコン材料の低い導電性という弱点を補うほか、シリコン表面に被覆することで、体積の膨張と内部構造の劣化を防ぐことも可能である。特に量産技術が確立途上の単層CNTは多層CNTより10倍以上の導電性を有するため、Si負極の実用化に寄与することが期待されている。バインダーも、従来の黒鉛向け製品ではSi負極の電極膨張を抑制することが難しいため、Si負極に適した新規材料の開発が求められる。

世界中のSi負極企業は早期の実装に向けて、CNTなどの電池材料企業との連携に力を入れている(図表4)。2025年4月、(中) Shanshanは世界最大の単層CNT企業、ルクセンブルクのOCSiAl社と戦略的提携を結び、同社製単層CNTを添加したSi負極の開発と発売を計画している。2025年5月、Group14はドイツ化学大手BASFと共同で、BASF製高性能バインダーを採用したSi負極を発表した。従来の黒鉛負極の約4倍の容量を備えながら、より優れた急速充電性能、高いエネルギー密度と長いサイクル寿命を実現した。世界初の単層CNT量産を実現した日本ゼオンや、Si負極電池の高いエネルギー密度と長寿命を両立するバインダーを開発

³ CNT (Carbon Nanotube)、炭素原子 (C) だけでできたチューブ状のナノ素材である。チューブの層が1層でできている単層カーボンナノチューブ (単層CNT) と、複数層重なっている多層カーボンナノチューブ (多層CNT) がある (出典: 国立研究開発法人産業技術総合研究所)。

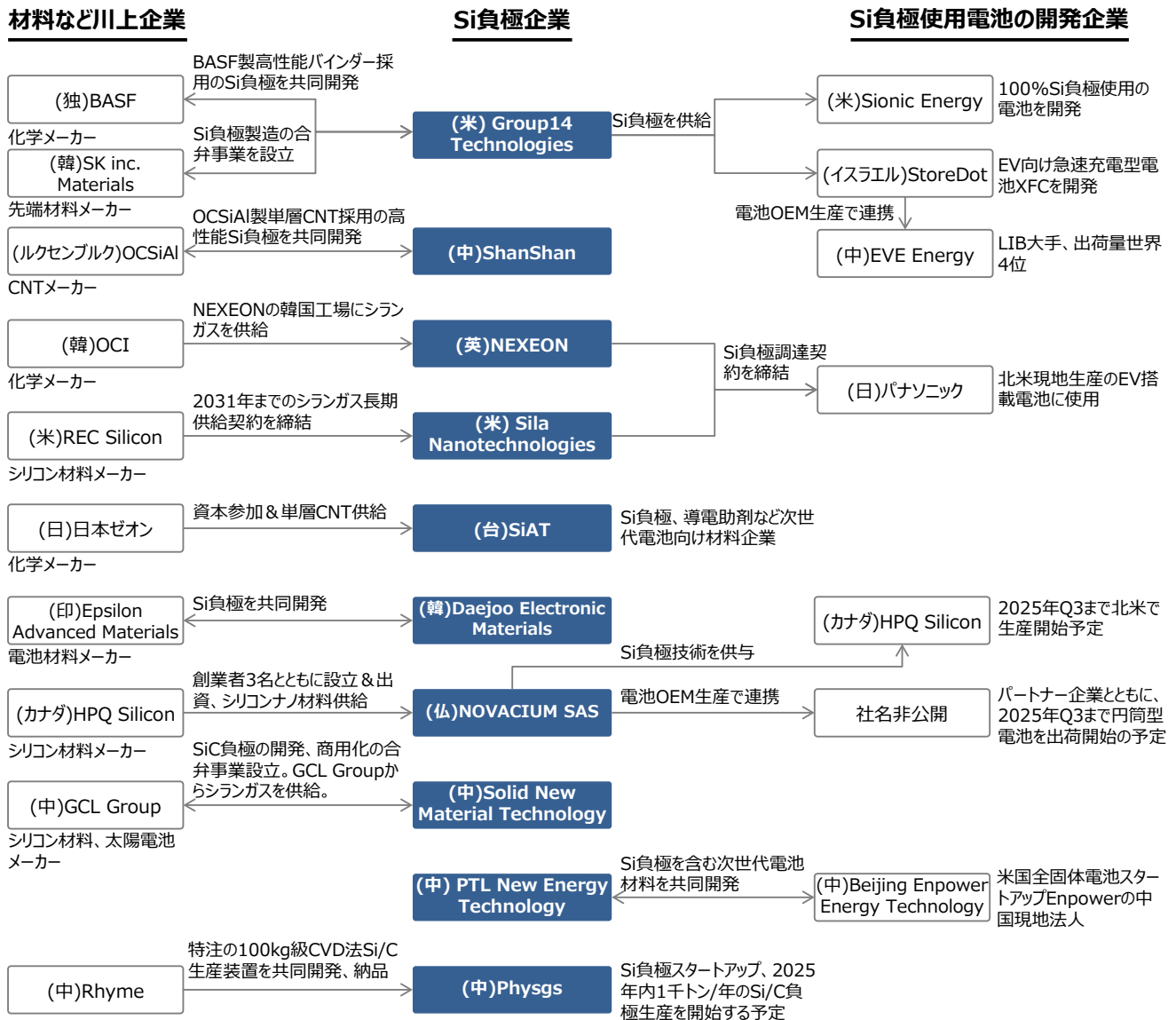
⁴ 活物質や導電助剤を結びつける役割をする接着剤。

したGSユアサなど、高性能電池材料技術に国際的な優位性のある企業の多い日本では、Si負極向けの新規ビジネスが期待できる。

4-2. 製造コストの削減に向けた異業種連携や大企業スタートアップ連携

黒鉛負極より高額な材料と製造コストの削減についても、材料の安定調達、生産設備の大型化や既存の電池製造能力を生かす目的での企業間連携が活発だ。（英）NEXEONが韓国に建設中の新工場は、隣接する提携先の韓国化学企業OCIの工場から、主要原料であるシランガス（ SiH_4 ）の供給を受ける。2025年6月、中国の半導体材料製造設備メーカーの（中）Rhyme社は、Si負極スタートアップの（中）Physgs社と協力して処理能力100kgのCVD装置を開発した。主にSi/Cの生産に使用されるCVD装置は現状では処理能力が数十kgのものが多く、その大型化による製造コストの低減が期待される。Si負極を使用した電池の早期量産に向けて、イスラエルのStoreDot社などのスタートアップが、中国や韓国の電池企業の既存生産能力を生かす動きも出てきている。

図表4 Si負極の生産拡大に向けた企業間連携の動き



出所 各種公開情報から三井物産戦略研究所作成

5. 展望

今後、Si負極は一部の高性能液系LIB、中国を中心に小規模導入が始まった半固体電池⁵や、2030年前後に実用化予定の全固体電池⁶へ、順次実装されていくと想定される。これら電池の応用分野は初期段階のスマートフォン、電動工具から、徐々にドローン、eVTOL⁷、EV、定置型蓄電など大規模用途に広がり、コストも生産規模の拡大に伴って下がって行く（図表5）。韓国の市場調査会社SNE Researchは、世界負極市場に占

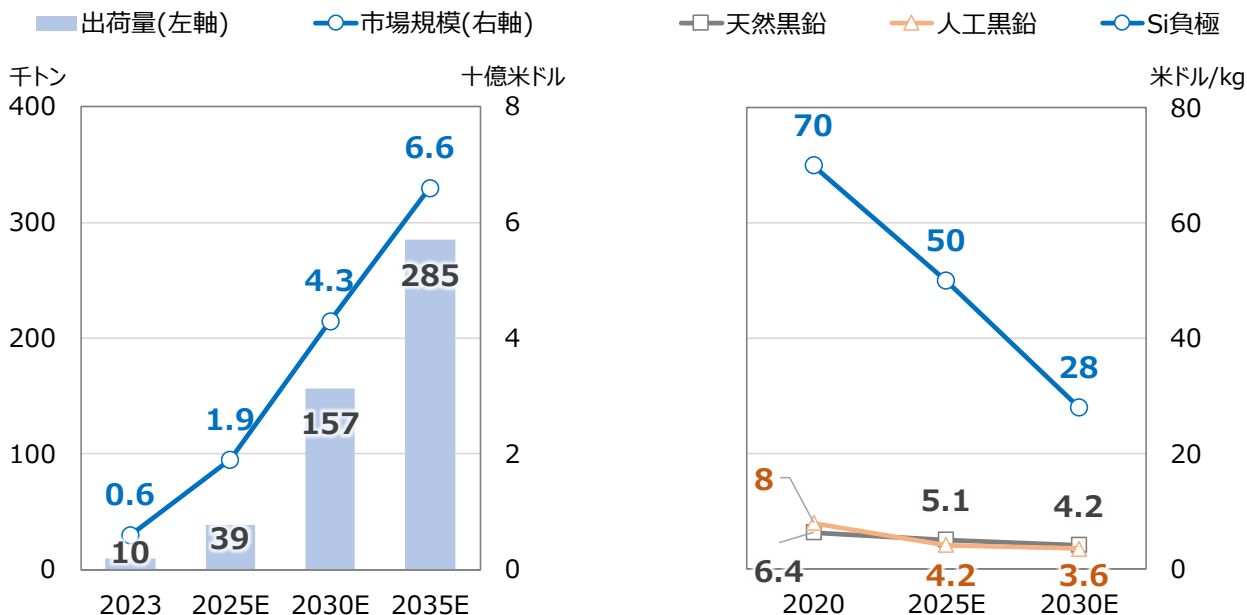
⁵ 半固体電池の定義は明確には存在しない。一般的に液体電解質と固体電解質の両方を使用する固液混合型と、電解質や電極材料をゲル化またはクレイ状にするゲルポリマー型・クレイ型に分けられる。

⁶ 液体電解質を固体電解質に置き換え、全ての材料が固体で構成した電池（出所：国立研究開発法人産業技術総合研究所）

⁷ Electric Vertical Take-off and Landing aircraft、電動垂直離着陸機。

めるSi負極のシェアは2025年の3%から、2030年に7%、2035年に10%に拡大し、今後の負極市場は黒鉛主導から、黒鉛負極とSi負極との共存へ徐々に移行していくと予想している。

図表5 Si負極の市場規模（左図）と価格予想（右図）



出所 SNE Research発表資料

(https://www.sneresearch.com/en/insight/release_view/232/page/0?s_cat=%7C&s_keyword= 最終アクセス 2025年7月18日 1200時) から三井物産戦略研究所作成

Si負極開発競争の勝者を予想するのはまだ早い。中国企業は大規模生産とコスト削減で先行するが、安定性、安全性を兼ね備えた高性能化が最優先課題になるだろう。小規模生産を開始した欧米企業には、需要の確保が継続的な成長に必要である。日本企業にとっては、いかに技術面の優位性を産業の競争優位性につなげるかが重要であり、国内に限らず世界の有望企業への投資や横の連携などサプライチェーンの補完と需要の確保に向けた戦略が求められる。Si負極の実用化を主導するのは、前述のサプライチェーン連携と、ドローン、EVなど高性能電池を求める最終製品の需要創出・拡大を実行できる国だろう。

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、当社およ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、当社およ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。