技術進歩を内生化したエネルギー経済モデルの開発と CO₂ 回収貯留技術の導入可能性評価*

楠朋也^{*1}, 古林敬顕^{*2}, 中田俊彦^{*2}

Development of an Energy Economic Model with Endogenous Technical Progress and Feasibility Study of CCS Systems

Tomoya KUSUNOKI, Takaaki FURUBAYASHI and Toshihiko NAKATA^{*2}

^{*2}Tohoku University, Graduate School of Engineering
Dept. of Management Science & Technology
6-6-11-815 Aoba-Yama, Sendai, Miyagi, 980-8579, Japan

The main objective of the research is to develop a bottom-up energy-economic model considering endogenous technical progress, and to analyze the potential of CCS introduction among Japan's electricity market in order to find out an optimum carbon reduction scenario into the future. On the basis of two-factor learning curve, both learning-by-doing and R&D functions drive technical progress in the model. The analysis is performed with a set of scenarios based on alternative assumptions for technical progress of carbon capture technologies: chemical absorption and physical absorption. As a result, technical progress decreases generation costs of power technologies with CCS systems resulting in the acceleration of additional CCS introduction. In addition, generation cost with chemical absorption notably decreases due to technical progress, and share of gas-fired power plant in total power generation increases. Thus, carbon emissions reduction reaches around 17% of total carbon emissions in 2050 under projected scenario, however, technical progress has little impact on total systems cost. Technical progress by learning-by-doing has a strong impact on CCS introduction than that of R&D. Moreover, unconsidered factors such as R&D effort in private sectors and spillover may push down possible carbon emissions as well.

Key Words : Technical Progress, Carbon Capture and Storage, Energy Management, Thermal Power Generation, Systems Engineering, Global Warming

1. 緒 言

技術進歩とは、同一の生産要素投入量でより多くの生産物の産出を可能とする生産技術上の改善である⁽¹⁾⁽²⁾。つまり、技術進歩によって生産性が向上して、単位量あたりの生産費（生産コスト）の低減が可能となる。生産費は、設備費や運転維持費など生産に要する総費用を表す。産業革命以降の技術の変遷を振り返ると、技術進歩が生産単価の低下に及ぼす役割は大きい。

太陽光発電の比建設費を例にとると、1978 年の 2.6×10^4 USD (1998) / kW から、1998 年には 3.5×10^3 USD (1998) / kW と、単位量あたりの生産費が 20 年間で約 1/10 にまで低減した⁽³⁾。現時点で割高な技術であっても、技術進歩に伴う単位量あたりの生産費の低減によって、将来普及する可能性を秘めていると考えることができる。低炭素社会の実現を目的とした地球温暖化対策技術には、再生可能エネルギー利用技術や CO₂ 回収貯留技術 (Carbon capture and storage; CCS) など、複数の選択枝が存在する。技術進歩を考慮して技術の導入可能性を評価することによって、研究開発投資などを効果的に実行するための判断指針を提供できると考えられる。また、単一技術の開発目標を性能やコストから設定する従来型のアプローチに対して、類似の競合技術あるいは代替技術までも考慮して、マーケットでの価格優位性を検証する研究アプローチは、将来目標に向かって複数の代替案の中から、もっとも効果的なパスを選択できる利点がある。

そこで本研究では、技術進歩の効果を取り入れて、地球温暖化緩和のための技術を定量評価可能な手法の開発を目的とする。現時点でもっとも優れている二因子学習熟曲線にもとづいて技術進歩をモデル化し、これをエネルギー経済モデル

* 原稿受付 2010 年 3 月 26 日

^{*1} 東北大学大学院工学研究科技術社会システム専攻

^{*2} 正員, 東北大学大学院 工学研究科

(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11-815)

E-mail: nakata@m.tohoku.ac.jp

に内生化する。その結果、将来のエネルギー市場における技術競争を考慮できて、いわゆる社会シミュレーションが可能となる。

対象技術として、火力発電に伴う二酸化炭素排出の大幅な削減が可能な CCS システムを考える。経験による学習と研究開発の成果が、CCS システムの導入可能性に及ぼす影響を明らかにする。解析では、CCS システムとして、CO₂ 分離回収技術、輸送技術、貯留技術の 3 つの要素技術から成るシステムを想定し、CO₂ 分離回収技術に対して技術進歩を想定する。

2. 技術進歩のモデリング

2・1 技術進歩の要因

技術進歩を推し進める要因には、経験による学習 (Learning-by-Doing; LBD)、研究開発 (Research and development; R&D)、スピルオーバー (Spillover) の 3 つがある⁽⁴⁾。

経験による学習とは、監督者、労働者、経営者が作業や生産管理などに熟練することに伴う、生産性の向上効果である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。研究開発とは、技術の改善や新しい知識の獲得を目的として、企業、政府、非営利団体が進めている科学、技術における基礎的・応用的研究と、プロセス設計、開発を含む活動である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。次に、研究開発による技術進歩は、Learning-by-searching (LBS) と呼ばれる。このほか、スピルオーバーとは、単一技術や複合技術を体系的に他の企業、産業部門、国などに移植することであり⁽⁴⁾⁽⁵⁾、たとえば、外部からの革新技術の導入に伴う生産性向上がある。

2・2 技術進歩のモデリング手法

技術進歩をモデル化する手法として、経験による学習と研究開発に着目した二因子学習熟曲線 (Two-factor learning curve) がある。累積生産量と技術的知識ストックの増加に応じて、生産コストが式(1)、式(2)のように低下する傾向をモデル化した手法である⁽⁶⁾。研究開発投資額は、政府、企業、公的機関などによる研究開発投資を含む。

$$y_t = a \cdot \text{CumProd}_t^{\frac{\ln(pr_{LBD})}{\ln 2}} \cdot KS_t^{\frac{\ln(pr_{LBS})}{\ln 2}} \quad (1)$$

$$KS_t = (1 - \sigma) \cdot KS_t + RD_{t-x} \quad (2)$$

y_t	: 時間 t における単位量あたりの生産費
a	: 最初の単位量の生産費
CumProd_t	: 時間 t における累積生産量
pr_{LBD}	: 経験による学習に伴う進歩率
KS_t	: 時間 t における技術的知識ストック
pr_{LBS}	: 研究開発に伴う進歩率
σ	: 技術の陳腐化率
RD_{t-x}	: 時間 $t-x$ における研究開発投資額
x	: 研究開発投資から成果が出るまでの期間

経験による学習に伴う進歩率とは、累積生産量が 2 倍に増加した場合に、生産コストがどの程度低下するかを表す。たとえば、経験による学習に伴う進歩率が 0.8 の場合、累積生産量が 2 倍に増加することによって、生産費が 80% に低下することを意味する。また、研究開発に伴う進歩率とは、技術的知識ストックが 2 倍になった場合に、生産コストがどの程度低下するかを表す指標である。経験による学習に伴う進歩率と、研究開発に伴う進歩率の分布を各種発電技術に分けて整理した結果を、図 1、図 2 にそれぞれ示す。

2・3 エネルギー経済モデルでの技術進歩の考慮

エネルギー経済モデルを用いることによって、先端技術の導入可能性を評価できる。エネルギー経済モデルにて技術進歩を考慮する手段としては、技術進歩の外生化と内生化の 2 通りが考えられる。外生化する場合は、毎年一定割合での生産費の低下を想定して、将来の生産費をあらかじめ定めて、解析を進める。一方、内生化する場合は、現在の生産費と進

歩率のみを定めて、将来の解析を進める。このとき、将来の生産費は二因子習熟曲線にもとづき、各時点での導入量及び技術的知識ストックから決定される。内生化の利点は、式(1)、式(2)のように、累積生産量及び技術的知識ストックと生産費の間に成立する関係を直接考慮できることである。そのため、将来の生産コストを定量化することによって、対象技術の導入可能性を評価できる。

2・4 内外の研究動向

海外では、進歩率の算出研究⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾や、技術進歩を内生化したエネルギー経済モデルの開発研究⁽⁶⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾が多く行われている。Kobos らは、米国における太陽光発電技術の進歩率を算出した⁽⁷⁾。Söderholm らは、風力発電技術を対象として、経験による学習のみを考慮した従来の手法に比べて、二因子習熟曲線を用いた方が、より現実的に技術進歩をモデル化できることを明らかにした⁽¹⁰⁾。Kouvaritakis は、二因子習熟曲線を内生化したエネルギー経済モデルを開発し⁽¹¹⁾、研究開発投資の費用対効果が高い技術にのみ研究開発投資が配分される Crowding-out 効果を確認した。Barreto らは、技術の陳腐化を考慮したエネルギー経済モデルを開発し⁽⁶⁾、現時点で割高な将来技術よりも割安な技術に、より多くの研究開発投資が行われたことを明らかにした。

エネルギー変換技術の導入可能性の評価研究も行われている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。Kypreos は、技術進歩が二酸化炭素削減方策に及ぼす影響を解析し⁽¹³⁾、技術進歩を考慮すると CO₂ 排出量削減に伴う経済損失額は約半分に低下することを示し、経験による学習効果が大きいことを明らかにした。国内では、技術進歩を考慮した導入可能性評価の研究は少数であり、技術進歩を内生化したエネルギー経済モデルの開発はほとんど行われていない。本研究では、技術進歩を内生化したモデルを開発し、国内を対象とすることで、現時点で割高な新技術と、すでに技術習熟が進んでいる従来機器との競合を考慮し、技術進歩が与える影響を定量的に示すことができる。

Fig. 1 Distribution of learning-by-doing rate⁽⁹⁾⁽¹²⁾

Fig. 2 Distribution of learning-by-searching rate⁽⁹⁾⁽¹²⁾

3. 解析手法

3・1 技術進歩の内生化モデル

本研究では、技術進歩を内生化したモデルを開発した。具体的には、各エネルギー利用技術に対応した設備容量と、エネルギー供給費用の2つに着目した。

式(1)及び式(2)で表される二因子習熟曲線にもとづき、累積設備容量及び技術的知識ストックの増加を考える。比建設費と運転維持費の低下は、それぞれ式(3)、式(4)で表される。

$$SCC_t = SCC_{init} \cdot CumAdd_t^{\frac{\ln(pr_{SCC,LBD})}{\ln 2}} \cdot KS_t^{\frac{\ln(pr_{SCC,LBS})}{\ln 2}} \quad (3)$$

$$OMC_t = OMC_{init} \cdot CumAdd_t^{\frac{\ln(pr_{OMC,LBD})}{\ln 2}} \cdot KS_t^{\frac{\ln(pr_{OMC,LBS})}{\ln 2}} \quad (4)$$

SCC_t : 第 t 期における比建設費

SCC_{init} : 最初に導入した設備での比建設費

$CumAdd_t$: 第 t 期における累積追加容量

$pr_{SCC,LBD}$: 経験による学習に伴う比建設費の進歩率

$pr_{SCC,LBS}$: 研究開発に伴う比建設費の進歩率

OMC_t : 第 t 期における運転維持費

OMC_{init} : 最初に導入した設備での運転維持費

$pr_{OMC,LBD}$: 経験による学習に伴う運転維持費の進歩率

$pr_{OMC,LBS}$: 研究開発に伴う運転維持費の進歩率

要素技術の進歩にしたがって、同じエネルギー機器でも建設時期によってコストデータが異なる。つまり、新規設備では、最新の要素技術が採用されるが、既設では、機器の寿命に達するまで従来型の要素技術を使い続ける。そのため、同種の技術でも設備ごとに建設費と運転維持費が異なるので、本モデルでは稼働中の全設備における平均的な比建設費(式(5))と運転維持費(式(6))を求める。

$$netSCC_t \cdot Cap_t = \sum_{i=t-life+1}^t (SCC_i \cdot Add_i) \quad (5)$$

$$netOMC_t \cdot Cap_t = \sum_{i=t-life+1}^t (OMC_i \cdot Add_i) \quad (6)$$

$netSCC_t$: 第 t 期における平均的な比建設費

Cap_t : 第 t 期における設備の総容量

$life$: 設備の寿命

Add_i : 第 i 期にて建設した容量

$netOMC_t$: 第 t 期における平均的な運転維持費

機器の建設費、運転維持費、利益など関係は、機器の稼働率と負荷率を考慮すると、式(7)で表される。これから、適正な利益と減価償却を促すに必要なエネルギー供給価格が求められる。

$$Af \cdot Lf \cdot (P_t - netOMC_t - FC_t + Rf) = netSCC_t \quad (7)$$

A_f : 稼働率

L_f : 負荷率

P_t : 第 t 期における平均エネルギー供給価格

FC_t : 第 t 期における燃料費

R_f : 将来得られる利益

3・2 解析対象

既研究⁽⁶⁾で作成したわが国のエネルギーシステム (図 3) にて, 電力部門を対象とする. 図中の灰色の枠内に示した LNG 複合火力(NGCC), 石炭ガス化複合火力(IGCC), 超々臨界圧微粉炭火力(USC Coal)の 3 種の火力発電技術について, CCS システムの導入を想定する.

CCS システムとして, 発電所で CO₂ を分離回収した後, 陸域あるいは海域のパイプラインを通して, 帯水層へ圧入するものを想定する. さらに, 発電所で CO₂ を分離回収した後, CO₂ 輸送船にて海洋へ輸送して希釈船に積み替え, 海洋中深層に希釈するものも想定する (図 4). なお, CO₂ 分離回収技術として, LNG 複合火力及び超々臨界圧微粉炭火力には, プロセスガスが低圧であっても高い CO₂ 回収効率率が得られる化学吸収法を, IGCC には高圧の場合に有利な物理吸収法を, それぞれ想定する.

技術進歩を考慮するのは, 化学吸収法 CCS 及び物理吸収法 CCS, ガスタービンコンバインドサイクル(GTCC), 風力発電, 太陽光発電の 5 技術である. GTCC は, IGCC と LNG 複合火力に共通する要素技術でもある. ここで, 化学吸収法 CCS は, 超々臨界圧微粉炭火力と LNG 複合火力の両機器の累積追加容量を共有する (図 5). 同様に, GTCC は, IGCC 及び LNG 複合火力の間で累積追加容量を共有する.

Fig. 3 Japan's energy systems model

Fig. 4 Considered CCS systems

Fig. 5 Technical progress of chemical absorption

3・3 ケース設定

CCS システムの導入を想定しない 1 ケースと、CCS システムを導入する 3 ケース、あわせて以下の 4 ケースを考える。導入する場合には、想定する技術進歩の有無とその程度を変えた 3 ケースを設定する。

(A) without (w/o) CCS ケース

IGCC の 2015 年からの導入を想定する。CCS システムの導入は想定しない。

(B) CCS without (w/o) learning ケース

(A) ケースに加えて、CCS システムが 2020 年から導入される場合を想定する。CO₂ 分離回収技術の技術進歩は想定しない。

(C) CCS with (w/) LBD ケース

(B) ケースに加えて、CO₂ 分離回収技術の経験による学習に伴う技術進歩を想定する。

(D) CCS with (w/) LBD&LBS ケース

(C) ケースに加えて、CO₂ 分離回収技術の研究開発に伴う技術進歩を想定する。

3・4 解析条件

部分均衡エネルギー経済モデル META・Net⁽¹⁷⁾に、今回開発した技術進歩の内生化モデルを組み込んで解析した。諸データを順に示す。

表 1 は、資源価格の設定である。資源価格の年ごとの上昇率は、毎年一定の割合で資源価格が上昇するという仮定のもと、IEA の予測値⁽¹⁸⁾を回帰分析して定めた。

Table 1 Resource price setting

	Starting price [10 ⁻⁶ USD (2004)/kJ] ⁽²⁴⁾	Annual price growth rate [1/year] ⁽¹⁸⁾
Petroleum	4.6	0.019
Gas	4.3	0.009
Coal	1.5	0.014

Table 2 Cost and performance of generation technologies

Technology	Site	SCC	OMC	Net efficiency [%]
		[10 ³ USD (2004)/kW]	[10 ⁻⁶ USD (2004)/kJ]	
IGCC w/o CCS ^{(25),(28)}	n.a.	3.3	3.0	40.5
IGCC w/ CCS ^{(19),(25),(30)}	Onshore	4.8	4.9	34.7
	Offshore	5.3	5.3	34.7
	Sea	4.9	5.0	34.7
USC Coal w/o CCS ^{(27),(28)}	n.a.	2.8	2.7	39.3
USC Coal w/ CCS ^{(19),(26),(30)}	Onshore	6.1	5.3	26.9
	Offshore	6.5	8.2	26.9
	Sea	6.0	10.5	26.9
NGCC w/o CCS ^{(27),(28)}	n.a.	1.5	1.5	47.4
NGCC w/ CCS ^{(19),(26),(30)}	Onshore	3.6	3.1	41.0
	Offshore	3.8	3.2	41.0
	Sea	3.6	3.1	41.0

(a) Technical progress by learning-by-doing⁽¹⁶⁾⁽¹⁹⁾ (b) Technical progress by learning-by-searching⁽¹⁶⁾⁽¹⁹⁾

Fig. 6 Two-factor learning curves on chemical absorption

次に、CCS システム導入を想定する発電技術の比建設費、運転維持費、送電端発電効率を表 2 に示す。これらは、日本及び米国のデータをもとに、CO₂ 分離回収設備及び昇圧設備の導入による比建設費の増加割合、運転維持費の増加割合、送電端発電効率の低下割合が日米でそれぞれ等しいと仮定した。CO₂ の輸送条件として圧力 10 MPa 及び温度 293 K、貯留条件として年間圧入量 0.3 Mt-CO₂/year-well とする。設備寿命として、発電所は 30 年、CO₂ 分離回収設備は 15 年、パイプラインおよび圧入設備は 20 年、CO₂ 輸送船及び希釈船は 25 年とした。また、排ガスに含まれる CO₂ のうち、90%が CO₂ 分離回収技術によって回収されるとした。

次に、化学吸収法、物理吸収法、GTCC、風力発電、太陽光発電について、経験による学習に伴う進歩率と、研究開発に伴う進歩率を、実績値の回帰分析を通して設定する。RITE⁽¹⁹⁾等データをもとに、化学吸収法について回帰分析した結果を図 6 に示す。データ不足のため、政府による研究開発投資のみを考慮した。また、導入実績のない物理吸収法については、化学吸収法と同一と仮定する。

GTCC、風力発電、太陽光発電については、比建設費と運転維持費の進歩率が同一と仮定する。化学吸収法、物理吸収法、GTCC、風力発電については、陳腐化率を 0.1/year、研究開発投資から成果が出るまでの期間を 3 年に設定する⁽²¹⁾。太陽光発電は、陳腐化率を 0.203 /year、研究開発投資から成果が出るまでの期間を 3 年と設定する⁽²²⁾。さらに、NEDO⁽²⁰⁾等データから定めた、1974 年以降の政府による研究開発投資額(図 7)を参照して、年間の研究開発投資額を決定する。ケースごとの進歩率と年間の研究開発投資額を表 3 に示す。

Fig. 7 Governmental R&D investment in Japan^{(20), (23)}

Table 3 Progress rate and governmental R&D investment setting^{(19)-(23), (28), (31)-(34)}

Case	Technology	Learning-by-doing rate [-]		Learning-by-searching rate [-]		Annual R&D investment [10 ⁶ USD (2004)/year]
		SCC	OMC	SCC	OMC	
w/o CCS	Chemical absorption					
	Physical absorption					
	GTCC	0.86	0.86	0.90	0.90	5
	Wind	0.92	0.92	0.80	0.80	9
	PV	0.88	0.88	0.79	0.79	53
CCS w/o learning	Chemical absorption					
	Physical absorption					
	GTCC	0.86	0.86	0.90	0.90	5
	Wind	0.92	0.92	0.80	0.80	9
	PV	0.88	0.88	0.79	0.79	53
CCS w/ LBD	Chemical absorption	0.86	0.88			
	Physical absorption	0.86	0.88			
	GTCC	0.86	0.86	0.90	0.90	5
	Wind	0.92	0.92	0.80	0.80	9
	PV	0.88	0.88	0.79	0.79	53
CCS w/ LBD&LBS	Chemical absorption	0.86	0.88	0.99	0.94	3
	Physical absorption	0.86	0.88	0.99	0.94	1
	GTCC	0.86	0.86	0.90	0.90	5
	Wind	0.92	0.92	0.80	0.80	9
	PV	0.88	0.88	0.79	0.79	53

解析は、2006 年から 2050 年まで 4 年刻みで行うこととし、全解析期間を通して割引率を 2% に設定した。原子力発電は、現在の設備容量が将来も維持されるものと考えた。

4. 解析結果及び考察

技術進歩を内生化したエネルギー経済モデルを、わが国の電力市場に応用した解析結果を示す。各年次でのエネルギー市場での均衡解を求め、それを将来年次まで延長し、いわゆるダイナミックモデルの解を求めた。この解析解にもとづいて、CCS システムの導入可能性について各ケースの将来の発電構成の変化から検討した。

4・1 発電構成の推移

はじめに、w/o CCS ケースと CCS w/ LBD&LBS ケースの発電構成を図 8 (a)(b) に示す。CCS を導入しない w/o CCS ケースでは、IGCC の発電量は 2015 年の導入以降増加して、2050 年には全体の 26% を占める。LNG 複合火力の発電量は、IGCC の導入に伴って低下する。また、超々臨界圧微粉炭火力の発電量は微増して、2050 年には総発電量の 18% に達する。風力など再生可能エネルギー利用は、徐々に増加して 2050 年には 2.2% に達する。CCS システムに経験および研究開発の技術進歩を適用した CCS w/ LBD&LBS ケースでは、CCS システム導入に伴う平均発電単価の上昇によって、モデル内の価格弾力性のパラメータが作用して、w/o CCS ケースに比べて総発電量が 4% 減少する。総発電量の減少に伴って、LNG 複合火力のシェアは低下するが、IGCC 及び超々臨界圧微粉炭火力のシェアはほぼ一定となる。CCS を付設した火力発電が風力発電を代替することによって、再生可能エネルギー利用のシェアは低下する。CCS システムを含む発電技術は、2050 年に全体の 12.3% を占める。このうち、最も発電量が多いのは物理吸収法を採用し

(a) w/o CCS case

(b) CCS w/ LBD&LBS case

Fig 8 Changes in electricity generation mix

Fig 9 Impact of technical progress on generation cost

Fig 10 Impact of technical progress on generation mix

たIGCCで、54%を占める。このようにCCSが発電構成でのシェアを増加させた理由は、技術進歩にしたがって競合する発電機器とのコスト差が減少したこと、本エネルギー経済モデルの特性として、価格が若干割高であっても市場の価格感応度にもとづいて競合機器との価格差に応じた導入シェアが得られるためである。

4・2 発電単価に技術進歩が及ぼす影響

技術進歩が発電単価に及ぼす影響について、CCSを付設した3種の火力発電を対象にして、2050年における発電単価を図9に示す。

経験による学習を考慮するCCS w/LBDケースに着目すると、化学吸収法利用の発電技術による発電単価が、物理吸収法利用のIGCCと比較して大きく低下する。これは、化学吸収法の方が建設費及び運転維持費が割高な分、技術進歩の効果が大きいためである。次に、経験および研究開発の技術進歩を適用したCCS w/LBD&LBSケースに着目すると、CCS w/LBDケースと比較して、発電単価の低下はわずかであり、物理吸収法と化学吸収法にて同程度であった。これは、経験による学習によってすでに発電単価が下がっていて、それ以上は下がる余地が少なかったためと考えられる。

4・3 発電構成に技術進歩が及ぼす影響

技術進歩が、発電構成に及ぼす影響について述べる。2050年における発電構成の各ケースの比較を図10に示す。

CO₂分離回収技術の進歩を考慮しないCCS w/o learningケースでは、CCSを付設した火力発電の発電量は、全体の8.8%にとどまる。このうち、CCS付設火力発電におけるIGCCのシェアは58%である。w/o CCSケースと比較して、

ガス火力の割合が低下している。これは、CCS システムの導入によって、LNG 複合火力の発電単価が特に上昇したためである。再生可能エネルギー利用の占める割合は w/o CCS と同等であった。

CCS w/ LBD ケースでは、CCS を付設した火力発電の発電量は 11.9% に増加する。このうち、CCS 付設火力発電における IGCC のシェアは 55% に低下する。これは、技術進歩に伴って化学吸収法利用の発電単価が大きく低下して、物理吸収法に比べて化学吸収法利用の発電量が増加したためである。総発電量に占めるガス火力の割合は、CCS w/o learning ケースから微増した。技術進歩に伴う発電単価の低下によって、LNG 複合火力の発電量が増加したためである。再生可能エネルギー利用の占める割合は w/o CCS と同等であった。

CCS w/ LBD&LBS ケースでは、CCS を付設した火力発電による発電量は 12.3% に達する。このうち、CCS 付設火力発電における IGCC のシェアは 54% に低下する。総発電量に占めるガス火力の割合はさらに増加するが、w/o CCS ケースと比較するとガス火力の割合は小さい。また、ピークロードとミドルロードにて、CCS を付設した火力発電が風力発電を一部代替していることがわかる。

4・4 CO₂ 排出量に技術進歩が及ぼす影響

CO₂ 排出量に技術進歩が及ぼす影響について述べる。2050 年における各ケースの CO₂ 排出量の比較を図 11 に示す。

CCS w/o learning ケースでは、CCS システムの導入によって、w/o CCS ケースに比べて CO₂ 排出量は 11.6% 削減された。IGCC にて CCS 付設が増えたことで、特に石炭由来の CO₂ 排出量が大きく削減された。

CCS w/ LBD ケースでは、CO₂ 排出量は 15.4% 削減された。CCS w/o learning ケースと比較して CCS を付設した火力発電の導入が進んだほか、総発電量に占めるガス火力の割合が微増したためである。

Fig 11 Impact of technical progress on carbon emissions

Fig 12 Impact of technical progress on total systems cost

CCS w/ LBD&LBS ケースでは、CCS を付設した火力発電の導入がさらに進んだことによって、CO₂排出量は 17.1% 削減された。CCS w/ LBD ケースと比較して、総発電量に占めるガス火力の割合は高まったが、再生可能エネルギー利用の割合が低下した。そのため、ガス火力のシェア増加は CO₂排出量にほとんど影響しなかった。

4・5 システム総費用に技術進歩が及ぼす影響

各ケースのシステム総費用の比較を図 12 に示す。技術進歩の考慮の有無にかかわらず、CCS システムの導入によって、システム総費用は 3.1% 増加した。CCS を付設した火力発電の発電単価は、技術進歩が進んでも依然として CCS なしの発電単価に比べて割高なためである。研究開発の技術進歩を考慮した場合のシステム総費用は、研究開発を考慮しない場合に比べて 5.9×10^9 USD (2004) 削減し、研究開発投資総額の現在価値 1.25×10^8 USD (2004) を大きく上回った。

4・6 進歩率変化による感度分析

企業における研究開発投資やスピルオーバーなどによって、進歩率は変化する可能性がある。そこで、経験による学習に伴う進歩率、研究開発に伴う進歩率をそれぞれ変化させて解析を行った。

はじめに、経験による学習に伴う進歩率を変化させた場合の CO₂排出量の変化を図 13 に示す。CO₂排出量は、経験による学習に伴う進歩率とともに低下して、進歩率が解析条件で示した値の 0.4 倍となるケースでは、w/o CCS ケースと比較して CO₂排出量は 21.5% 減少する。特に化学吸収法の技術進歩及び導入が進んだほか、それに伴いガス火力の割合が上昇したためである。経験による学習に伴う進歩率が 0.3 倍以下のケースでは、CO₂排出の削減量は 21.5% でほぼ一定となる。経験による学習に伴う進歩率が 0.4 倍のケースにて技術進歩が十分に進み、それ以下の進歩率では発電単価がそれほど変化しないためである。

Fig 13 Impact of learning-by-learning rate change on carbon emissions

Fig 14 Impact of learning-by-searching rate change on carbon emissions

次に、研究開発に伴う進歩率を変化させた場合の CO₂ 排出量を図 14 に示す。経験による学習に伴う進歩率を変化させた場合と同様に、研究開発に伴う進歩率の向上と共に CO₂ 排出量は低下した。また、経験による学習に伴う進歩率を変化させた場合と比較して、化学吸収法が比較的多く導入された。研究開発に伴う進歩率が 0.5 倍となるケースでは、CO₂ 排出量を 21.3%削減可能となった。進歩率が 0.4 倍以下では、CO₂ 排出の削減量は 21.3%でほぼ一定となった。

5. 結言

技術進歩を内生化したエネルギー経済モデルを開発した。技術進歩を推し進める要因として、経験による学習と研究開発の二要因を考慮した。このモデルを、わが国の電力部門に適用して、火力発電からの二酸化炭素排出量の大幅な削減を可能とする CCS システムの導入可能性を評価した。解析結果から以下のことが明らかになった。

- 技術進歩を考慮することによって、CCS システムの経済性は大きく向上する。物理吸収法利用の IGCC と比較して、化学吸収法利用の LNG 複合火力と超々臨界圧微粉炭火力の発電単価が、大きく低下した。経験による学習の効果が大きいと考えられる。
- 技術進歩は、CCS を付設した火力発電の発電シェアを上昇させる。2050 年における総発電量のうち、CCS を付設した火力発電のシェアは 12.3%に増加して、技術進歩を考慮しない場合の 1.4 倍に達した。経験による学習の影響が大きいと考えられる。
- 技術進歩は、電力部門からの CO₂ 排出量を削減する。CO₂ 排出の削減量は、技術進歩を考慮しない場合と比較して、1.5 倍に増加した。2050 年には、CCS を付設した火力発電の導入によって CO₂ 排出量の 17.1%を削減可能という結果を得た。経験による学習の影響が大きいと考えられる。
- 技術進歩の考慮の有無にかかわらず、CCS を付設した火力発電の導入に伴って、システム総費用は 3.1%増加した。
- 今後、さらなる研究開発投資やスピルオーバーなどによって、CO₂ 分離回収設備の比建設費と運転維持費が大きく低下すれば、CCS システムを導入しない場合と比較して CO₂ 排出量を最大で 21.5%削減できる可能性がある。

本研究では、技術進歩を推し進める要因のうち、経験による学習と研究開発に着目し、その影響を評価した。今回考慮しなかったスピルオーバーは、将来技術の経済性に大きな影響を及ぼす可能性があるため、スピルオーバーの影響を定量化する手法を構築するとともに、スピルオーバーを内生化したエネルギー経済モデルを開発することによって、より精度の高い導入可能性評価が可能になると考えられる。

解析の前提条件として、研究開発投資額は解析期間を通じて一定と仮定したが、実際には成果達成の度合いによって変化する。今後は、競争技術への研究開発投資額の配分をモデル化することによって、より現実的な技術評価が可能になると思われる。

なお、二因子習熟曲線の算定には、累積導入量と政府による研究開発投資額のみを用いており、企業による研究開発投資はデータ不足から考慮していない。今後、企業における研究開発投資額の綿密な調査を通して、より正確な二因子習熟曲線を算出する必要がある。

CCS システムの技術進歩には、政策に伴う CCS システムの導入量変化なども影響する。たとえば、炭素税の課税によって CCS システムの導入が進めば、経験による学習に伴う技術進歩が進み、その結果としてさらに導入が促進されることも予想される。今後、このようなエネルギー政策が技術進歩に及ぼす影響も含めて、技術の導入可能性を評価することも重要であろう。

本研究の応用として、CO₂ 排出量の削減目標を前提として、それに見合う経済的な導入設備規模を論じる展開が考えられる。ある目的を達成するための研究開発投資の対象技術、波及効果、投資のタイミングと適正規模などを、モデル解析によって事前に複数のシナリオから選択して費用効果を高めるアプローチ手法は、今後ますますその役割の発揮が期待できる。

文 献

- (1) 渡辺利夫, 佐々木郷里, 開発経済学辞典, 95, 弘文堂, (2004).
- (2) 金森久雄 et.al; 経済辞典, 207, 有斐閣, (1999).

- (3) Harmon C., “Experience curves of photovoltaic technology”, International institute for applied systems analysis (IIASA) report, IR-00-014, (2000).
- (4) Intergovernmental panel on climate change (IPCC), *Contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, (2007).
- (5) 大阪市立大学経済研究所, 経済学辞典 第 3 版, 岩波書店, (1998).
- (6) Barreto L. et.al, “Endogenizing R&D and market experience in the ‘Bottom-up’ energy-systems ERIIS model”, *Technovation*, Vol. 24 (2004), pp. 615-624.
- (7) Kobos H.P. et.al, “Technological learning and renewable energy costs: implications for US renewable energy policy”, *Energy Policy*, Vol. 34 (2006), pp. 1645-1658.
- (8) Jamasb T., “Technological change theory and learning curves: Patterns of progress in electricity generation technologies”, *The Energy Journal*, Vol. 28 (2007), pp. 51-71.
- (9) Klassen G. et.al, *Public R&D and Innovation: The case of wind energy in Denmark, Germany and the United Kingdom*, IIASA interim report, IR-03-011, (2003).
- (10) Kahouli-Brahmi S., “Technological learning in energy-environment-economy modeling: A survey”, *Energy Policy*, Vol. 36 (2008), pp. 138-162.
- (11) Söderholm P. et.al, “Empirical challenges in the use of learning curves for assessing the economic prospects of renewable energy technologies”, *Renewable Energy*, Vol. 32 (2007), pp. 2559-2578.
- (12) Messner S., “Endogenized technological learning in an energy systems model”, *Journal of Evolutionary Economics*, Vol. 7 (1997), pp. 291-313.
- (13) Kouvaritakis N. et.al, “Modeling energy technology dynamics: methodology for adaptive expectations models with learning-by-doing and learning-by-searching”, *International Journal of Global Energy Issues*, Vol. 14 (2000), pp. 104-115.
- (14) Kypreos S., “A MERGE model with endogenous technological change and the cost of carbon stabilization”, *Energy Policy*, Vol. 35 (2007), pp. 5327-5336.
- (15) Institute of Communication and Computer Systems of National Technical University of Athens et.al, *Systems analysis for progress and innovation in energy technologies*, Final technical report, (2005).
- (16) Nakata T., “Energy-economic models and the environment”, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 30 (2004), pp. 417-475.
- (17) Lamont A., *User’s guide to the META-Net economic modeling system version 1.2*, Lawrence Livermore National Laboratory report, UCRL-ID-122511 (1994).
- (18) International energy agency (IEA), *World energy outlook* (2007).
- (19) Research institute of innovative technology for the Earth (RITE), *Working papers on carbon capture and sequestration* (2002-2006).
- (20) NEDO, CO₂ 削減等地球環境産業技術研究開発事業 (うち地球環境産業技術に関する先導研究) 事後評価報告書, (2006).
- (21) Watanabe C., “Systems option for sustainable development – effect and limit of the Ministry of International Trade and Industry’s efforts to substitute technology for the energy”, *Research Policy*, Vol. 28 (1999), pp. 719-749.
- (22) Watanabe C. et. al., “Industrial dynamism and the creation of a “virtuous cycle” between R&D, market growth and price reduction – The case of photovoltaic power generation (PV) development in Japan”, *Technovation*, Vol. 20 (2000), pp. 299-312.
- (23) IEA, R&D statics, <http://wds.iea.org/> (Last accessed 2010.01.19).
- (24) Energy data and modeling center (EDMC), *Handbook of energy-economic statistics*, (2008).
- (25) クリーンコールパワー研究所, 石炭ガス化複合発電(IGCC)実証プラント開発の動向, <http://www.ccpower.co.jp/ref/fy2001/gijutu.pdf> (Last accessed 2010.01.19), (2001).
- (26) Department of energy (DOE), *Cost and performance baseline for fossil energy plants*, (2007).
- (27) Federation of electric power companies, *Comparison of generation cost among generation technologies*, (2004).
- (28) Nuclear energy agency (NEA), *Projected cost of generating electricity*, (1989, 1998, 2005).
- (29) True W., “Special report pipeline economics”, *Oil & Gas journal*, Vol. 100, No.38 (2002), pp. 52-75

- (30) IEA, *Ship transport of CO₂, Report number PH4/30 July 2004*, (2004).
 - (31) 日刊電気通信社, 電力新設備要覧, 日刊電気通信社, (1988, 1990, 2001).
 - (32) NEDO, 日本における風力発電設備・導入実績, <http://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/index.html> (Last accessed 2010.01.22), (2009).
 - (33) 佐藤健実, 中田俊彦, “再生可能エネルギー利用技術の習熟曲線:風力発電建設費のケーススタディ”, エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, Vol. 21 (2005), pp.163-166.
 - (34) NEDO, 新エネルギー関連データ, <http://www.nedo.go.jp/nedata/index.html> (Last accessed 2010.01.19), (2005).
-