

経路依存、ロック・インとグローバル・エネルギー戦略[◆]

計量分析ユニット 需給分析・予測グループ 研究主幹 奥村 憲博

はじめに

エネルギー技術（その他の技術も同様）は、必ずしも最適なものが市場メカニズムを通じて選択されるわけではない。むしろ些細な出来事が技術の市場優位性の端緒を形成し（経路依存）、規模の経済・学習効果¹⁾、Positive Feedback / Network Effects²⁾が存在する場合は、その自己強化メカニズムにより自己永続的市場支配（ロック・イン）に至る³⁾。

地球温暖化対策が人類にとって禍根を残さぬ形で実施されるには、早急に現実的かつ robust なエネルギー技術 Path を示し、その実現に向けてグローバルに邁進することが求められる。そのためには、現実世界の経路依存性及びロック・インの惹起という市場特性を踏まえ、最適な技術選択を必ずしも行えない市場メカニズムに依存するのではなく、先進国等で既にロック・インしている化石燃料ベースのエネルギー技術からの脱却をどのように推し進めるべきなのか、まだ必ずしも先進国のように化石燃料ベースのエネルギー技術がロック・インしていない発展途上国等において持続可能なエネルギー技術をロック・インさせていくのかに焦点を当てたエネルギー戦略が必要である。

本研究では、経路依存及びロック・インの存在及びそれらを配慮したエネルギー戦略の重要性を示した上で、経路依存及びロック・インに配慮したエネルギー戦略の基本的考え方を示すことを目的とする。

1. 経路依存及びロック・イン

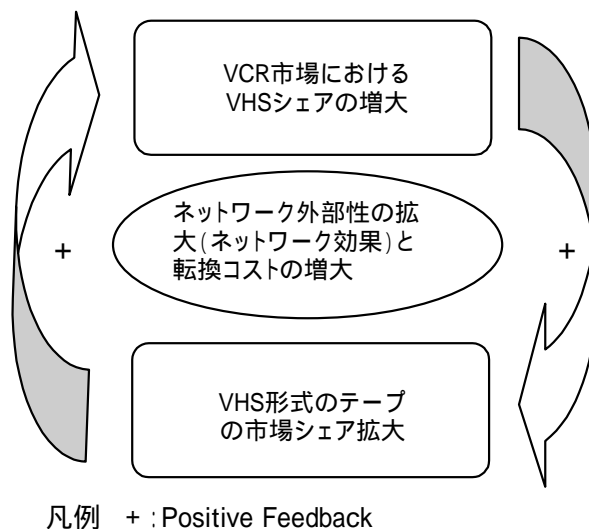
ここでは些細な出来事が市場優位性を形成し（経路依存）Positive Feedback/Network Effects が収穫逓増の状況を創出することでロック・インにいたった事例を紹介する。

1-1 VHS と BETA

ビデオカセットレコーダーの方式である VHS と BETA は、ほぼ同じ条件で市場参入し（同時期、同シェアスタート）、台頭に競争していた。VHS が技術的に優れていたわけではなかったが、しかしながらたまたま VHS が市場シェアでちょっと優位に立ったことが、Positive Feedback による自己強化メカニズムを惹起し、ネットワーク効果及び転換コストの増大が相俟って、VHS が圧倒的市場シェアを獲得するに至った（図 2-1 参照）⁴⁾。この種の自己永続的市場支配をロック・インという。

[◆] 本稿は 2007 年 1 月 26 日「第 23 回エネルギーシステムカンファレンス・経済・環境カンファレンス」にて発表されたものである。

図 1-1 Positive Feedback、ネットワーク効果と転換コストの増大



Positive feedback を引き起こすメカニズムの 1 つが、生産に適応される学習曲線である。より多くの生産を行うことで経験を積み、その結果、生産性が向上し価格低下、市場シェアの拡大、さらなる生産ノウハウの拡大と循環していくことになる。実質的に全ての製品というものは、学習曲線の影響下にあり、新興技術市場は潜在的に Positive Feedback の影響を受ける。もちろん、ネットワーク効果や転換コスト等、Positive Feedback を促進するその他のメカニズムも存在する⁵⁾。このように、経路依存 ロック・インという現象は、決して特別なものではなく日常的なものである。

1-2 自動車の動力源

現在はガソリン車が市場を支配しているが、20 世紀初頭では、それぞれに不確実性を有した蒸気エンジン車、ガソリンエンジン車及び電気自動車の 3 つの候補が、競争を展開していた。内燃機関も、適正な品質等級のガソリンが得られにくいこと、危険であること、内燃機関エンジンはより多くの洗練された作動を蒸気エンジンより必要とされること等、多くの欠点を有していた。当時の蒸気エンジン車は、技術的・経済的両面でガソリンエンジン車と同等であった⁶⁾。

しかしながら、次のように歴史はガソリン車に有利に展開し、

- ・ 電気自動車にとっては、当時の米国の電力グリッドが地方には展開していないことがハンディ
- ・ 蒸気エンジン車にとっては、口蹄疫という伝染病が馬にはやったことから道路脇に水桶を設置することが条例で禁止されたことがハンディ

そして最初の 10 年間で、ガソリン車は、電気自動車及び蒸気エンジン車を数桁のオーダ

ーで引き離した⁷⁾。

もし最初の自動車の出現が20年程度後れていたとしたら、今日の自動車のエンジンは、内燃機関ではなかったかもしれない⁸⁾。当該事例は、ある意味典型的な経路依存性を示している。

1-3 原子炉

原子炉の形式は、現在、軽水炉が世界の80%以上を占めている。この原子炉形式は、今日の専門家によると、軽水炉型原子炉は他の形式に劣るというコンセンサスがあるにも拘わらず、急速にしかも断定的に加圧水型原子炉（軽水炉型原子炉の最も一般的な形式）をベースにした米国の技術にロック・インした。

これは、第2次世界大戦後の潜水艦用の原子炉建設の軍事物資購入がウェスティングハウス社とジェネラルエレクトリック社に入ったという歴史的事件に起因していた⁹⁾。その後、ソビエト連邦が1949年に最初の原爆実験を行った後、急速に民生用の原子力プログラムを開発する必要性が出てきた。軍事用の最適性は、軍事以外への転用の成功をなんら保証するものではないが、その際、選択されたのは身近な軽水炉型であった。原子力のエンジニアの世界では、同様の開発が行われていれば、ガス冷却炉の方が優れていたかもしれないと論争されている。

1-4 その他の事例

上記以外の経路依存からロック・インした事例としては、電力供給システムとしての交流¹⁰⁾、キーボード配列（QWERTY型）¹¹⁾、鉄道の軌間ゲージ（世界の半数以上の鉄道で採用：1435mm）¹²⁾等のケースがある。

2. 経路依存、ロック・インのインプリケーション

これまで見てきた事例は、市場は必ずしも最適な技術等を選択しないことを示している。

新古典派経済学では、完全競争、完全情報及び収穫逓減の条件を満たす場合は、市場メカニズムは効率的・合理的に機能し、パレート最適（単一均衡）を達成するとしている。

しかしながら、現実的には、先の例にもみられるように、学習効果及びネットワーク効果により収穫逓増が惹起される世界では、歴史的な些細な事に端を発し、positive feedbackが起こり、必ずしも最適ではない技術等が市場シェアを支配しロック・インするわけである（複合的均衡）。市場の失敗の一形態である。もちろん、市場メカニズムが必ずしも機能しない要因としては、市場の寡占性、カルテルの存在及び情報の非対称性等もある。

経路依存、ロック・インのインプリケーションとしては、次の点に要約できる。

- ・ 収穫逓増が生じるケースでは、市場は必ずしも最適な技術スタンダード（性能等）を選択しない。
- ・ 経路依存を考慮したエネルギー政策の必要性がある。エネルギー技術選択の全てを市場に委ねていると不確実性が解消されるまで、市場が技術等の選択を行わない可能

性がある。ひいては、気候変動への対応が遅きに失することも懸念される。従って、性能・効果・コスト等にある程度目途のついた既存技術群（大半は産業用のスケールで実施中）を積極的に導入していく技術として、導入パスを明示していくことが必要である（表2-1参照）。

表2-1 CO2 排出削減ポテンシャルを有する既存技術（2004年から2054年までの50年間で1GtC/年/optionの削減）

分野	技術オプション	内容（各技術オプションは、2004年から2054年までの50年間で1GtC/年の削減ポテンシャルを保有）
家庭や企業でのエネルギー効率向上・省エネ	1. 自動車の燃費改善	20億台の車の燃費を約13km/lから2倍の約26km/lに改善
	2. 自動車走行距離の縮減	20億台の車の年間走行距離を8,000kmに半減
	3. ビルの省エネ	家庭やオフィス、商店での電力消費量を25%削減
燃料転換	4. 石炭火力発電所の効率化	1600箇所の大型石炭火力（1ギガワット）の効率を40%から60%に向上
	5. 石炭火力から天然ガス火力発電へ転換	1400箇所の大型石炭火力発電所を天然ガス火力発電所へ転換
CO2の回収と貯留（CCS）	6. 石炭火力発電所へのCCSの導入	800箇所の大型石炭火力発電所へのCCSの導入
	7. 水素生産施設へのCCSの導入	15億台分の自動車燃料用水素を生産するプラントにCCSを導入
	8. 石炭から合成燃料製造施設へのCCS導入	石炭から合成燃料を製造するプラント（3,000万バレル/日：Sasolの200倍）へCCSの導入
原子力	9. 石炭火力発電を原子力発電へ転換	原子力発電を現在の3倍（700GWの追加）にして石炭火力発電を転換
再生可能エネルギー発電と燃料	10. 石炭火力発電を風力発電へ転換	風力発電を50倍にして石炭火力発電を代替
	11. 太陽光発電を石炭火力発電と代替	太陽光発電を700倍にして石炭火力発電を代替
	12. 風力発電で自動車燃料用水素の製造	風力発電を80倍にして自動車燃料用水素を製造
	13. バイオマス燃料による化石燃料代替	世界の耕作地の1/6を使用してバイオ燃料（エタノール）を生産（20億台の自動車用）
農業と林業	14. 森林伐採削減、森林再生、植林及び新たな植林	熱帯の森林伐採禁止（0.5GtC/年）と3億haの新たな植林（現在の2倍）
	15. 環境保全型耕作	全世界の農地の100%を環境保全型の耕作（現状の10倍の水準）

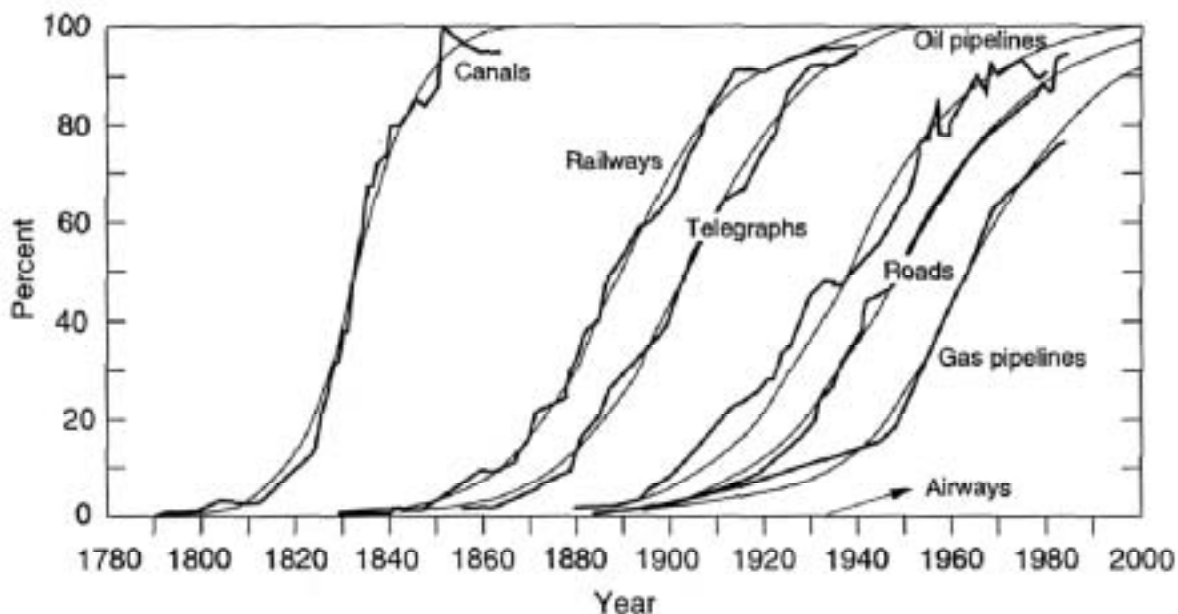
（出所）R. Socolow and S. Pacala, Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 years with Current Technologies, Science, Vol 305, 13 August, (2004), 968-971

- ・ロック・インを考慮したグローバル・エネルギー戦略が必要である。例えば先進国は、化石燃料ベースのエネルギーシステム（転換部門、運輸部門等）にロック・インしている。このロック・インしている市場をクリーンなエネルギー市場へとブレークスルーしていかなければならないわけであるが、特にネットワーク系インフ

ラを整備する電力及びガスでは、ロック・インする過程で数十年に渡り相当な資本蓄積がなされている（図 2-1 参照）。従って、ただ単に、エネルギーコスト差に着眼しただけの支援制度では十分ではなく、既存施設の設備利用率が低下した分のサンク・コストへの手当ても包含する等の必要がある。ロック・インは、また、発展途上国は、今後転換部門（発電）及び運輸部門のエネルギー需要が急増する見込であるが、このエネルギー需要急増部分が化石燃料ベースのエネルギーシステムにロック・インする可能性が高い。また、ロック・インしていない市場を化石燃料ベースのエネルギーからプロテクトしなければならない。さもないと施設の耐用年数を考慮すると今後約半世紀に渡って、化石燃料ベースのエネルギーへのロック・インさせてしまうことになる。

- ・ロック・インを助長している要因を取り除くため、市場メカニズムが、機能する環境整備が必要である。特に外部コスト（気候変動、健康被害等）をエネルギー価格に転嫁することで正しい情報をグローバル規模で市場に与えていくことが重要である。また、特に発展途上国における化石燃料に対する消費者・生産者補助金等（表 2-2 参照）もロック・インを強力にサポートし、市場を歪める大きな要因であることから、グローバルに廃止の方向に向かうことが、ロック・インに対する対抗策となりうる。

図 2-1 米国におけるネットワーク系インフラ等の展開：最大時ネットワークに対する達成率の推移



(出所) A. Grubler and N. Nakicenovic, Evolution of Transport Systems: Past and Future. RR-91-8. International Institute for Applied Systems Analysis, Luxenburg, Austria.

表2-2 非OECD諸国における最終エネルギー価格に占める消費補助金の割合(2005年)

(単位: %)

	ガソリン	ディーゼル	灯油	LPG	軽油	重油	天然ガス	石炭	電気
中国	5	13	3	18	0	0	45	17	0
台湾	0	0	0	9	27	6	0	5	0
インド	0	0	47	26	0	0	70	0	5
インドネシア	24	54	58	30	35	n.a.	0	58	13
マレーシア	26	37	0	33	9	0	n.a.	n.a.	5
タイ	0	16	0	35	0	0	65	57	10
パキスタン	0	28	19	n.a.	21	n.a.	59	0	n.a.
フィリピン	0	0	5	0	34	n.a.	n.a.	n.a.	0
ベトナム	6	26	5	0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	14
イラン	82	96	76	67	32	73	66	0	30
サウジアラビア	51	81	6	n.a.	81	n.a.	89	n.a.	54
エジプト	65	80	88	94	80	71	76	0	4
南アフリカ	0	0	0	0	0	0	n.a.	0	41
ナイジェリア	19	17	42	6	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	24
ブラジル	0	0	n.a.	0	0	n.a.	n.a.	n.a.	0
アルゼンチン	20	5	0	0	0	0	58	n.a.	27
ベネズエラ	90	96	0	82	94	84	n.a.	n.a.	25
ロシア	0	0	0	0	0	16	57	0	34
カザフスタン	28	20	n.a.	n.a.	49	48	83	86	24
ウクライナ	0	23	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	83	36	27

(出所) IEA, World Energy Outlook 2006

3. グローバル・エネルギー戦略の考え方

経路依存、ロック・インのインプリケーションを踏まえたグローバル・エネルギー戦略の考え方については、次のとおりである。

3-1 持続可能性を確保するための既存技術の導入促進

既存技術の実用化に向けての最大の障壁の1つは、革新技術を含めた不確実性である。そこで、超長期的エネルギー技術パス(再生可能エネルギー、省エネ、革新的原子力、水素社会等)を地域特性を反映したものととして地域毎に明示することで、経路依存の政策的誘導を行う。そして、併せて、充実した制度支援を行うことで、技術開発の不確実性を低減し、RDD&Dの促進を図るものである。

3-2 ロック・インしているエネルギー市場へのクリーン技術の導入促進

ロック・インしている先進国の転換部門及び輸送部門へのクリーン技術の導入には、思い切った強力な支援策(RPS、FIT等)の導入が不可欠である。転換部門であれば、再生可能エネルギーの導入に伴う既存施設の設備稼働率低下から派生する sunk・コストへの手当ても含めた支援制度化が求められる。但し、当該支援制度については、当該支援制度が不要なロック・インを回避するためのフェーズ・アウトの仕組みを内包しておく必要がある。

3-3 発展途上国発電部門・運輸部門のカーボン・ロック・イン阻止対策

今後、長期的にグローバルにエネルギー需要が大きく伸びる分野の1つは、発電部門である。この部分が、先進国の化石燃料ベースの技術で賄われることになれば、CO₂排出が正にグローバルにロック・インされる状況に至る危険性がある。グローバル・カーボン・ロック・インを回避するためには、再生可能エネルギー及び再生可能エネルギーを最大限取り込んだバイオディーゼル・マイクログリッド等で賄っていく方策を導入していくべきである。発展途上国で新たな技術の普及を図るといのは、 sunk cost が少ない分、有利な面を有しており、発展途上国の導入促進に伴う学習効果により、さらなるコスト削減、先進国でのさらなる導入促進へと連鎖していくことも考えられる。

そのためには、国際機関、世界銀行、アジア開発銀行及び先進国の ODA 等のスキームを変更し、上記に対応した国際的フレームワークの形成が求められる。

3-4 エネルギー価格への外部コストの内生化・化石燃料への補助金改革

再生可能エネルギー等のクリーンなエネルギーが必ずしも市場に迅速に入り込んでいけない原因の1つは、そのコストが化石燃料ベースのエネルギーよりも高いことに起因する。さらには、化石燃料に対し、消費者補助金や生産者補助金を出している国・地域もある。ますます、コスト差を拡大している要因である。化石燃料が地球温暖化及び健康に影響を及ぼしていることを勘案すると、それらのコストも一般の人々が負担していることになる。

従って、気候変動及び健康被害という市場の失敗を改善していくためには、エネルギーは、外部コストをオンした価格で市場に出されることが望ましい。また、化石燃料関連の消費者補助金及び生産者補助金も当然のことながら、縮小・廃止の方向で改革されることが望ましい。そうすることが、強力な化石燃料への現状のロック・インへの対抗策となりうる。

勿論、これらの措置は、一部の国・地域で実施されても効果は限定的であり、産業競争力等の関係でアンフェアな状況を惹起することにもなる。従って、グローバルな取組が求められる。

4 . まとめ

地球温暖化から大きなダメージを受けないためには、大気中の CO₂ 濃度を 500 ± 50 ppm に収めなければならないし、そのためには、CO₂ 排出を約 50 年間に渡って、7 GtC/年程度にとどめる必要があるとされている (BAU ケースでの CO₂ 排出量は 2054 年に 14 GtC/年)¹³⁾。

さらに、Stern Review では、気候変動に対応した早急で強力なエネルギー対策を行わないと、気候変動の総体的なコスト・リスクは、少なくとも地球の GDP の 5 % を今後未来永劫、毎年失うことになる。もう少し広めにそのリスク及びインパクトを算定すると、世界の GDP の 20% 以上にもなりうる。一方、気候変動の最悪の事態を回避するための投資は、世界の GDP の 1% 程度で済む。今後 10-20 年間の投資が、今世紀の後半の 50 年及び来世紀の気候に大きな影響を及ぼすとする研究もなされている¹⁴⁾。

上述の状況を勘案すると、経路依存及びロック・インという特性を前提に、地域特性も踏まえたグローバル・エネルギー戦略を国際的フレームワークの中で構築し、既存のクリーンなエネルギー技術の普及促進及びそのための環境整備（支援制度整備、化石燃料補助金の廃止等）をグローバルに早急に展開していく必要があると思われる。

お問い合わせ：report@tky.ieej.or.jp

参考文献

-
- 1) J. K. Arrow; The economic implications of learning-by-doing, *Review of Economics Studies*, 29, (1962), 155-173.
 - 2) M. L. Katz and C. Shapiro; Network externalities, competition and compatibility, *The American Economic Review*, 75(3), (1985), 424-440.
 - 3) W. B. Arthur; *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, (1994).
 - 4) W. B. Arthur, Positive feedback in the economy, *Scientific American*, February, (1990), 92-99
 - 5) R. Cowan and D. M. Kline; The implications of potential lock-in in markets for renewable energy, *National Renewable Energy Laboratory Report NREL/TP-460-22112*, (1996).
 - 6) D. Kirsch; *Flexibility and Stabilization of Technological Systems: The Case of the Second Battle of the Automobile Engine* (Program in History of Science and Technology, Department of History Stanford University), (1995).
 - 7) J. Foreman-Peck; *Technological Lock-in and the Power Source for the Motor Car*, *Discussion Papers in Economic and Social History*, Vol7 (University of Oxford), (1996).
 - 8) B. W. Arthur; *On Competing Technologies and Historical Small Events: the Dynamic of Choice under Increasing Returns*, Working Paper (IIASA, Austria), (1983), 83-90
 - 9) R. Cowan; Nuclear Power reactors: a study in technological lock-in, *The Journal of Economic History*, 5(3), (1990), 541-567.
 - 10) P. A. David and J. Bunn; The economics of gateway technologies and network evolution: lessons from electricity supply history, *Information Economics and Policy* 3, (1988), 165-202
 - 11) P. A. David; *Understanding the economics of QWERTY: the necessity of history, and the Modern Economist*, Blackwell, Oxford, (1986), 30-40.
 - 12) D. J. Puffert; Path Dependence in Spatial Networks: The Standardization of Railway Track Gauge, *Explorations in Economic History* 39, (2002), 282-314
 - 13) S. Pacala and R. Socolow; Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies, *Science*, Vol305, August, (2004), 968-971.
 - 14) Stern Review: *The Economics of Climate Change*;
http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm.
(アクセス日 2006.11.30)