

○鎗目 雅（東大先端経済工学研）

1 はじめに

「循環型社会」の構築に当たっては、産業分野におけるグリーン・イノベーションが極めて重要な役割を占めることが期待される。しかしながら、どのような政策的・制度的条件の下で技術開発が促進する上で望ましいかに関しては、まだ十分究明されておらず実証研究も少ない。そこで本研究では、化学プロセス産業の一つである塩素・ソーダ産業に関して、環境政策・制度が技術変化に及ぼした影響について日本とヨーロッパの比較研究を行い、循環型社会へ向けたグリーン・イノベーション戦略の可能性を考察した。

2 技術変化における不確実性、多様性、および硬直性

環境問題に対する従来からの経済学のアプローチは、基本的には「外部性」の理論に基づいたものである。すなわち、汚染物質を排出する活動を抑制するような価格インセンティブが働かない限り、環境に対する過剰な負担が不可避免的に生ずるとされる。したがって解決策として考えられるのは、汚染物質の排出に対して、それが与える社会的なコストを内部化できるよう価格（例えば、課徴金）をつけることである。そうすることにより、汚染活動は経済的に最適な水準に調整されるとみなされる。ここでは、静的な意味での最適化が問題とされ、技術は所与の条件とされ、必要であれば誰にとってもいつでも入手可能であり、経済的なインセンティブに従って汚染物質の排出レベルはスムーズに調節されると仮定されている。

しかしながら、一般に環境汚染は長期的なプロセスであり、その間に起こりうる技術革新の影響は、静的な枠組みで計算された利益や損失を大きく上回る可能性がある。この点を考慮し、最近では動的な意味での技術変化を分析の中心にすえた研究がなされるようになってきている。こうした研究によると、課徴金や排出権取り引きを含めた経済的な政策手段は、汚染物質の排出レベルを指定するような直接規制よりも技術革新をより促進するとされる（Downing and White, 1986; Milliman and Prince, 1989）。その理由として、直接規制においては、汚染物質の排出を削減するインセンティブがあらかじめ定められた水準までしか働かないのに対し、経済的な手段を用いた場合には、そのレベルを超えて排出削減を達成することが汚染者にとって私的な意味での利益になるため、より多くの技術開発が促されるとされる。ここでは、環境汚染のメカニズム、コスト、及び技術革新の方向、速度について、完全な情報が共有されていることが想定されている。

当然のことながら、技術革新に関しては大きな不確実性が存在する。環境規制を前にした企業は、汚染物質の削減のための研究開発へ向けて投資を行わなければならない。それには、長い時間と多額の費用を要し、たとえ後の段階になって当初の計画を見直す必要が生じて、投資されたもののすべてを回収することはできない。さらに、ある技術が選択された後には、開発、使用の過程における学習効果を通じてその技術が改善していくため、その技術軌道にとどまるインセンティブはより大きなものとなる。一方、技術革新とは、その定義上、いまだかつて存在しないものを新たに生み出す行為であり、本質的に大きな不確実性を含んでいる。したがって、当初最も適切であるという判断に基づいて選択された技術が、後に劣位なものであることが判明することもありうる。

しかしながら、特に化学産業などの資本集約的な産業の場合、技術の開発、採用に関わる時間、費用は膨大であり、後の段階における技術の変更は容易ではない。

このような不確実性のもとでは、以下のようなグリーン・イノベーションの可能性が考えられる。まず、環境汚染に関する科学的な不確実性により、環境規制の水準が唯一の最適解に定められることを期待するのは極めて難しい。規制が比較的緩やかなものにとどまる場合、新しい技術が私的な意味での経済的利益を伴わない限り、製造工程の内部を変更するようなクリーン技術を導入するよりも、従来からの技術にいわゆるエンドオブパイプ（末端）的な処置を施す方が不確実性が小さく、費やす時間、コストが小さくて済む。しかしながら、こうした技術は汚染処理のコストを単に製造コストに上乘せさせるだけで、まったく新しい、長期的には経済的な可能性もある技術の開発には繋がっていかない。一方、非常に厳しい環境規制が導入された場合には、企業はその場所で生産活動を継続する限り、新たなクリーン技術の開発を追求しなければならない。しかしながら、その規制があまりに性急で、かつ柔軟性を欠いたものであれば、通常は複数存在する選択肢の潜在性が十分に試されることもないままに技術の選択が行われてしまう。その結果、長期的には環境的にも経済的にも最適である技術が埋もれてしまう可能性がある。つまりグリーン・イノベーションを考える上で重要なのは、革新的なクリーン技術の開発を促進する一方で、如何にして選択の多様性を確保しつつ技術の劣位への「ロックイン（閉じ込め）」(Arthur, 1989; David, 1985) を避けるかということである。

3 日本とヨーロッパの塩素・ソーダ産業におけるイノベーションの比較

こうした技術的不確実性、多様性、及び硬直性のもとで、環境規制がイノベーションにどのような影響を及ぼすかに関して、塩素・苛性ソーダ産業の事例を取り上げて、日本とヨーロッパの比較研究を行った。塩素・苛性ソーダの製造法としては、現在3つの電気分解法、すなわち、水銀法、隔膜法、及びイオン交換膜法が世界で採用されている。その内、日本ではイオン交換膜法が製造工程のほとんど全てを占めるのに対し、ヨーロッパでは水銀法がいまだ六割以上の工場で使用されている。こうした異なった技術軌道が出現した背景には、両地域における環境規制の違いが深く関与している。水俣病の記憶がまだ生々しい中、1973年、水銀法を使用している苛性ソーダ工場から排出される水銀が、新たな水俣病の患者を生み出したとの新聞報道がなされた。その報道から数ヶ月後、因果関係がまだはっきりと解明されていなかった中、全ての水銀法を4年以内に全廃するという政府の決定が下された。その当時、技術的に最善と考えられていた水銀法が苛性ソーダの製造工程の90%を占めており、この決定により、産業界は急激な技術の転換を求められた。イオン交換膜法はまだ工業的に確立した製造技術としては存在しておらず、多くの企業は当時唯一の選択肢であった隔膜法を採用することになった。ところが、隔膜法によって製造された苛性ソーダの品質は不純物を多く含んでいたため、特殊な用途には使用が困難であることが判明し、また、水銀法の場合に比べて作り出される苛性ソーダの濃度が低く、それをさらに上げるために蒸気を加える必要があるため、エネルギー消費量も増えることになった。

その一方で、この決定から数年の間に、産業界ではイオン交換膜の技術開発が急速に進み、産業技術として採用が可能な水準に到達しつつあった。こうした動きの中、水銀法工場の約三分の二が転換し終わった時、産業界の強い働き掛けもあって、残りの水銀法の転換を一時中断し、その間イオン交換膜法の技術進歩の動向を見守ることになった。その二年後、政府、産業界、及び学界の専門家で構成された技術評価委員会は、イオン交換膜法がすでに商業技術として確立された水準にあるとの判断を下し、まだ残っていた水銀法は新たに開発されたイオン交換膜法に転換されていった。こうして1980年代半ばには、日本の苛性ソーダの製造工場から全ての水銀

法が廃棄されるに至った。この過程を通じて、イオン交換膜法の開発、運転に関する学習が蓄積され、その知識をもとにしてさらに技術の進歩、改善が進んだ。現在では、3つのプロセスの中で環境面のみならず経済的にも最も優れた技術となり、現在発展途上国も含めて世界中で新しく建設されるプラントのほぼ全てにおいて、この技術が採用されつつある。しかしながら、かつて日本において急いで隔膜法に転換されたプラントは、非常に短い期間運転されただけで、再びイオン交換膜法に転換されることになった。それは、多額の投資費用が実質的に無駄に使われてしまったことを意味する。

ヨーロッパでの技術変化は、日本とは異なった経路を辿ることになった。1970年代当初には、日本と同様水銀問題への世論の関心は高まっていた。1970年代半ばには水銀を含めた危険物質による汚染を除去するための枠組み規制が出され、後には苛性ソーダ産業からの水銀排出を対象とした規制が設けられ、具体的な排出限界値と環境目的値が定められた。この規制に対応して、ヨーロッパの企業の多くは、主としてエンドオブパイプ技術によって水銀の排出を削減していった一方、イオン交換膜法の研究開発はあまり進まず、また製造工程の転換の例は少数に止まった。現存する水銀法は2010年までに全て廃止すべきであるとの決定が下されており、今後新しく工場を建設する際には水銀法を用いないことには同意があるものの、現在でもヨーロッパでの製造プロセスの60%以上はまだ水銀法に基づいており、その転換は遅々として進んでいない。結果的に、エンドオブパイプ技術を開発・導入することにより、すでに時代遅れとなりつつある水銀法の寿命を延ばすことになってしまった。

この事例からグリーン・イノベーションに関していくつかの示唆を得ることができる。まず、汚染のメカニズムとその被害の程度に関して大きな不確実性が存在することによって、一方では歴史的、社会的背景により非常に厳しい規制が導入され、他方においてはそれが比較的緩やかなものになることがありうる。汚染物質の環境中における物理的、化学的な挙動、およびその生物学的な影響を完全に解明しきすることは困難であり、経済学が通常求めるようなコストベネフィット分析の観点からどの規制がもっとも適切であるかを判断することは容易ではない。こうした状況において、既存の製造技術の転換という厳しい環境規制は、新しいクリーン技術の開発、採用を促進し、その過程で蓄積された知識や経験をもとにして、環境と経済の両面において優れた技術が生まれる可能性がある。しかしその一方、導入された環境規制があまりにも急激、かつ柔軟性を欠いたものである場合、後になって不適切であることが明らかとなる技術への転換が強いられることもありうる。その後、技術開発の動向を考慮に入れるよう政策が修正されても、最適な技術への再度の転換には多額の費用を要するであろう。他方、比較的緩い環境規制のもとでは、多くの企業にとっては既存の技術に改善を進めるという形で汚染物質の排出を減らすという対応が、少なくとも短期的には経済的であると考えられる。しかし一方、新しいクリーン技術への需要が生まれず、したがってそのための研究開発へのインセンティブも小さくなる。その結果、既存の技術の部分的な改善に止まり、長期的にみて革新的な技術は生まれにくくなってしまう。したがってここで求められるのは、比較的厳しい環境規制の制定、実施によって革新的な技術への需要を創出する一方、最新の技術開発の動向に関する正確で詳細な情報の交換、共有に基づいて、学習効果を通じた技術進歩を顕在化させるような環境を作り出すことである。

4 循環型社会へ向けたイノベーション戦略：問題物質の利用の洗練化もしくは代替化

循環型社会へ向けたイノベーション戦略を考える上で参考となるのは、厳しい環境規制は革新的なイノベーションを創出することにより、長期的には企業の競争力を促進するという「ポーター仮説」(Porter and van der

Linde, 1995) や、企業が漸進的なイノベーションに成功するが故に、破壊的なイノベーションによって競争力を喪失してしまうという「イノベーターのジレンマ」(Christensen, 1997) である。特に循環型社会においては環境に悪影響を及ぼすような物質に関しては十分な対応が必要となるが、その際のイノベーション戦略には、そうした問題物質を使用し続けたままでその取り扱いを洗練していくのか、それともそれを代替する材料の開発に向かうのか、大きく分けて二つの選択肢が存在する。

塩素・ソーダ産業で使用されてきた水銀に関しては、上記にあるように、ヨーロッパでは企業の多くは水銀法の使用の継続を前提としつつ、水銀の使用・回収を洗練化する技術の開発・導入によって水銀の環境への排出量を削減していった一方、日本の産業界では水銀法を代替するイオン交換膜の技術開発が急速に進み、現在では全ての工場においてこの製造方法が使用されている。有害物質のもう一つの例である鉛に関しては、蓄電池材料や電気部品用はんだなど、現在日本では年間約 35 万トン使用されている。鉛蓄電池は、多数回の充放電を安定して繰り返すことができるので、特に自動車用として大量に用いられているが、使用済み電池の多くが回収され、鉛は有価物として再生利用されている。約 18 万トンの鉛がリサイクル利用されているが、その主なものは鉛がまとまって回収できる蓄電池に用いられたものである。また、電気・電子機器のプリント板では鉛はんだが広く使用されている。そのリサイクルについては、プリント板製造時の余剰はんだは回収し、もう一度溶融してはんだとして使用されている一方、製品からはんだの回収は、作業の効率・コストの面からほとんど行われておらず、プリント板からの貴金属回収後の残渣として、鉱山の採掘跡地などに埋め立て処分されている。そうした中で、電気・電子機器の製造企業は、鉛を他の材料で代替した、いわゆる鉛フリーはんだの研究開発を行ってきている。

このように、問題物質の利用の洗練化もしくは他の物質による問題物質の代替化という選択は、水銀の例のように企業間で異なり、また鉛の例のように産業間でも異なりうる。問題物質の利用の洗練化は、従来の技術の継続使用を前提とするため過去の経験や学習の蓄積を活用できる反面、技術開発は漸進的なものに留まってしまふ。一方他の物質による問題物質の代替化は、革新的な技術開発に繋がる可能性を秘めているが、その実現の過程における不確実性は極めて大きい。この二つのイノベーション戦略は、循環型社会において企業が社会的使命を果たしつつ、有効なビジネスモデルを構築していく上で極めて重要な点となる。

5 参考文献

- Arthur, W. Brian. 1989. "Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-in by Historical Small Events." *Economic Journal*, **99**, 116-131.
- Christensen, Clayton M. 1997. *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail*. Boston: Harvard Business School Press.
- David, Paul A. 1985. "Clio and the Economics of QWERTY." *AEA Papers and Proceedings*, **75** (2), 332-337.
- Downing, Paul B. and Lawrence J. White. 1986. "Innovation in Pollution Control." *Journal of Environmental Economics and Management*, **13**, 18-29.
- Milliman, Scott R. and Raymond Prince. 1989. "Firm Incentives to Promote Technological Change in Pollution Control." *Journal of Environmental Economics and Management*, **17**, 247-265.
- Porter, Michael and Class van der Linde. 1995. "Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship." *Journal of Economic Perspectives*, **9** (4), 97-118.