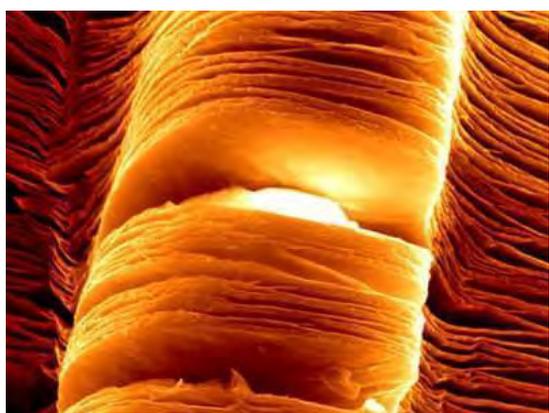
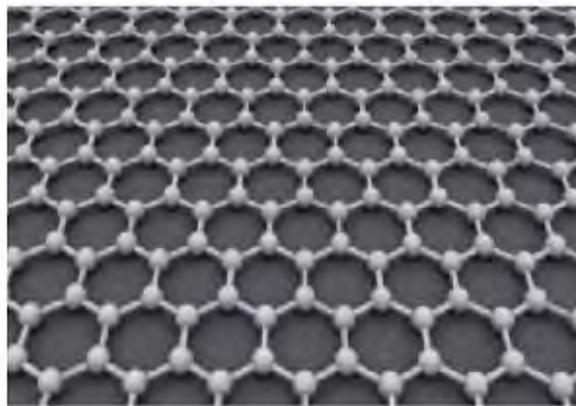


せるという機能を利用したものであり、2面の炭素原子の結晶シート構造のグラフェン(Graphene)(図16-2)や酸化グラフェンといった素材も同様の性質から電極に利用がされている⁴⁹³。こうした電極の素材研究は世界各国で進められているものの、往々にして中国がリチウムイオンバッテリーのサプライチェーンを独占している⁴⁹⁴。こうした背景から欧米では、より安価でどこにでもあるナトリウムや硫黄を用いて電極に用いようという動きも見られる。こうした研究に関しては、英国のインペリアルカレッジロンドンが先駆的である。



(図 16-1 MXenes のイメージ⁴⁹⁵)



(図 16-2 グラフェンの構造)

自然エネルギーから電力を獲得する環境発電(Energy Harvesting)についてもマルチユースの観点から言及しておく必要があるだろう。ここでは、中でも特に近年注目されている「圧電ナノ発電機」(Piezoelectric Nanogenerators: PENG)と「摩擦帯電ナノ発電機」Triboelectric Nanogeneratorsである。圧電ナノ発電機(PENG)は、主に高周波数(60-100 Hz)でより効果的に機能する一方で、摩擦帯電ナノ発電機(TENG)は、4Hz以下の低い周波数でよりよく機能する。摩擦帯電ナノ発電機(TENG)は、主に海上の運動エネルギーを利用したいわゆる”blue Energy”等に適している。例えば米国航空宇宙局(NASA)は摩擦帯電ナノ発電機による風力発電を火星探索に用いているほか、ドローンの通信とセンサーのための発電等にも用いられている。圧電ナノ発電機(PENG)は近い将来全ての通ワイヤレス信電子

⁴⁹³ Ali, Asad, Fengxing Liang, Jinliang Zhu, and Pei Kang Shen, "The role of graphene in rechargeable lithium batteries: Synthesis, functionalisation, and perspectives," *Nano Materials Science*, August 26, 2022. As of February 1, 2023:

⁴⁹⁴ International Energy Agency, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, CC BY 4.0, May, 20

⁴⁹⁵ <https://www.nanowerk.com/mxene.php>

機器の電力供給に用いられることが検討されているが、摩擦帯電ナノ発電機(TENG)同様に商業化にもまだまだ長い道のりを有する⁴⁹⁶。

圧電ナノ発電機(PENG)は、当初酸化亜鉛のナノワイヤーをその主な素材として研究がなされてきたが、最近ではより多様な素材を用いた検証が行われるようになってきている⁴⁹⁷。摩擦帯電ナノ発電機(TENG)は、二つ以上の素材を利用することから、PENGの素材よりもよりバリエーションが多い。しかし、摩擦帯電ナノ発電機で陽極と陰極との間の電子親和力(Electron Affinity)の差異が重要な機能を発揮するため、それぞれで異なる性質を持つ素材が用いられる。主に陰極には複合ポリマーが用いられるが、陽極の方はより鉄やバイオメタル、アルミニウム・銅・ナイロンといった多様な素材が用いられる。

2. 米国バッテリー技術と政策

ここまで近年開発が進められてきた蓄電池技術の中でも特に経済安全保障上重要な技術について概観してきた。ここからは蓄電池開発を取り巻く各国の政策に着目し、その動向を分析するとともに今後の展望を示したい。特に米国及び中国の研究開発動向を比較した上で、我が国の現状にも言及し、今後日本の蓄電池開発についてその位置づけを明確にする。

(1) バイデン政権下におけるエネルギー・レジリエンス

バイデン政権は伝統的な「需要牽引型」(demand-pull)と「供給プッシュ型」(supply-push)のアプローチを採用し、先端バッテリー技術の開発を進めてきた。需要側のプルファクターとしては電気自動車(EV)のさらなる普及と発電所規模のエネルギーストレージ実装を掲げ、一方の供給側ではバッテリー技術のR&D分野への公共投資の増大を目指す。バイデン政権が目指すのは、バッテリー製造に必

⁴⁹⁶ Meyyappan, Meyya & Kang, Jin Ho, “Triboelectric nano generator (TENG) for mars exploration and high altitude power generation on Earth.” NASA.

<https://flightopportunities.ndc.nasa.gov/media/technology/225/222-summary-chart.pdf>

⁴⁹⁷ Mahapatra, Brahmadutta, Krishna K. Patel, Vidya, and Piyush K. Patel, “A review on recent advancement in materials for piezoelectric/triboelectric nanogenerators,” *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, No. 11, August, 2021, pp. 5523-5529.

要な重要素材の中国依存からの脱却と国内の電力供給レジリエンスの強化であり、それを可能にする革新的バッテリー技術への投資を加速させている⁴⁹⁸。

エネルギー省(Department of Energy: DoE)は、エネルギー分野のイノベーションハブの一つである Critical materials Institute への公共投資を通じて、EVに用いられるリチウムイオンはバッテリーの海外産コバルトとニッケルへの依存脱却を試みている。海外産の希少金属素材の依存を低減し、米国内で十分な埋蔵量が期待されているリチウムを用いたバッテリーをより効率的かつ低コストに運用すべく、次世代リチウムイオン電池やリチウムメタル電池の研究開発支援が進められてきた⁴⁹⁹。特にエネルギー省は Advanced Technology Vehicle Management Loan Program(ATVM)⁵⁰⁰の枠組みで、2017年に北米日産に14.5億ドルを貸付けることで米国に先端バッテリー製造工場誘致をすることに成功している。米国政府は国内のエネジグリのレジリエンスを強固なものにすべく、官民そして学との連携強化に努めてきた。

(2) リチウムイオン蓄電池

米国国内の電力供給を確保すべく、より強力で効率的な次世代バッテリー技術の開発が進められてきた。リチウムイオン蓄電池(Li-ion batteries)は電力送電網機能の幅広い分野で適合性を有したバッテリーであり、特に次世代リチウムイオン蓄電池はグリッドシステムへの応用が期待されている。コスト面でも現状は他の発電オプションよりもコストが高くつくものの、再生可能エネルギーへの移行に伴いそのコストも低減していくことが見込まれている。McKinsey & Company の調査によると、2030年にはリチウムイオン蓄電池の再生可能エネルギー移行に伴うコストは2017年の半分以下になり、他の再生可能エネルギーの発電オプションよりも低コストで発電が可能になることが予想されている(図16-3)。

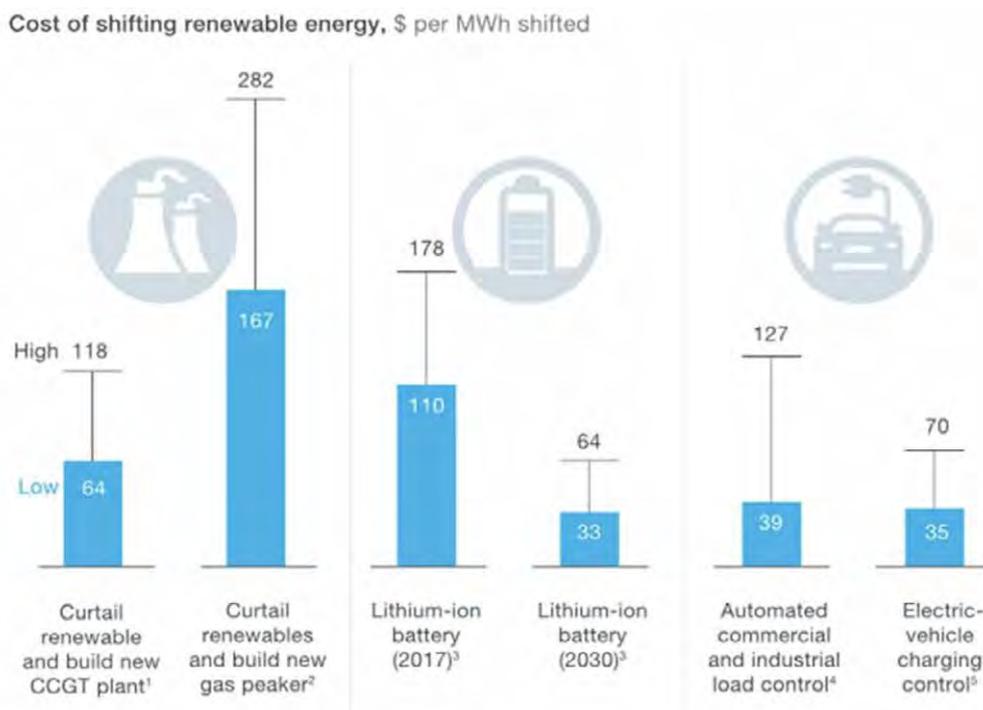
米国エネルギー省は、リチウムイオンに加えてソジウム、フロー電池、鉛蓄電池(Lead-acid batteries)及び亜鉛ベースの電池等が電力グリッドの有力な候補として検討している。それぞれのバッテリーの放電時間と電力は図16-4の通り。リチウムイオン(青ドット)は短い放電時間(0.25-1時間)

⁴⁹⁸ Tsafos, Nikos, & Carey Lachlan, "The United States' industrial strategy for the battery supply chain." CSIS Commentary (Centre for Strategic and International Studies: December 14, 2021). Retrieved from <https://www.csis.org/analysis/united-states-industrial-strategy-battery-supply-chain>

⁴⁹⁹ White House, Building resilient supply chains, revitalizing American manufacturing, and fostering broad-based growth. (Washington DC: the White House, June 2021). Retrieved from <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/06/100-day-supply-chain-review-report.pdf>

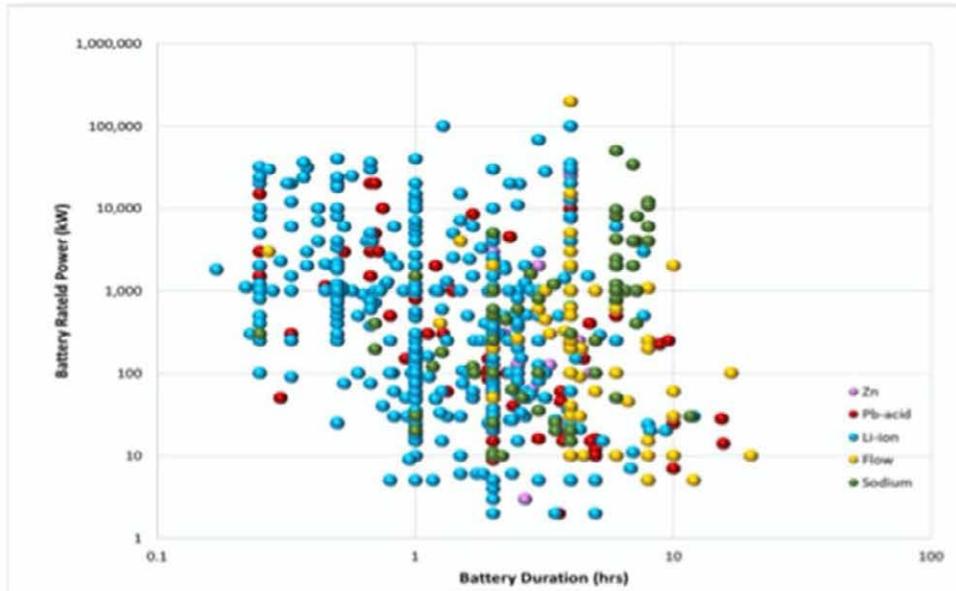
⁵⁰⁰ <https://www.energy.gov/lpo/products-services/advanced-technology-vehicles-manufacturing-loan-program>

の場合に比較的広い範囲の電力を保持することができる、近年ではリチウム硫黄電池やソジウム硫黄電池、フロー電池等が開発され、より多くの電力を長時間に渡って放電できるようになった。既存のバッテリー技術である程度の放電時間と電力を確保できるものの、さらなる技術革新の目標としてより長い放電時間かつ膨大な電力を貯蓄できるバッテリー技術今後の先端科学技術研究の領域として認識されている(図 16-5 黄色部分)。近年の米国の先端バッテリー技術開発は、そうした発電所規模のグリッドに対応できる技術を中心に展開されている。

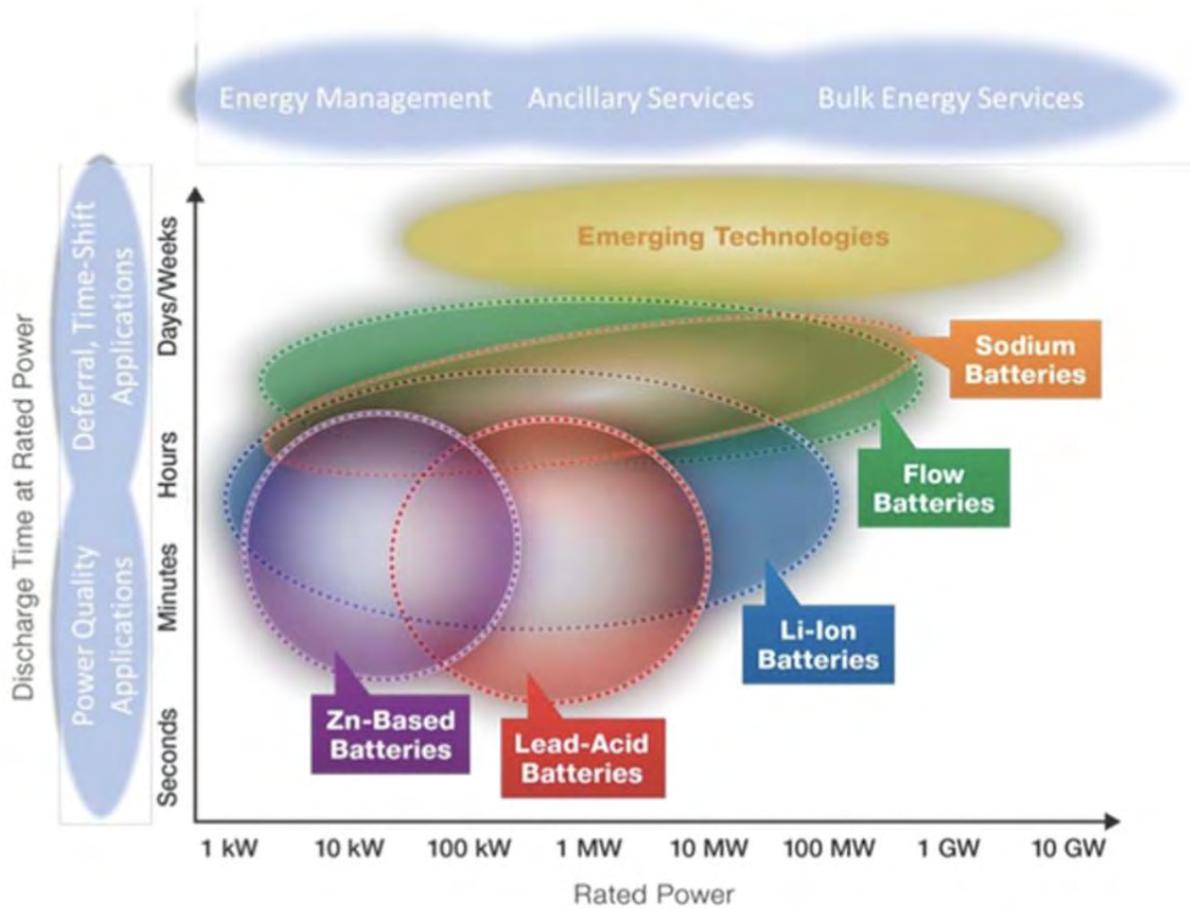


(図 16-3 再生可能エネルギー移行のコスト⁵⁰¹)

⁵⁰¹ McKinsey & Company, “Less carbon means more flexibility: Recognizing the rise of new resources in the electricity mix” (October 1, 2018). Retrieved from <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/less-carbon-means-more-flexibility-recognizing-the-rise-of-new-resources-in-the-electricity-mix>



(図 16-4 素材別放電時間と電力の比較⁵⁰²)



⁵⁰² Department of Energy, *Potential benefits of high-power, high-capacity batteries*. (Washington DC: DoE, January 2020), p. 27.

(図 16-5 放電時間と充電電力毎のバッテリー技術の比較⁵⁰³)

(3) 次世代バッテリー技術開発に向けた体制構築

次世代のバッテリー技術の開発に向けて、米国政府はエネルギー省を中心に官民そして学との連携を強化し、バッテリーの技術の革新及びグリッドのレジリエンス強化に向けた体制を近年急速に構築している。以下は、その中でも特に主要なパートナーシップの枠組みである。

Li-Bridge

米国政府は、またエネルギー分野の官民パートナーシップ構築にも積極的である。エネルギー省はEV 開発や国内のエネルギー・ストレージの拡充に向けて、リチウムバッテリーの国内バリューチェーンの拡大を図っており、近年 Li-Bridge⁵⁰⁴という官民連携のパートナーシップの枠組みを構築した。Li-Bridge は米国内のリチウムイオン蓄電池のサプライチェーン のレジリエンスをより強固なものにする ために、官民そして大学の鍵となるステークホルダをまとめあげ、新たな官民連携の枠組みを提供するものである⁵⁰⁵。

Federal Consortium for Advanced Batteries (FCAB)

エネルギー省は、関連省庁である国防省 (Department of Defense) や商務省 (Department of Commerce) と連携しながら、エネルギー政策立案の要を担ってきた。特にリチウムバッテリー分野において、この 3 つの連邦政府機関は Federal Consortium for Advanced Batteries (FCAB) を組織し、国内のリチウムバッテリーの供給のための強固な体制を構築している⁵⁰⁶。同組織はバッテリー技術の応用や社会実装における技術の標準化にも大きな役割を果たしており、Pre-application Battery Test Manual を発行し、バッテリー技術のアプリケーションのプロトコルの策定を行っている⁵⁰⁷。FCAB

⁵⁰³ 同上, p. 31.

⁵⁰⁴ <https://www.anl.gov/li-bridge>

⁵⁰⁵ Burmahl, Beth, “Bridging the lithium battery supply chain gap – a new alliance in the U.S.” (Argonne National Laboratory: October 27, 2021). Retrieved from <https://www.anl.gov/article/bridging-the-lithium-battery-supply-chain-gap-a-new-alliance-in-the-us>

⁵⁰⁶ Department of Energy, Federal Consortium for Advanced Batteries (FCAB). Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/vehicles/federal-consortium-advanced-batteries-fcab>

⁵⁰⁷ Federal Consortium for Advanced Batteries, Pre-application Battery Test Manual (August 2021). Retrieved from <https://cet.inl.gov/ArticleDocuments/FCABManualRev1Final.pdf>

が掲げるバッテリー開発のロードマップには、2030 年までに同盟国とともにより安全なバッテリー素材と技術のサプライチェーンを構築することが明記されている⁵⁰⁸。

Battery500 Consortium

こうした中で、エネルギー・グリッドのより強固なレジリエンス構築に向けたバッテリー技術の開発がエネルギー分野における米国の科学技術開発の要となってきた。リチウムイオン蓄電池は多様な要件を満たす現状で最良のバッテリー技術であるが、米国の科学者たちはこのリチウムイオン電池のさらなる発展に研究リソースを投じており、次世代リチウムイオン電池の開発が進んで来る。2017 年に設立された「Battery500 Consortium」はそうした次世代リチウムイオン電池の開発に向けた官学のコンソーシアムである。国立研究所とスタンフォード大学をはじめとする大学の研究機関を統合する枠組みであり、先端リチウムイオン電池技術の倍以上の 500Wh/kg のエネルギー密度を達成すべく、Battery “500” と名付けられた⁵⁰⁹。同コンソーシアムには、2019 年に日本の吉野彰教授とともにリチウムイオン二次電池の開発でノーベル科学賞を受賞したスタンリー・ウィットティング教授とジョン・グッドイナフ教授が参画しており、電極素材や電解液の開発をはじめ革新的な電極構造の研究が進められている。以上のように、経済安全保障上のサプライチェーン リスクを低減する目的でバイデン政権は、エネルギー省を旗振り役として民間主導の次世代バッテリー技術の開発に積極的に関与してきた。

⁵⁰⁸ 尚、米国の最新のバッテリー技術のロードマップについては、エネルギー省発行の National Blueprint for Lithium batteries 2021-2030 を参照。 https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/FCAB%20National%20Blueprint%20Lithium%20Batteries%200621_0.pdf

⁵⁰⁹ Pacific Northwest National Laboratory, “Battery500 Consortium.” Retrieved from <https://www.pnnl.gov/projects/battery500-consortium>

National Labs



Universities



(図 16-6 Battery500 Consortium の参画組織⁵¹⁰)

3. 中国のバッテリー技術と政策

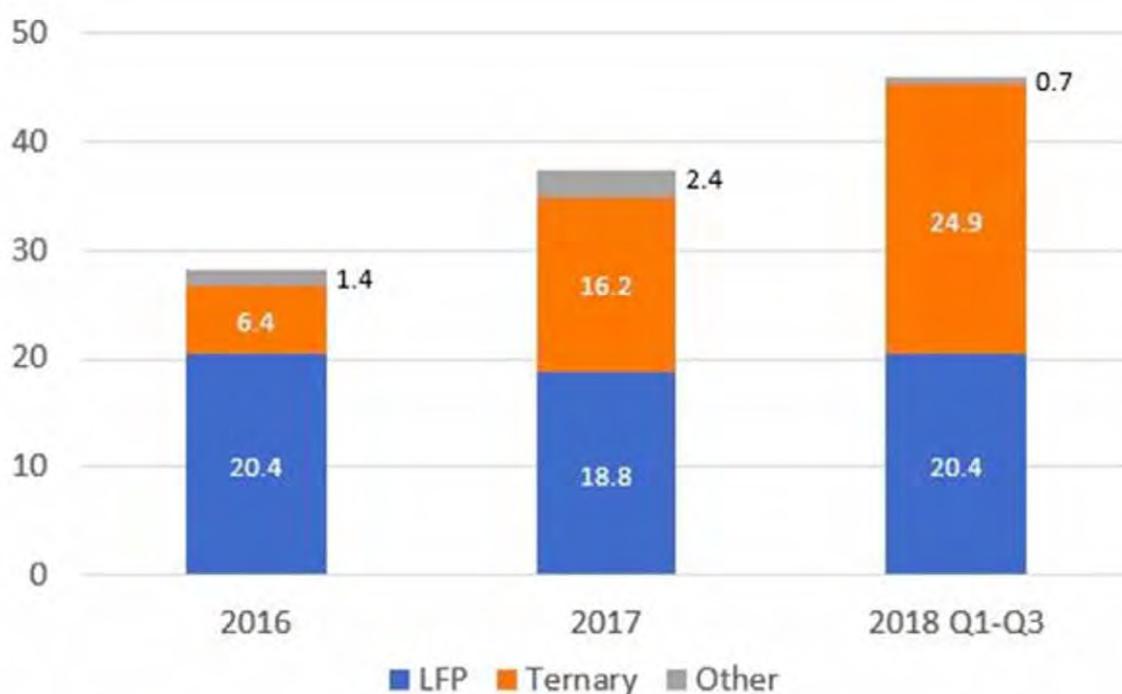
(1) 中国のエネルギー技術政策

中国のエネルギー技術はここ数年で目覚ましい進歩を遂げてきた。2021 年から 2025 年を対象とした「中華人民共和国国民経済及び社会発展 第 14 次五カ年計画及び 2035 年遠景目標綱要⁵¹¹」(以下、第 14 次五カ年計画)では、電気自動車(EV)といった次世代エネルギー自動車のバッテリーの安全性と

⁵¹⁰ Department of Energy, “Battery500: Progress Update” (May 19 2020). Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/articles/battery500-progress-update>

⁵¹¹ 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要。英訳は Centre for Security and Emerging Technology (CSET), Outline of the People's Republic of China 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and Long-Range Objectives for 2035 (May 12 2021) を参照。

効率性のさらなる強化に加えて、再生可能エネルギーの活用や革新的なエネルギー・ストレージ技術の展開等が掲げられて、クリーンエネルギー移行に伴うバッテリー技術の重要性が中国でも益々増していることがわかる。特に風力や太陽光発電、そしてEVの製造においては、欧米を凌ぐ勢いでその技術改良と進歩が進んでいる。例えば、2018年の段階で、風力タービンの製造の1/3は中国が担っており、2019年には、世界の太陽光電池（Photovoltaics: PV）生産のおよそ70%が同国で製造されている。特に、EV向けのリチウムイオン電池の技術革新は目覚ましい。中国政府は、従来のリン酸リチウムイオン電池からニッケル・コバルト・マンガンを用いたよりエネルギー密度の高い三元系リチウムイオン電池への移行を進めてきた。その移行傾向はここ数年の傾向を見ても極めて顕著である（図16-7）。このように、中国では国内のEVバリューチェーンを支えるために、バッテリー技術の内製化が行われている。こうして、リチウムイオン電池セル(Cell)の3/4近くが中国で製造されるにまで至り、来るべきグリーンエネルギー時代の世界の工場としての地位を確実に固めつつある⁵¹²。



(図16-7 中国における主要素材別バッテリーの利用推移 2016-2018⁵¹³)

⁵¹² Ladislav, Sarah & Tsafos, Nikos, “Beijing is winning the clean energy race.” *Foreign Policy*. (October 2, 2020).

⁵¹³ Li, Jason, “Chinese NEV policies drive transition toward more advanced batteries.” CSIS Blog Post (CSIS: January 16, 2019). Retrieved from <https://www.csis.org/blogs/trustee-china-hand/chinese-nev-policies-drive-transition-toward-more-advanced-batteries>

(2) 民間企業による研究開発

中国の産業政策は、共産党一党独裁というその政治制度構造上、一般的には中央集権的と言われている。しかしながら、EV 産業に目を向けると、政府からの補助金はあるにせよ民間企業の活躍にも注目する必要がある。例えば、リチウムイオン蓄電池の製造で世界 3 位の比亞迪(BYD)は、資源リスクを避ける目的でニッケルやコバルトではなく、地球に豊富に存在するリチウム、イオン、そしてリン酸を用いたリン酸リチウムイオン電池をその黎明期に製造し、安定供給に成功した⁵¹⁴。EV 電池を専門に製造する寧徳時代新能源科技(Contemporary Amperex Technology: CATL)は、世界初 EV 用のソジウムイオン電池の開発に成功し、2023 年までにサプライチェーンの構築を目指している⁵¹⁵。

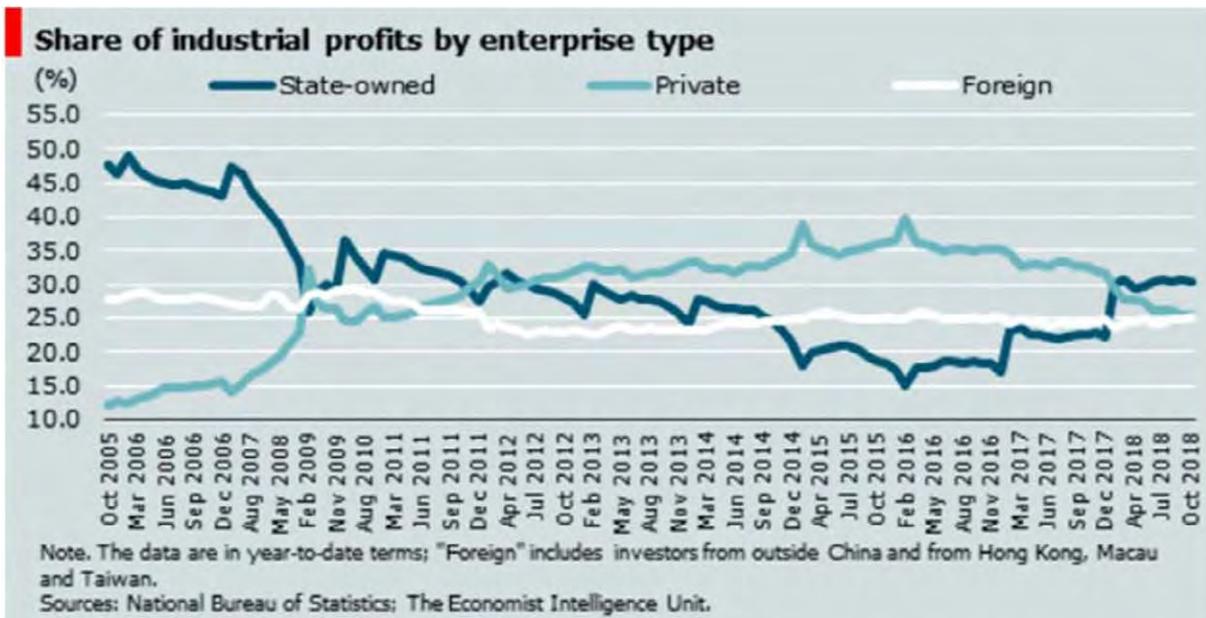
中国は 2000 年以降、国有企業(State-owned Enterprises: SOE)の民営化に積極的に乗り出しており、先端科学技術分野でも BYD や CATL のような民間企業の活躍が目立つようになってきた。実際に、中国の 国有企業と民間企業との産業利益を比較すると 2010 年代を通じて民間企業の利益が国有の企業のそれを上回る傾向にあることがわかる(図 16-8)。経済学者らによる最新の実証研究でも、中国において民間企業の方が国有企業に比べて実に 53%高い生産性を示すことが明らかにされた⁵¹⁶。しかしながら、習近平政権下では、こうした民営化改革に限りが見えてきたこともまた事実である。実際にこれまで中国政府が主導してきた国営企業の民営化は、民間企業とのジョイントベンチャー設立や他の巨大国営会社への買収といったやり方でなされており、本質的に市場の民営化がなされたわけではない⁵¹⁷。特にエネルギーや通信産業といった中核産業では依然として国有企業の利権は大きい。したがって、中国の先端科学技術開発及び関連する産業政策の分析でも、政府主導ないし民間主導という観点についてはセクター毎により注意深い分析が必要となる。

⁵¹⁴ Sanderson, Henry, "Battery technology gives China an opening in electric vehicles. Financial Times." (October 7, 2021). Retrieved from <https://www.ft.com/content/fcbc860b-51cd-40d8-b65f-db97ce9adc57>

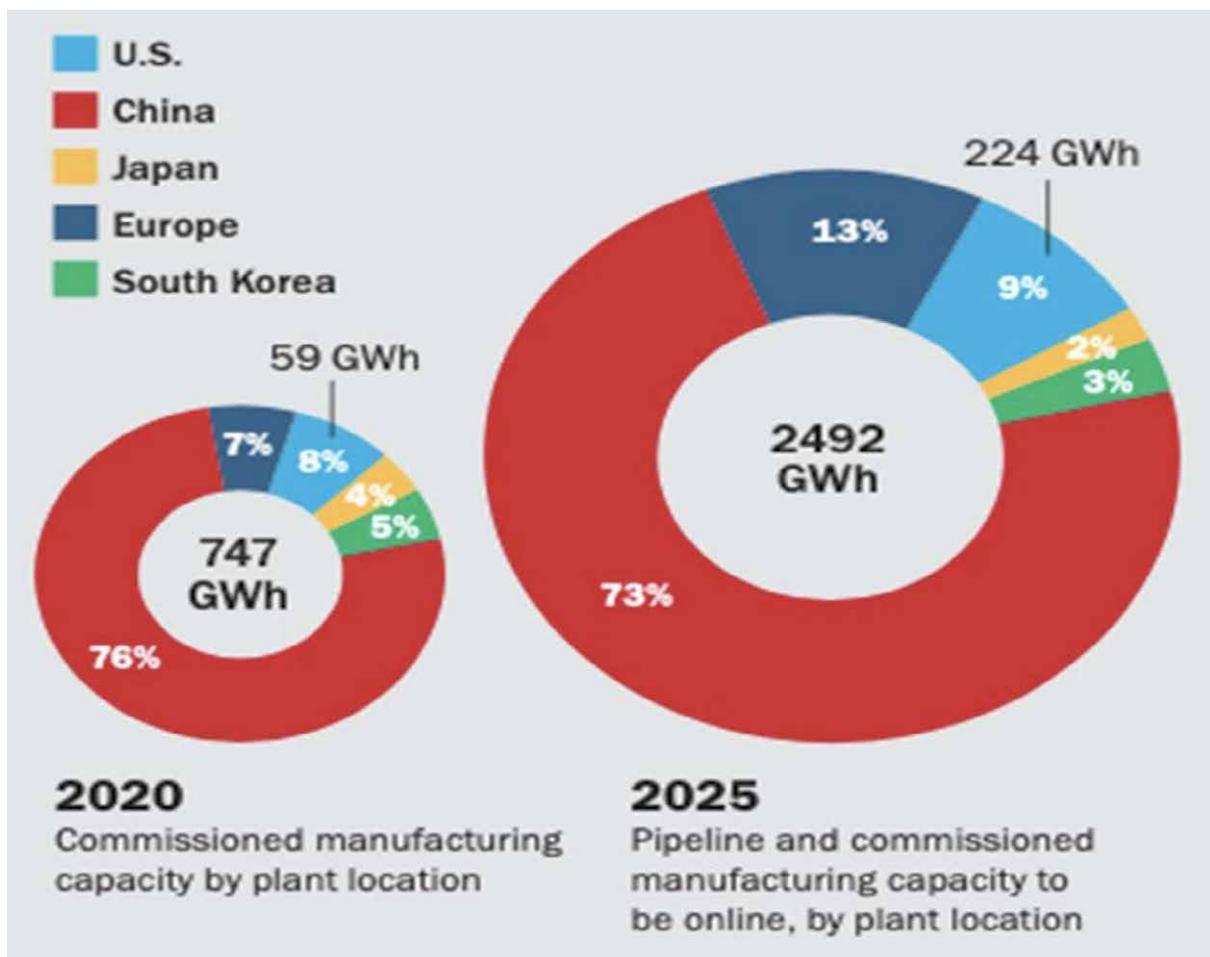
⁵¹⁵ Reuters, "China's CATL unveils sodium-ion battery - a first for a major car battery maker" (July 29, 2021). Retrieved from <https://www.reuters.com/technology/china-top-ev-battery-maker-catl-touts-new-sodium-ion-batteries-2021-07-29/>

⁵¹⁶ Chen, Yuyu, Mitsuru Igami, Masayuki Sawada, and Mo Xiao. "Privatization and productivity in China." *The RAND Journal of Economics* 52, no. 4 (2021): 884-916.

⁵¹⁷ Lardy, Nicholas R. *The state strikes back: The end of economic reform in China?* (Peterson Institute for International Economics, 2019).



(图 16-8 中国国有企业と民間企業の産業利益の比較⁵¹⁸)



⁵¹⁸ Guluzade, Amir, "How reform has made China's state-owned enterprises stronger." World Economic Forum (May 21, 2020). Retrieved from <https://www.weforum.org/agenda/2020/05/how-reform-has-made-chinas-state-owned-enterprises-stronger/>