拡大する半導体需要と新たな課題
資源リスク、サーキュラーエコノミー、そして業界の責任

東北大学大学院
環境科学研究科
教授 松八重（まつばえ） 一代（かずよ）

1. はじめに

パリ協定を受け、2050年までのゼロカーボン社会実現に向けて様々な低炭素技術の導入が検討・実施されている。最も多くの炭素排出を起因する電力産業と鉄鋼業においては、水素ならびにアンモニアをベースとして温室効果ガス排出削減に貢献することが期待され、また電動車の普及や太陽光発電などの再生可能エネルギー技術の導入も世界中で加速している。その中で、半導体は低炭素社会実現において欠かすことのできない存在である。スマートフォンやパソコン、家電製品、自動運転車、医療機器、さらには宇宙産業に至るまで、半導体技術は幅広い分野で活用されている。特に AI や IoT、5G 通信技術の普及が進む中で、半導体需要は急速に拡大しており、2030年には市場規模が1兆ドルを超えると予測されている [1]。

このような状況下で、半導体業界は技術革新を続ける一方で、いくつかの新たな課題に直面している。SEMI 半導体気候関連コンソーシアム（SCC）によれば、2021年の半導体バリューチェーンにおける温室効果ガスの排出は500Mt と報告されており、世界全体の1.5% を占めていると指摘をされている [2]。GHG 排出量全体に占める半導体製造業の排出量は大きくはないものの、Sustainable Semiconductor Technologies and Systems（SSTS）への関心の高まりを受け、半導体素子製造においても環境配慮型の生産技術選択が必要不可欠になりつつある。また、温暖化以外の本稿では、半導体生産に用いられるいくつかの素材に着目して、その関連する周辺のサプライチェーンリスクと環境影響を示しつつ、半導体のライフサイクル分析を行う際の課題について論ずる。

2. 鉱物資源需要が引き起こす環境攪乱

我が国における鉄鋼・非鉄金属資源の流れに着目すると、その多くは建築資材あるいは自動車用途材料として用いられている [3]。中でも自動車には鉄やアルミ、銅といったベースメタル、プラスチックをはじめとし、基盤に用いられるレアメタル、モーターに用いられる磁石に付随するレアアース等、多種多様な稀少資源が用いられている。次世代型自動車は一般的に走行時の二酸化炭素排出量において、ガソリン車よりも小さい。しかしながら、次世代型自動車には生産段階において多くの銅やリチウム、プラチナ等の希少資源が使用されている。これらの物質は鉱石中にごく微量しか含まれていないことに起因する土地改変量の大きさなどの採掘・精錬段階における環境負荷が大きい。これを製造段階における自動車の環境負荷を環境に対する改変量の観点から各種自動車の TMR（Total Material Requirement）の視点で環境攪乱を評価する [4,5]。

TMR は工業製品を製造する際に必要物質の採取・採掘に関与した物質の総量を重量単位で示す指標である。また、工業製品に対して直接的に投入される物質だけでなく、プロセスに必要な燃料などの間接的に投入される物質や採掘の際に発生する脈石といった隠れた物質フローも含んでいる。ガソリン車と電気自動車とを比較すると、一台あたりの重量そのものも、電気自動車の方がやや重く、ガソリンエンジンを構成するアルミニウムと触媒の白金族金属の重量は減るものの、電線やモーター等を構成する銅の重量が大きく増え、リチウムイオン電池を構成するリチウム、ニッケルの重要は増大する。結果として TMR ベースで比較するとガソリン車24トンに対して、電気自動車は70トンと一台あたり3倍弱の環境攪乱を引き起こすことが示されている。これは現状の採掘、選鉱条件の下で推計された結果である。しかしながら、現在、銅やニッケル等鉱石品位の低下が指摘されており [6]、今後、一単位あたりの金属資源調達にはさらなる環境攪乱を要することが予想される。輸送機器の電動化、低炭素技術の導入拡大がもたらす金属資源の需要拡大は、温暖化リスクの軽減のトレードオフとして、金属鉱物調達に関わる土地改変、鉱山排水などによる周辺環境の悪化、鉱山ダムの事故や、土地の所有を巡る紛争等の環境・社会的リスクの増大を引き起こすことが懸念される [7]。

鉱物資源の調達には、採掘活動に伴う土地改変をはじめとする環境攪乱のみならず、多様な社会的な負の影響懸念も存在する。コンゴ民主共和国ならびにその周辺国で調達される3TG（Tin, Tantalum, Tungsten, Gold）と呼ばれる紛争鉱物の使用については産業界の関心は高く、その調達・使用についてサプライチェーンを通じた社会的責任は広く認識されている。しかしながら“More than 3TG”と呼ば

れる3TG 以外の紛争鉱物も多岐にわたる [8]。資源消費に伴う様々な環境リスクについては、低炭素革新技術や環境負荷軽減技術の導入等により回避・緩和が期待される。その際にはトレードオフを含めたライフサイクル視点での環境影響評価が重要であろう。一次資源調達に伴う様々な地政学リスクの回避については、一次資源消費量そのものの削減が重要であり、そのためには資源利用効率の向上ならびに、未利用資源の回収・再資源化により、国内未利用資源の活用が、資源の海外依存によるリスク軽減において肝要である。

3. 半導体製造に関わる資源需要とリスク

半導体生産に用いられる素材の中でも銅や金などの金属素材は前述のように採掘・精錬に関わる大きな環境攪乱を抱える。しかしながら半導体製造にもちいられる素材は金属だけではなく、例えば窒素（N）、リン（P）も半導体生産において欠かせない素材である。リンの需要は半導体部門における高純度赤リンから肥料用途のリン酸までその形態、純度によって幅広い。しかしながらその資源供給においてリン鉱石の供給国の偏在、放射性物質を随伴する鉱石が今後増大することを踏まえて、さらなる資源効率上昇が求められている。エッチングに用いられる高純度リン酸は黄リン（P_4）から生産されるが、P_4は製造に大きな電力消費を必要とするのみならず、その製造は中国、カザフスタン、ベトナム、米国の4カ国のみであり世界的な生産拠点の偏在性から供給リスクの高い素材として知られている [9 ,10]。

窒素については主にアンモニア由来の製品が社会経済で用いられているが、ハーバーボッシュ法によるアンモニア生産は高温高圧化で行われ、エネルギー負荷の大きいプロセスであると同時に事故リスクが大きいことが知られている。反応性窒素と呼ばれる N2以外の窒素化合物は酸性化や PM 等の起因物質であり、大気圏のみならず水圏・土壌圏にも負の影響を多くもたらすことから、世界的にその排出量削減が求められている [11]。

フッ化水素酸やフロン類、アルミニウム製造など、フッ化系ガスの原料として利用される重要な鉱物である蛍石（フローライト）は、中国とモンゴルに大きく依存している。特に中国は世界最大の蛍石生産国であり、全体の生産量の約60～70％を占めている。供給国の政策変更や輸出規制、地政学的リスク、環境規制の強化などが供給の不安定化を引き起こす可能性がある。実際、中国は過去にレアアースや他の重要資源に対して輸出規制を行った事例があり、蛍石においても同様のリスクが懸念されている [12]。

これらに共通するのは、いずれも不純物の混入を許さない高純度な製品の流れを求められる点である。一次資源そのものが潤沢であったとしても、その高純度化を担う精製技術が限られた国・地域に集中している場合は、業界としての素材調達のリスクが高くなることになる。資源・素材のサプライチェーンに関わる地政学的リスクを考える場合は、鉱物資源調達のみならず、素材調達元がどの程度集中しているのか、変化する国際関係の中でどのような影響を受けるのかを注視していく必要がある [13]。

4. サーキュラーエコノミーと責任ある資源調達

半導体業界は急速な成長の裏側で、自動車や鉄鋼と同様に多様な環境的・倫理的課題に直面している。半導体製造プロセスでは大量の水やエネルギーが消費されるため、カーボンニュートラルの達成に向けた取り組みが不可欠である。再生可能エネルギーの活用や、省エネルギー技術の導入を進めることで、環境負荷を軽減する努力が求められている。さらに、今後、資源採掘における労働環境の改善や、環境保護への取り組み強化が求められており、企業の社会的責任（CSR）や環境・社会・ガバナンス（ESG）の観点から、業界全体が持続可能性を考慮したビジネスモデルを構築する必要がある。例えば、大手半導体メーカーの中には、サプライチェーンにおける透明性を確保し、TCFD や TNFD に従った非財務情報の開示を行う動きが広がっている [14]。

欧州を中心に取り組みが広がるサーキュラーエコノミー（Circular Economy, CE）の概念は、上流における資源リスクを最小化する意味でも重要である。サーキュラーエコノミーとは、資源の使用を最小限に抑えつつ、廃棄物を再利用することで持続可能な経済を実現する考え方である。従来の「採掘→製造→廃棄」という直線型の経済モデルから脱却し、「循環型」のモデルへ移行することで、資源消費を削減しつつ環境負荷を軽減することを目指す。半導体業界におけるサーキュラーエコノミーの実践例としては、使用済み製品からのレアメタルの回収やリサイクル技術の開発が挙げられる。しかしながら世界的には電気・電子機器由来廃棄物のリサイクル率は2割に満たないことが指摘をされており [15]、今後、更なる回収と循環資源の有効活用促進が求められる。また、製造工程における廃棄物の削減や、水資源の再利用技術の導入も重要な課題である。しかしながら、サーキュラーエコノミーの実現には技術的・経済的な障壁も存在する。リサイクル技術の開発には高いコストがかかり、回収された資源の品質が新品と同等であることを保証するのは容易ではない。さらに、リサイクルプロセス自体が環境負荷を生む場合もあるため、慎重な設計が求められる。

適切な製品設計、リサイクルプロセスの構築のためには、製品製造に関わるプロセス毎の環境負荷排出に関するデータの整備が不可欠である。しかしながら特に高度技術を有する事業者が多数、サプライチェーンにおいて存在する半導体業界において、個別事業者の製造技術の評価を積み重ねることは容易ではない。国内では電子情報技術産業協会（JEITA）にて半導体製造各社が参加した LCA について検討調査が過去に行われ [16]、これにより温室効果ガス排出

76名が参加した講演会の模様（WEB含む）

に関する知見は一定程度得られているものの、製造プロセスに必要な資源戦略、温暖化ガス以外の環境負荷排出についての情報集積は十分でない。JEITA において集積されたデータの一部は産総研の有する国内最大級の LCA データベース IDEA [17] に一定程度引き継ぎがあるものの、解析データがすでに古い上、主なデータは重要の多くを占めるベースメタルに関するものに偏りがある。半導体製造において戦略的に重要な素材の多くは産業ガスの流れに付随して流入するが、半導体産業のみならず産業ガスの製造と消費については、LCA 業界全体を見渡しても、情報が大きく不足しているのが現状である。

半導体製造に関するライフサイクルアセスメント（LCA）の研究は、ここ数年で世界的に注目を集め、ジャーナル論文などで多く発表されるようになっている。その中で、半導体製造における温室効果ガス（GHG）排出量の分析では、フッ化系ガスが最も大きな割合を占めると指摘されている [2]。具体的には、フッ化系ガス（六フッ化硫黄（SF_6）、パーフルオロカーボン（PFCs）、三フッ化窒素（NF_3）など）が、半導体製造における温室効果ガス排出量全体の約7～8割を占めるとされている。これらのガスが高い割合を占める理由は、エッチングやチャンバークリーニング工程で頻繁に使用されること、そして地球温暖化係数（GWP）が非常に高いことにある。国内の産業ガスの流れについてはガスレビュー社のサーベイが最も詳しいが、個々の半導体生産にどのようなガスがどれほど用いられるかについては、企業ヒアリングや特許情報のレビューなどにより補完し、必要に応じて実験・解析による実測値も活用したインベントリデータ整備を行う必要がある。

5. おわりに

低炭素社会の実現に向け、今後ますます需要拡大が見込まれる半導体産業においては、炭素排出の抑制はもちろんのこと、組み込まれる素材や製造時に用いられるガスなどの副資材等の資源調達に伴う環境負荷の最小化が重要な課題である。中でも温室効果ガス排出の抑制に向けたプロセス改善を行うためには、現状を適切に把握することが求められ、そのためには産業ガスの流れを含むライフサイクル分析に基づいた精緻なインベントリの整理が必要不可欠である。多くの事業者がサプライチェーンに連なるこの業界において、インベントリデータの整備は業界全体の合意形成と協力なしには実現し得ない。

整理されたインベントリデータを基にしたプロセス設計や素材選択は、国際的な競争において重要な強みとなることが予想される。国際的な規格設計における議論をリードするためにも、国内の半導体産業全体が協力し、国際的に発信可能な形で環境情報を整備することが急務である。我が国の半導体業界が未来に向けて持続可能な発展を実現するためにも、これらの取り組みを迅速かつ着実に進めることが期待される。

6. 参考文献

[1] Ondrej Burkacky, Julia Dragon, and Nikolaus Lehmann, The semiconductor decade: A trillion-dollar industry. The global semiconductor industry is poised for a decade of growth and is projected to become a trillion-dollar industry by 2030.
URL:https://www.gsaglobal.org/wp-content/uploads/2022/05/McKinsey-the-semiconductor-decade-a-trillion-dollar-industry-v3.pdf
[2025/10/10 Access]

[2] Yin, Y., & Yang, Y. (2025). Sustainable Transition of the Global Semiconductor Industry: Challenges, Strategies, and Future Directions. Sustainability, 17(7), 3160.
DOI: https://doi.org/10.3390/su17073160

[3] Shinichiro Nakamura, Yasushi Kondo, Shigemi Kagawa, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, and Tetsuya Nagasaka, MaTrace: Tracing the Fate of Materials over Time and Across Products

in Open-Loop Recycling. Environmental Science & Technology, 2014, 48 (13), 7207-7214.

[4] S. Kosai, K. Matsui, K. Matsubae, E. Yamasue, T. Nagasaka, Natural resource use of gasoline, hybrid, electric and fuel cell vehicles considering land disturbances. Resources, Conservation and Recycling, 166, 2021, 105256.

[5] S. Kosai, H. Liao, Z. Zhang, K. Matsubae, E. Yamasue, Multi-regional land disturbances induced by mineral use in a product-based approach: A case study of gasoline, hybrid, battery electric and fuel cell vehicle production in Japan. Resources, Conservation and Recycling, 178, 2022, 106093.

[6] S. Northey, S. Mohr, G.M. Mudd, Z. Weng, D. Giurco, Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. Resources, Conservation and Recycling, 83, 2014, 190-20.

[7] Tomoya Sugiyama, Zhengyang Zhang, Xianlai Zeng, Kazuyo Matsubae, Induced social responsibility in global mineral supply chains: Fatalities from tailings dam failures. Journal of Cleaner Production, Volume 519, 2025, 145983.

[8] Centre for Research on Multinational Corporations, There is more than 3TG, SOMO Paper, 2015.
URL: https://www.somo.nl/wp-content/uploads/2015/02/There-is-more-than-3TG.pdf

[9] 大竹久夫 編著 , リンの事典 , 朝倉書店 , 2017.

[10] N. Yakovleva, E. Nickless eds., Routledge Handbook of the Extractive Industries and Sustainable Development, Routledge, 2022.

[11] Kentaro Hayashi, Hideaki Shibata, Azusa Oita, Kazuya Nishina, Akihiko Ito, Kiwamu Katagiri, Junko Shindo, Wilfried Winiwarter, Nitrogen budgets in Japan from 2000 to 2015: Decreasing trend of nitrogen loss to the environment and the challenge to further reduce nitrogen waste. Environmental Pollution, Volume 286, 2021, 117559.

[12] Gao, Z., Zhang, C., & McFadzean, B. (2025). A Bibliometric Analysis of Fluorite Resource Utilization Technology: Global and Chinese Development in the Past 25 Years. Minerals, 15(7), 679.
DOI: https://doi.org/10.3390/min15070679

[13] Zhengyang Zhang, Meshal J Abdullah, Guochang Xu, Kazuyo Matsubae, Xianlai Zeng, Countries' vulnerability to food supply disruptions caused by the Russia–Ukraine war from a trade dependency perspective. Sci Rep 13, 16591 (2023)
DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-43883-4

[14] レゾナック , 統合報告書（2025）.
URL: https://www.resonac.com/sites/default/files/2025-08/pdf-sustainability-report-integratedreport-RESONAC25J_spread.pdf
[2025/10/10 Access]

[15] Forti, V.; Balde, C.P.; Kuehr, R.; Bel, G., The Global E-Waste Monitor 2020: Quantities, Flows and the Circular Economy Potential; United Nations University/United Nations Institute for Training and Research, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association: Bonn, Germany; Geneva, Switzerland; Rotterdam, The Netherlands, 2020. ISBN 9789280891140.

[16] 一般社団法人電子情報技術産業協会 (JETA) 電子部品部会 ESG 委員会 部品環境専門委員会 電子部品 LCA-WG, 電子部品の GHG 排出削減貢献量 算定に関するガイダンス 第2版 , 2022.
URL: https://home.jeita.or.jp/ecb/activity/pdf/20220701162523_3HEcgdX8Ym.pdf

[17] AIST - IDEA, IDEA ライフサイクルアセスメントデータベース .
URL: https://idea-lca.com/