

## システム研究グループ



グループリーダー  
秋元 圭吾

### 【コアメンバー】

主席研究員	友田 利正
主任研究員	和田 謙一
主任研究員	長島美由紀
主任研究員	本間 隆嗣
主任研究員	佐野 史典
主任研究員	小田潤一郎
研究員	林 礼美
研究員	徳重 功子
研究員	有野 洋輔
研究員	シヨアイ・テラニ・ピアンカ

## システム研究グループの研究活動報告

当グループは、システム的な思考、システム的な分析を通して、地球温暖化やエネルギー対応に関する有用なる情報提供を国内外に行っている。本稿では、H26年にシステム研究グループが取り組んだ研究から4つのテーマを紹介する。

### 1. 気候変動の不確実性下における

#### ジオエンジニアリングのオプション価値に関する分析

##### 1.1 はじめに

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第1作業部会の第5次評価報告書は、気候システムへの人間影響は明白であるとしているが、GHG濃度の上昇がどの程度の気温上昇をもたらすのか(気候感度)には大きな不確実性が存在する。

近年、温暖化緩和策(排出削減策)と適応策に加え、太陽放射管理(SRM: Solar Radiation Management)も注目を集めている。SRMはジオエンジニアリングの1手法であり、太陽光を人工的に反射して全球平均気温を低下させる方法(代表的技術は成層圏への硫酸エアロゾル注入)である。SRMは、海洋酸性化の防止に貢献できないが、費用対効果と即効性に優れる対策であると評価されることが多い。ただし、硫酸エアロゾル注入には副作用(酸性雨、オゾン層破壊等)や倫理・政治上の懸念もあるため、SRM実施を所与とする戦略の妥当性には議論の余地がある。そこで、気候変動の不確実性下において、SRM実施を所与とせず、気温上昇が予想よりも大きいと判明したときのみ一定規模で実施されると想定し、SRM戦略をオプションとして保有しておくことの価値を定量的に分析・評価する研究を実施した。その概要について簡単に紹介する。

### 1.2 評価モデルと分析の設定

不確実（学習前）及び確実（学習後）の2段階の意思決定プロセスを想定し、世界エネルギーモデル（DNE21）にSRMオプションを追加した。簡単のため気候感度の真の値は2050年以降に判明すると想定した。表1に示す通り、IPCC第4次評価報告書の気候感度の確率密度関数を基に確率関数を作成し、低位から高位の気候感度に離散確率を与えた。SRMはシナリオ3が生起したときのみ実施するものとし、実施時期は2050年以降に限るとした。さらに倫理・政治・環境リスク面の懸念を考慮し、無制限なSRM実施を抑制するため、硫酸エアロゾル注入量に上限制約（時点あたり0.5℃相当の冷却）を課した。SRM費用想定は、既往研究のうち高位値のUS\$10/kg-Sとした。比較のため、3通りの気温制約（2100年時点、産業革命以前比+2℃、+2.5℃、+3℃）を想定した。

表1 SRMオプションを追加した場合の不確実性3分岐シナリオ

	気候感度 (T2x)	実現確率	SRM
シナリオ1	2℃(低位)	10%	×
シナリオ2	3℃(中位)	71%	×
シナリオ3	4℃(高位)	19%	○

SRMオプションを有する場合（表1）と有しない場合の所与の気温制約下の総システムコスト（1990-2100年）を最小化する排出パスを導出し、中位の気候感度の場合の総コストの比較によりオプション価値を推計した。

### 1.3 SRM保有のエネルギー起源CO<sub>2</sub>排出パスへの影響とオプション価値

+2.0℃目標（2100年時点、産業革命以前比）ケースについては、気候感度4℃といった高い気候感度の可能性が含まれているため、解が得られなかった。

+2.5℃目標ケースの結果を図1に示す。気候感度の不確実性が2050年以降に解消すると仮定しているため、その時点から排出パスが3分岐する。気候感度が大きい程、排出削減は厳しいものとなる。SRMオプションを有しない場合（青線）は、シナリオ3（気候感度T2x=4℃）のように厳しい排出削減シナリオが含まれると、

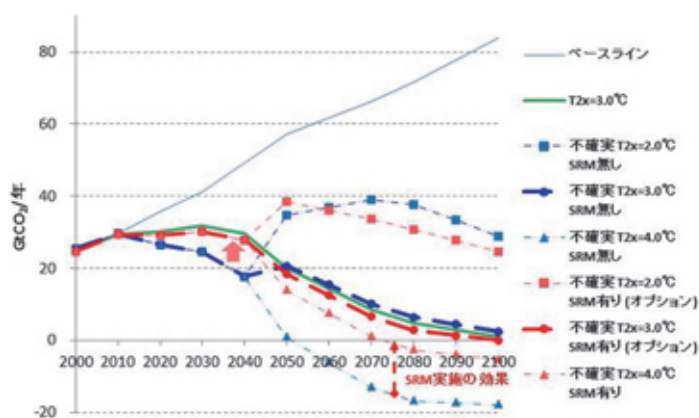


図1 SRMオプション保有が不確実性下のCO<sub>2</sub>排出パスに及ぼす影響 (+2.5℃目標)

短中期（2000-2040年）に厳しい排出削減パスを提示する傾向がある。一方で、SRMオプションを有して、2050年以降にシナリオ3（T2x=4℃）が生起した場合にSRMを実施する場合（赤線）、2050年以降だけでなく、不確実性下（2000-2040年）の短中期の必要削減量にもゆとりが生まれる。このとき、中位の気候感度の排出パス（太い青線と赤線）に注目すると、SRMを保有するならば、気候感度が中位と確定的な場合（緑線）に求められる排出削減と同程度での排出削減が望ましいこととなる。

SRMのオプション価値を、中位の気候感度（不確定 $T2x=3^{\circ}\text{C}$ ）の排出パス（図1の太い青線と赤線）の全期間の総エネルギーシステムコストの差額として定義すると、 $+2.5^{\circ}\text{C}$ 目標時のオプション価値は約45.6兆円（1ドル100円換算）、 $+3^{\circ}\text{C}$ 目標時のそれは約20.1兆円と推計される。なお、 $+2.4^{\circ}\text{C}$ 目標時のオプション価値は約327.3兆円と推計され、気温目標の厳しさに比例してオプション価値は逡増する。

#### 1.4 結論

既往研究では、厳しい排出削減シナリオが含まれると、その実現確率が小さいとしても短中期に厳しい排出削減パスを提示する傾向がある<sup>1)</sup>。しかし、即効性があり比較的費用対効果が高いと見られるSRMのようなオプションを有することで、短中期の緩和策による経済リスクが低下し、長期の研究開発投資や適応策をふまえた総合的なリスク管理戦略に柔軟性が生まれる可能性が示唆される。気候感度について安全サイドを前提に緩和戦略を立案する必要性が小さくなり、気候感度中位値を前提としたような戦略が正当化され得る。

#### 参考文献

1) Akimoto, K.; Decision analyses for energy strategies on global warming issues with an energy systems model of optimization type, Doctoral thesis, (1999).

## 2. 米国による海外石炭火力発電所新設に対する公的融資制限の評価

### 2.1 はじめに

米国は2013年、海外の石炭火力発電所新設に対する公的融資の終了を発表した<sup>1)</sup>。但し代替手段がない最貧国における最高効率の石炭火力技術と、CCS技術を導入する施設は例外としている。米国発表の融資制限の条件下では<sup>2)</sup>、国際復興開発銀行（IBRD）融資適格国及びIBRD・国際開発協会（IDA）の混合融資適格国（IDAブレンド国）に関していえば $\text{CO}_2$ 排出原単位 $500\text{gCO}_2/\text{kWh}$ 以下を満たすCCS付設の石炭火力のみが支援対象となる。

同融資制限の目的は、他の燃料と比べて $\text{CO}_2$ を相対的に多く排出する石炭火力発電の新設を制限し低炭素の発電技術への投資を促進することであるが、先進国及び国際開発金融機関（MDBs）が石炭火力に対する融資を制限することが実効性を伴ったGHG排出削減に貢献するのかが検討する余地がある。たとえ先進国及びMDBsによる石炭火力の融資制限があったとしても途上国の中には自己資金で建設あるいは他の金融機関から融資を得て、安価な低・中効率の石炭火力発電を導入する可能性があり、そうなれば同融資制限による削減効果は限定的もしくは逆効果にもなり兼ねない（このような状況を融資制限による潜在的な抜け道（loophole）と呼ぶ）。

## 2.2 目的と手法

石炭火力発電所の新設に関する制約について、4つのシナリオを想定し、GHG排出量と平均削減費用を推計した。シナリオAは全ての種類の石炭火力の新設が可能である場合を（ベースケース）、シナリオBは全ての国で高効率石炭火力（超々臨界圧発電、先進超々臨界圧発電、石炭ガス化複合発電、石炭ガス化燃料電池複合発電）の新設のみ可能である場合を、シナリオCは米国の公的融資条件となるCCS付設の石炭火力の新設のみを認める場合を想定した。更にloopholeを詳細に表現するため、先進国に関しては米国による国内規制及び先進国による海外公的融資の制限を考慮し、CCS付設の石炭火力のみを認めるシナリオを想定した（シナリオD）。ここで途上国に関しては自己資金で建設あるいは他の金融機関から融資を得ることが可能なこと、そして融資制限の最貧国免除条項を考慮し、低所得国・高所得国及び低所得国は全ての種類の石炭火力を認めるとした。一般に、世界の公的融資支援の適格国であるか否かは受入国の所得に応じて判断されるため、「高所得国（HICs）」、「高所得国（UMICs）」、「低中所得国（LMICs）」及び「低所得国（LICs）」の4つの地域グループに分類した。尚、融資制限の効果を見るために、特段の温暖化対策が無い場合の推計を示す。

## 2.3 分析結果

図2はloopholeに陥るシナリオを含めた2030年時点の世界のGHG排出量と平均削減費用とのシナリオ間比較を示している。新設規制が機能すれば（シナリオC）、ベースライン比で約5Gtの削減が可能となるが、平均削減費用は+\$32/tCO<sub>2</sub>eq.となりシナリオ間で最も高い。しかし、途上国で強力な排出抑制策がとられていない場合、このような高い費用をかけてCCS付設の石炭火力を導入する

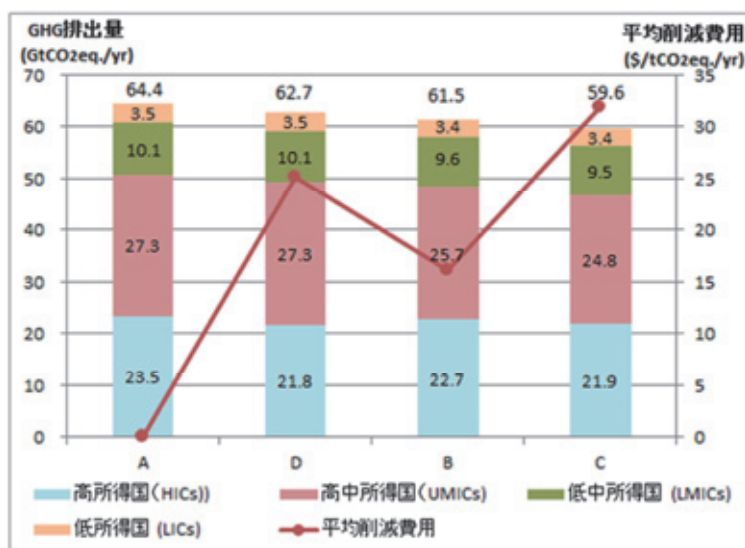


図2 世界のGHG排出量と平均削減費用のシナリオ間比較  
(2030年、特段の温暖化対策が無い場合)

経済インセンティブが低くなるためloopholeが生じる恐れがある。シナリオCを念頭にしても結果としてloopholeに陥る場合がシナリオDである。高効率石炭火力を認めたシナリオBと比較した場合、高所得国の排出量は減少するが、高所得国及び低中所得国の排出量は増加し、loopholeに陥る状況を表し、平均削減費用は高くなる。全ての国に対して高効率石炭火力を認めることはloopholeに陥る場合と比較して、GHG排出量及び平均削減費用の両観点から望ましいことが示唆される。

## 2.4 考察

世界全体で強力な排出抑制策がとられていない状態では（ここでは特段の温暖化対策が無い場合の結果を提示）、CCSを付設しなければならないという途上国への融資制限はloopholeを招き却って世界のCO<sub>2</sub>排出を増大させる恐れがある。高効率石炭火力を認めることでloopholeの誘因を小さくすることが重要であり、高効率石炭火力に対する公的融資を認めるような方向に修正した方が、平均削減費用が低く、実効ある排出削減になると考えられる。

### 参考文献

- 1) Executive office of the president; The president's climate action plan, The White House, Washington (2013).
- 2) U.S. Department of the Treasury; Guidance for U.S. positions on multilateral development banks engaging with developing countries on coal-fired power generation (2013).

## 3. 日本の環境自主行動計画の総括評価

### 3.1 はじめに

1990年を基準とした温室効果ガス削減目標を定めた京都議定書の第1約束期間（2008年～2012年）が終了した。日本は、京都議定書の1990年比6%削減目標を超える8.4%削減を達成したとされる。この目標達成において、中心となったのは経団連を主とした自主行動計画と見られ、自主行動計画における業種毎の排出削減努力についての分析を行った。

### 3.2 経団連環境自主行動計画の経緯と分析

経団連は1996年7月「経団連環境アピール」を発表、1997年6月「経団連環境自主行動計画」を発表した。各業種における温暖化対策の目標に加え、経団連としても「2010年度に産業部門及びエネルギー転換部門からのCO<sub>2</sub>排出量を1990年度レベル以下に抑制するよう努力する」目標を設定し、温暖化対策を推進してきた。政府も1997年12月、産業構造審議会等における自主行動計画のフォローアップ実施を決定し、翌1998年度より開始された。同年、「地球温暖化対策推進大綱」でも自主行動計画による排出削減への取り組みが明確化された。温暖化対策の計画策定業種は1997年度当初の経団連傘下の37業種から、2012年度には経団連傘下の61業界団体・企業を含む全114業種まで増加してきた<sup>1)</sup>。自主行動計画は環境の異なる様々な業種が様々な指標の下で実施されたため、本分析では業界団体間の比較を定量評価するのに適していると考えられる経団連傘下の産業部門およびエネルギー転換部門の34業種を対象に、公表データ<sup>2)</sup>を用いて、複数の評価指標により、その排出削減効果、努力に関する分析を行った。

### 3.3 分析結果

各業種のエネルギー原単位改善（生産活動量あたりのエネルギー消費量）は総じて進展しているが、悪化している業種もあり、またエネルギー消費量が増大している業種もある。しかしながらエネルギー消費量のみならず、原単位も生産活動変化の影響を受けることが多い。図3は、各業種における年間のエネルギー原単位変化が年間生産活動指数変化によってどの程度説明されるのかについて分析し、原単位が悪化（もしくは改善）した理由が生産活動指数変化として説明でき



るのか否かについて評価を行った。横軸を1997-2010年の期間について各業種の $\Delta$ 生産活動指数と $\Delta$ エネルギー原単位の相関の説明性 ( $R^2$ 乗値)、縦軸を1990年比の2010年のエネルギー原単位指数をとって示した。図中では自主行動計画における各業種の数値目標の種別についても色分けで示している。まず、業種がA~Cの領域に分布されているように、目標の種類(エネルギー使用量、エネルギー原単位目標、CO<sub>2</sub>排出量、CO<sub>2</sub>原単位目標)の違いによる削減対策の度合いの差異はほとんど認めることができなかった。次に、エネルギー原単位が悪化した業種であっても、その大部分は生産活動量の悪化によって比較的高い説明性を有することが示された(日本産業車両協会など、Cの領域)。すなわち、経済活動が悪化したことに伴って原単位が悪化している可能性が高く、原単位改善を怠ったということではなく経済状況からの避けがたい面があったとも推定される。なお、Aの領域に分布する業種は生産活動の変動の影響を受けずに原単位改善に努めた可能性があることを示している。

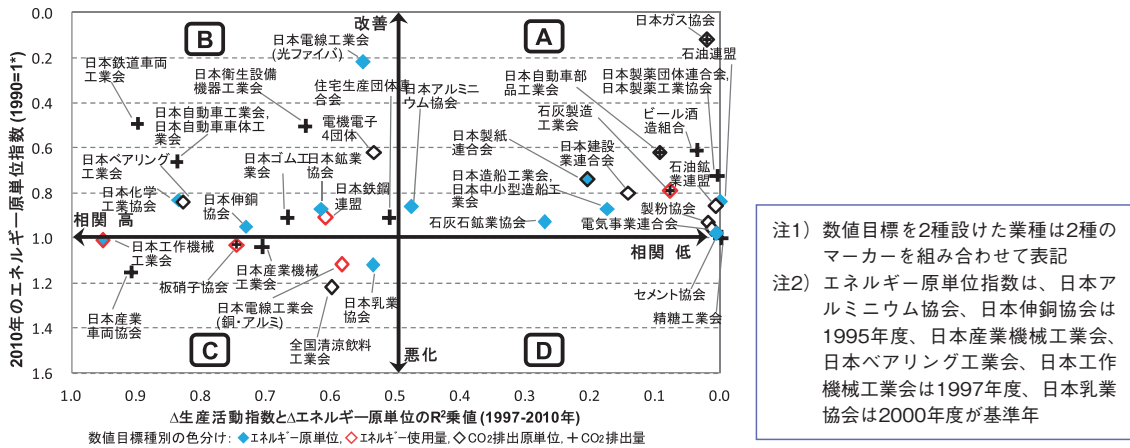


図3 産業・エネルギー転換部門参加業種におけるエネルギー原単位変化と原単位変化に対する生産活動変化の説明性 ( $R^2$ ) の関係 (1997-2010年)

### 3.4 まとめ

京都議定書第1約束期間の排出削減目標の達成に、自主行動計画の下で産業部門は大きく貢献したと評価できた。温室効果ガス排出削減の取り組みの程度を測ろうとする場合、基準年比での温室効果ガス排出増減だけではその削減努力を一概に評価することはできない。また、エネルギー原単位の増減やその絶対値の大小だけで評価できるほど簡単でもない。排出削減は既に達成しているエネルギー効率水準、経済成長・経済活動変化の違いなど、それぞれ異なった様々な事情の中でできる限り同じような水準の努力で排出削減に取り組む必要がある。そして、それを適切に評価することが更なる取り組みを促すことにもつながるものと考えられ、本分析はそれに寄与するものと考えている。なお、これらの分析は、2014年4月に政府がとりまとめた「自主行動計画の総括的な評価に係る検討会とりまとめ」の一部として活用された。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省自主行動計画の総括評価に係る検討会 (2014)
- 2) 経団連; 環境自主行動計画 (温暖化対策編) 2013年度フォローアップ概要版 (2012年度実績)

## 4. 電気料金値上げの製造業への影響評価

### 4.1 はじめに

大震災以降、電力をとりまく環境が大きく変化している。原発の再稼働が進まない中、石油・ガスを中心とした化石燃料発電の依存が強まり、電気料金の値上げが進んでいる。各電力会社により既に実施された電気料金値上げは、一部の原発再稼働を前提としたものであったが遅れているため、更なる値上げが不可避な状況となってきた。また震災以降、化石燃料に関する燃料費調整制度による調整額（燃調費）も大きくなっている。さらに、固定価格買取制度（FIT）の賦課金による電気料金値上げ幅も今後大きくなることを見込まれている。このような料金値上げに対して多くの企業では事業への深刻な影響が報告されている<sup>1)</sup>。

電気料金の値上げは、製造業を中心に産業への影響が大きいと考えられ、定量的な分析が重要である。生産における電力使用状況は地域や業種によって大きく異なるため、産業影響についてより現実的に把握するためには、地域や業種を詳細に分析することが重要である。そこで、製造業に関して、電気料金値上げの影響について都道府県別・産業別に分析した。

### 4.2 分析方法

工業統計<sup>2)</sup>の震災前の平成22年確報値を利用し、電気料金値上げによる製造業への影響を評価した。分析の対象は、従業者数4人以上の事業所の、都道府県別の細分類別産業(約540産業)である。本分析では、次の4ケースを想定した。ケース①では、震災以降に電力会社により実施された電気料金の値上げ（2014年12月現在）を想定した。ケース②、③では、原発ゼロ想定時の低位、高位推計による値上げをそれぞれ想定した。ケース①～③では、いずれも燃調費とFIT賦課金（現在稼働開始分のみを想定；全国一律+0.75円/kWh<sup>3)</sup>）を料金値上げに含めた。ケース④では、ケース①の想定を、FIT賦課金についてのみ、認定を受けた設備が全て稼働した想定（全国一律+3.12円/kWh<sup>3)</sup>）に変更した。各ケースの想定した料金の値上げ率は、ケース①では+15.6%～+54.5%（震災前比。幅は地域による違いを表す）、ケース②では+15.6%～+57.9%、ケース③では+15.6%～+65.2%、ケース④では+35.4%～+70.8%である。

### 4.3 分析結果

図4は、製造業従業員一人当たりの電気代増分額を示している。ケース①では、全国平均の製造業従業員一人当たりの年間電気代増分額（震災前比）は約15.2万円と推計された。このうち、既に実施された値上げ（燃調・FIT分は含まず）による一人当たり増分額は約5.5万円、燃調費とFIT賦課金（現稼働開始分のみ）による増分額はそれぞれ約7.3万円、約2.4万円と推計された。原発再稼働が全く見込めない場合には、一人当たり増分額は約18.3～20.1万円と増加し（ケース②、③）、深刻な影響はより一層大きくなる。また、FIT賦課金については、現在認可された設備が全て稼働した場合には一人当たり増分額が追加的に約7.7万円増加し（ケース④）、今後の更なる深刻な影響が示唆された。また、影響の地域的な差異は大きく、千葉県のように電力多消費産業が集積する都道府県では製造業への影響は非常に大きいことが示された。図5は、ケース①における産業別

の従業員一人当たりの電気代増分額を示した。化学工業や鉄鋼業などの一部の業種には、極めて深刻な影響が示された。

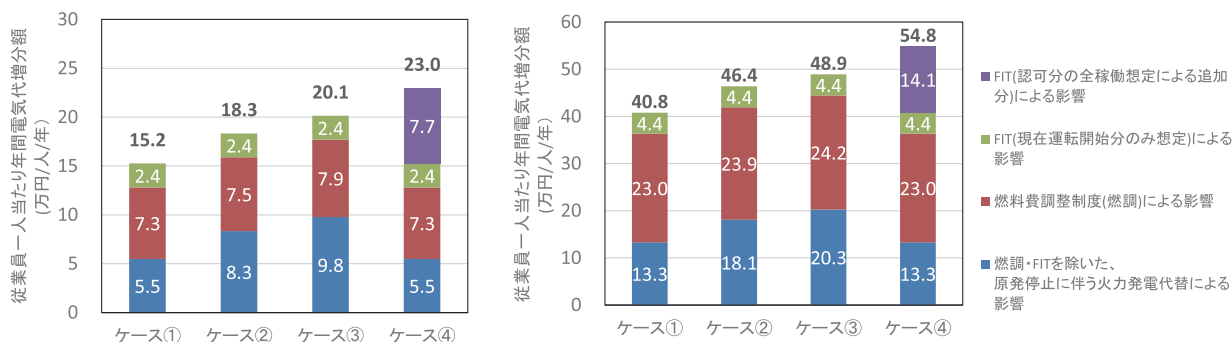


図4 値上げ要因別の、製造業平均の従業員一人当たり電気代増分額（震災前比）（左：全国平均、右：千葉県）

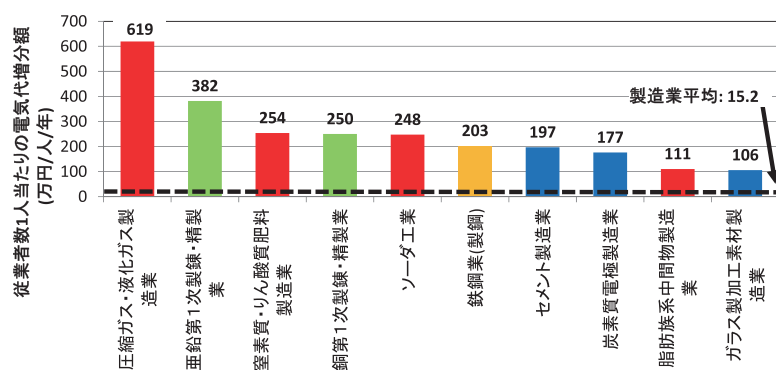


図5 産業別の従業員一人当たり電気代増分額（震災前比）：細分類区分における上位10産業（全国平均）（ケース①）  
注：グラフの赤、緑、黄、青色は、産業中分類における化学工業、非鉄金属業、鉄鋼業、窯業・土石業にそれぞれ属することを示す。

#### 4.4 まとめ

電力はほとんど全ての産業の根幹を支える必要不可欠なエネルギーであり、安定的かつ安価に供給されることが極めて重要である。本分析では、原発停止による電気料金上昇により、一部の地域では製造業への影響は大きく、また、電力多消費産業など、一部の業種には極めて深刻な影響が推計された。原発再稼働が無い場合には、より一層の深刻な影響が予想された。また、FIT賦課金については、今後FIT認可設備が全て稼働した場合においては、更なる深刻な影響が推計された。本分析の結果より、経済への悪影響が拡大する前に、料金上昇を抑制する効果的な方策を講じることの重要性が示唆された。（分析の詳細についてはRITE WEBサイト<sup>4)</sup>を参照ください。）

#### 参考文献

- 1) 日本商工会議所, 電気料金・エネルギーコスト高騰が招いた窮状
- 2) 経済産業省, 工業統計(平成22年確報), 2012
- 3) 資源エネルギー庁, 直近の認定量が全て運転開始した場合の賦課金等について(新エネルギー小委員会第4回配布資料), 2014
- 4) RITE, 電気料金値上げによる都道府県別の製造業への影響分析, <http://www.rite.or.jp/Japanese/labo/sysken/about-global-warming/ouyou/zenkoku-electricityprices.html>