

水素燃料の普及と温暖化対策

玉置 哲也¹・馬奈木 俊介²

¹正会員 九州大学特任講師 工学研究院 (〒 819-0395 福岡市西区元岡 744)
E-mail: tamaki@doc.kyushu-u.ac.jp

²正会員 九州大学教授 工学研究院 (〒 819-0395 福岡市西区元岡 744)

この研究では、水素燃料が普及した際の経済的な影響について考察を行う。燃料電池車への期待が集まる中、交通産業以外にも CO₂ を排出しないエネルギーとしての利用にも大きな関心が寄せられている。水素燃料は 2 次燃料であるものの、エネルギー効率の向上や CO₂ 削減コストの低下に大きく貢献できる可能性を秘めている。本研究では、水素燃料が普及し、エネルギー効率の向上や CO₂ 削減コストの低下がもたらされた場合の効果について、地球温暖化による影響を評価する総合的なモデルを用いて分析を行う。

Key Words: global warming, climate change, the RICE model, Hydrogen energy, backstop technology

1. はじめに

(1) 水素燃料社会

地球温暖化対策に迫られている昨今、新たなエネルギー源として水素に注目が集められている。水素エネルギーは以前より、その可能性に対して大きな期待が寄せられていたものの、一般的な普及にまでは達していない。水素エネルギーは水素と酸素を燃焼させて生み出されるエネルギーであるが、排出されるのは水だけであり、硫黄酸化物や窒素酸化物だけでなく二酸化炭素も排出しない。世界的に見て電力に用いられるエネルギーは全体の 20% 程度であり、残りの約 80% は動力や熱源などに利用されている。そして、その動力や熱源に利用されているエネルギーの大部分が化石燃料によるものである。

水素エネルギーは 1 次エネルギーではないため、水素を生成するためにエネルギーが必要となる。そのため、もとをたどれば石油や天然ガスなどの化石燃料から生成されのが現状であり、完全にクリーンなエネルギーとして水素を用いるためには、太陽熱などの再生可能エネルギーから水素を生成する必要がある。しかしながら、電気は貯蔵や超距離輸送に不便であることに比べると、水素燃料として電力を変換させることで多大な利点があると言える。近年では、トヨタ自動車が開発した燃料電池車「ミライ」が市販され、パナソニックにより開発された家庭用燃料電池「エネファーム」も 2008 年より生産が行われている。また鉄鋼業界においても水素還元製鉄技術の開発がすすめられ、徐々に実用化され始めている。

地球温暖化は国際的な問題として、2015 年にはパリにおいて COP21 が開催され、各国の今後の目標が発表

された。エネルギー源を化石燃料から再生可能エネルギーへと移行させることに加え、効率よくエネルギーを利用していくためにも水素エネルギーの利用可能性は高いと言えるだろう。実際に水素燃料を活用するためには、課題も多く残されているものの¹⁾、水素燃料が実社会で広く利用されるようになれば、大きく温暖化問題に貢献できるであろう。例えば、Khalid et al.²⁾ は再生可能エネルギーと燃料電池を組み合わせることで、効率の高いエネルギーシステムを提案している。本研究では、このような水素エネルギー技術によって CO₂ 排出量の削減やエネルギー効率化が図られた場合の影響について RICE (Regional integrated model of climate and the economy) モデルを用いて分析を行い、その結果をもとに考察を行う。

(2) 総合的な気候変動評価モデル

地球温暖化による影響を評価する総合的なモデル (IAMs: Integrated assessment models) は多くの研究者によって進められてきた³⁾⁴⁾。動学最適化をベースとしたモデルをはじめ、一般均衡理論や部分均理論を用いたモデルやシミュレーションを駆使したモデルなど、様々なモデルが開発されている。本研究では、その中でも RICE モデルを用いて分析を行う。RICE モデルは Yale 大学の Nordhaus によって提案された DICE モデルを地域分析が可能となるように拡張したモデルである。DICE モデルのように動学最適化を用いたモデルは、シンプルではあるものの理論的に明確であり、大まかな方向性を示すためには有用なモデルである。DICE モデルに対しては、その仮定の甘さ⁵⁾ やロバスト性⁶⁾ に対する批判が行われているものの、AD-DICE モデル⁷⁾ をはじめとした数々のモデル⁸⁾⁹⁾ の基礎として利用されている。例

えば、AD-DICE モデル⁷⁾では、気候変動に対する投資として、軽減策だけでなく適応策に対しても考慮したモデルへと改良を加えており、ENTICE モデル^{10),11)}では、技術の向上が内生化したモデルを検討している。

動学最適化を用いたモデルでは、世界全体を一つの経済主体として取り扱うグローバルなモデルを主としているが、RICE モデルでは、複数の地域の特性を踏まえたうえで最適化を図ることができる。本研究では、この RICE モデルを用いることで、水素燃料の普及による影響を推計する。

2. 本研究で用いる RICE モデル

本章では、RICE モデルについて説明を行う。RICE モデルはラムゼーモデルがベースとなっているため、各時点における消費と投資を決定し効用を最大化させるものである。地域 i の効用を U_i とし、最大化する関数を W とすると、

$$W = \sum_i \sum_t \varphi_{i,t} U_i [c_i(t), L_i(t)] (1 + \rho)^{-t} \quad (1a)$$

$$U_i [c_i(t), L_i(t)] = L_i(t) \frac{[c_i(t)]^{1-\alpha}}{1-\alpha}. \quad (1b)$$

ただし、 $L_i(t)$ は t 期の地域 i の全人口 (人)、 $c_i(t)$ は t 期の地域 i の一人当たり消費額 (\$) である。また、 ρ は割引率、 α は消費に関する限界効用の弾力性パラメータであり、 φ_i は根岸加重である。(1) を最大化させるにあたり、経済的な条件式と環境に関する条件式を与えている。経済的な条件式は以下のとおりである。 t 期の地域 i の技術および資本 (\$) を $A_i(t)$ 、 $K_i(t)$ としたとき、生産額 (\$) $Q_i(t)$ は

$$Q_i(t) = Q_{net,i}(t) - \Lambda_i(t) A_i(t) K_i(t)^\gamma L_i(t)^{1-\gamma} \quad (2)$$

$$Q_{net,i}(t) = A_i(t) K_i(t)^\gamma L_i(t)^{1-\gamma} [1 - \Omega_i(t)] \quad (3)$$

と与えられる。式 (2) の第一項は、式 (3) に示されるように、Cobb-Douglas 型の生産関数に、温暖化による被害率 $\Omega_i(t)$ が加味されており、式 (2) の第二項は CO_2 排出量制限による生産低下率 $\Lambda_i(t)$ によって生じる減少量を示している。これらは

$$\Lambda_i(t) = \theta_{1,i}(t) p_i(t) \mu_i(t)^{\theta_{2,i}} \quad (4)$$

$$\Omega_i(t) = \psi_{1,i} T_{AT}(t) + \psi_{2,i} [T_{AT}(t)]^2 \quad (5)$$

で定義されている。ここで、 $\theta_{1,i}(t)$ 、 $\theta_{2,i}$ 、 $\psi_{1,i}$ および $\psi_{2,i}$ は調整パラメータであり、 $\mu_i(t)$ は排出量コントロール率を示す。これは、 $0 \leq \mu_i(t) \leq 1$ であり、1 に近づくほど CO_2 排出量を抑えることが可能になるが、その分のコストが増加し、生産低下率が低下することが式 (4) からわかる。 T_{AT} は大気温の平均上昇量、 $p_i(t)$ はバックストップ技術である。また、 T_{AT} が上昇すれば、温暖化による被害率 $\Omega(t)$ が連動して大きくなる構造に

なっている。そして、生産額 $Q_i(t)$ は、その期の全人口の消費額 $C_i(t) [= c_i(t)L_i(t)]$ と投資 (\$) $I_i(t)$ として、それらの最適量が決定される。つまり、

$$Q_i(t) = C_i(t) + I_i(t). \quad (6)$$

t 期の資本は投資 $I_i(t)$ を用いて、

$$K_i(t) = I_i(t) - \delta_K K_i(t-1)$$

で表されるものとし、産業は特に区別しない。技術 $A_i(t)$ 、全人口 $L_i(t)$ は外生変数として与えられる。

一方、環境に関する条件式として、大気循環モデルが与えられている。大気、海洋浅層部、海洋深層部の 3 か所を二酸化炭素が循環すると仮定しており、それぞれの貯留量を $M_{AT}(t)$ 、 $M_{UP}(t)$ 、 $M_{LO}(t)$ とすると、

$$M_{AT}(t) = E(t) + \phi_{11} M_{AT}(t-1) + \phi_{21} M_{UP}(t-1) \quad (7a)$$

$$M_{UP}(t) = \phi_{12} M_{AT}(t-1) + \phi_{22} M_{UP}(t-1) + \phi_{32} M_{LO}(t-1) \quad (7b)$$

$$M_{LO}(t) = \phi_{23} M_{UP}(t-1) + \phi_{33} M_{LO}(t-1) \quad (7c)$$

となる。 $\phi_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$ は循環パラメータであり、また、 $E_i(t)$ は t 期の地域 i の人為的な排出量を示しており、以下の式で表される。

$$E_i(t) = E_{Ind,i}(t) + E_{Land,i}(t) \quad (8)$$

$$E_{Ind,i}(t) = \sigma_i(t) [1 - \mu_i(t)] A_i(t) K_i(t)^\gamma L_i(t)^{1-\gamma} \quad (9)$$

ここで、 $\sigma_i(t)$ は調整パラメータである。式 (8) に含まれる土地利用による排出量 $E_{Land,i}(t)$ は外生変数であり、 $E_{Ind,i}(t)$ は生産活動による排出量を示している。RICE モデルでは、大気温と海水温の平均上昇量 $T_{AT}(t)$ 、 $T_{OC}(t)$ を用いて、大気や海中の温度変化を表している。

$$T_{AT}(t) = T_{AT}(t-1) + \xi_1 \{F(t) - \xi_2 T_{AT}(t-1) - \xi_3 [T_{AT}(t-1) - T_{OC}(t-1)]\} \quad (10a)$$

$$T_{OC}(t) = T_{OC}(t-1) + \xi_4 [T_{AT}(t-1) - T_{OC}(t-1)] \quad (10b)$$

となる。ここで、 $\xi_i(i = 1, 2, 3, 4)$ は調整パラメータであり、放射強制力 $F(t)$ は

$$F(t) = \eta \log_2 \frac{M_{AT}(t)}{M_{AT}(1750)} + F_{EX}(t) \quad (11)$$

と仮定している。 η はパラメータ、 $F_{EX}(t)$ は外生変数である。

以上が RICE モデルの基本となる構造である。基礎となる DICE モデルについては、最近では DICE2013R¹²⁾ としてマニュアル公開されており、Nordhaus¹³⁾ において 2016 年モデルが利用されている。本研究では、この Nordhaus¹³⁾ で利用されているパラメータをもとに RICE モデルのパラメータの調整・推計を行っている。

表-1 本研究で用いるシナリオ

Scenario	$gback$
0	0.025
1	0.05
2	0.1
3	0.2

3. 分析シナリオ及び結果

まず、RICE モデルを分析するにあたり、地域分類はアメリカ、EU、日本、中国、その他アジア、EU 以外のヨーロッパ及びアフリカ、その他諸国としている。また、1 期あたり 5 年とし 60 期後 (300 年後) までを考えて、最適化計算を行っている。本研究では、水素エネルギーが普及することにより、バックストップ技術コストの低下やエネルギー利用の効率性が向上する場合を想定する。式 (4) からわかるように、外生的に与えられるバックストップ技術コスト $p_i(t)$ によって生産力の低下率が左右される。ベースとなる DICE モデル 2016) では、2015 年時のコスト $pback = 550\$/tCO_2$ とし、コストの低下率 $gback = 0.025$ とし、

$$p_i(t) = 550 \cdot (1 - 0.025)^{t-1} \quad (12)$$

で表されている。これをベースにして、水素エネルギーが普及によるバックストップ技術コストの低下やエネルギー利用の効率性が促進された場合について推計を行う。まず、単純にコストの低下率が高くなった場合を想定し、その時の影響について調べてみよう。シナリオとして、表-1 を考える。シナリオ 0 は基本となるものであり、シナリオ 1, 2, 3, となるにしたがってコスト低下率が高くなる。つまり、将来のバックストップコストが下がることを意味している。

これらのシナリオをもとに推計を行った結果として、以下のことが分かる。まず将来のバックストップ技術コストが下がることで、 CO_2 削減にかかる費用を抑えることが可能になり、より多くの排出規制を行うことが可能になる。それに伴い、平均気温上昇も抑えることが可能となる。例えばシナリオ 0 に比べて、シナリオ 3 が用いられた場合、2100 年時の平均気温上昇量は約 1 度抑えることができる結果となった。また、社会的炭素費用 (SCC: Social Cost of Carbon) を見てみると図-1、図-2 のような結果が得られる。

SCC とは、 CO_2 を 1t 多く排出した際にかかるコストのことである。図-1 はベースとなるシナリオ 0 の SCC を示しているが、時間が経過するにつれて増加していることが分かる。図-2 では、シナリオ 0 とシナリオ 1, 2, 3 を比較したものであるが、バックストップ技術が

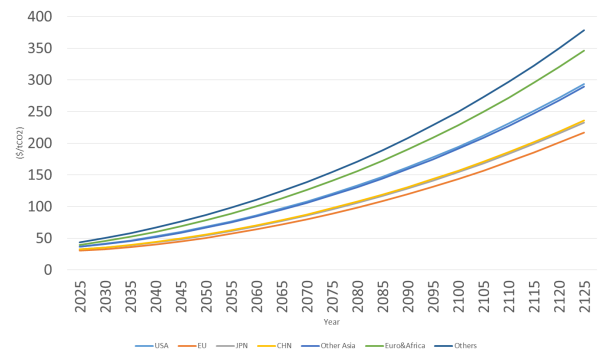


図-1 シナリオ 0 における SCC

低く抑えられる場合には、近い将来は比較的 SCC が低いものの遠い将来になるにつれて SCC が急増することが分かる。特に中国や EU 以外のヨーロッパ・アフリカにおいてその傾向が強いようである。詳細な分析結果については口頭発表時に行う。

参考文献

- 1) Edwards, P. P., Kuznetsov, V. L., David, W. I., and Brandon, N. P.: Hydrogen and fuel cells: towards a sustainable energy future, *Energy policy*, Vol.36, No.12, pp.4356–4362, 2008.
- 2) Khalid, F., Dincer, I., and Rosen, M. A.: Analysis and assessment of an integrated hydrogen energy system, *international journal of hydrogen energy*, Vol.41, No.19, pp.7960–7967, 2016.
- 3) Stanton, E. A., Ackerman, F., and Kartha, S.: Inside the integrated assessment models: Four issues in climate economics, *Climate and Development*, Vol.1, No.2, pp.166–184, 2009.
- 4) Dowlatabadi, H.: Sensitivity of climate change mitigation estimates to assumptions about technical change, *Energy Economics*, Vol.20, No.5, pp.473–493, 1998.
- 5) Kaufmann, R. K.: Assessing the dice model: Uncertainty associated with the emission and retention of greenhouse gases, *Climatic Change*, Vol.35, No.4, pp.435–448, 1997.
- 6) Hu, Z., Cao, J., and Hong, L. J.: Robust simulation of global warming policies using the dice model, *Management Science*, Vol.58, No.12, pp.2190–2206, 2012.
- 7) De Bruin, K. C., Dellink, R. B., and Tol, R. S.: Ad-dice: an implementation of adaptation in the dice model, *Climatic Change*, Vol.95, No.1-2, pp.63–81, 2009.
- 8) Traeger, C. P.: A 4-stated dice: quantitatively addressing uncertainty effects in climate change, *Environmental and Resource Economics*, Vol.59, No.1, pp.1–37, 2014.
- 9) Crost, B. and Traeger, C. P.: Optimal CO_2 mitigation under damage risk valuation, *Nature Climate Change*, Vol.4, No.7, pp.631–636, 2014.
- 10) Popp, D.: Entice: endogenous technological change in the dice model of global warming, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.48, No.1, pp.742–768, 2004.
- 11) Popp, D.: Entice-br: The effects of backstop technology r&d on climate policy models, *Energy Economics*, Vol.28, No.2, pp.188–222, 2006.
- 12) Nordhaus, W. D. and Sztorc, P.: Dice 2013r: Introduction and user's manual, retrieved November, 2013, <http://aida.wss.yale.edu/nordhaus/homepage/>.

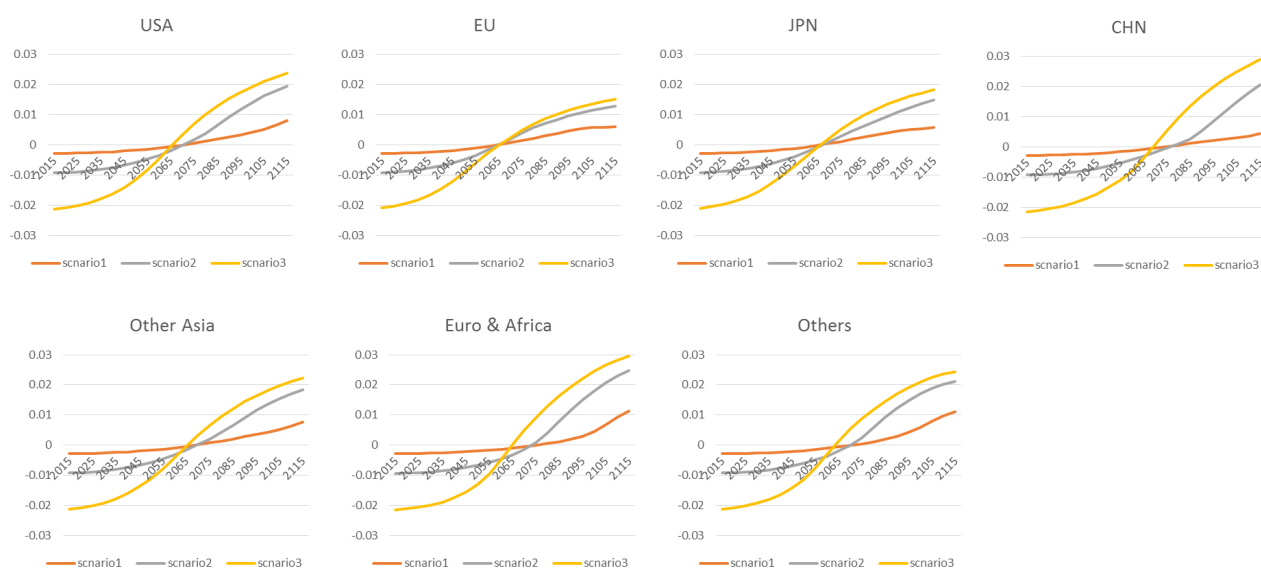


図-2 SCC：シナリオ 1 との比較

- 13) Nordhaus, W. D.: Revisiting the social cost of carbon, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, p. 201609244, 2017.

(2017. 7. 31 受付)