温暖化緩和策における投資回収期間と対策費用に関する評価

花岡　達也[1]・明石　修[2]・日比野　剛[3]

[1]正会員　主任研究員　(独)国立環境研究所地球環境研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)
E-mail:hanaoka@nies.go.jp

[2]正会員　NIESポスドクフェロー　(独)国立環境研究所地球環境研究センター (〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

[3]非会員　シニアマネージャー　みずほ情報総研株式会社 (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町3-1)

温暖化緩和策の削減費用分析において，エネルギー価格や各対策技術の諸設定だけでなく，投資判断基準に用いる割引率または投資回収期間の設定の違いが結果に大きな影響を与える．対策技術情報の不確実性や各行動主体の状況などにより投資・購買行動は異なるため，投資判断基準に用いる割引率には幅が考えられる．そこで，低位割引率から高位割引率をシナリオ分析した結果，特に先進国においてその設定の違いが顕著に影響することがわかった．現状では，各行動主体は短い投資回収期間で意思決定し，省エネ技術が十分に生かされない傾向があるが，長い投資回収期間による評価を行うことで社会全体で見た潜在的な削減可能量を顕在化させることも重要な意味を持ち，社会的な視点で積極的に低炭素社会に向けた対策を講じるための方策を考えていく必要がある．

Key Words : *Payback period, Global warming, Mitigation costs and potentials, Bottom-up approach*

1. はじめに

麻生旧政権下における「地球温暖化問題に関する中期目標検討委員会（以下，中期目標検討委員会）」は，日本の温室効果ガス排出削減の6つの選択肢（1990年比4%増加から25%削減まで）を報告し[1]，麻生前総理が2005年比15%削減（＝1990年比8%削減）を2009年6月10日に発表した．また，政権交代後の鳩山旧政権下では，国連気候変動首脳会合（2009年9月22日）において「2020年までに1990年比25%削減」という目標を国際的に発表し，その後に発足された「地球温暖化に関する閣僚委員会タスクフォース会合（以下，中期タスクフォース）」における議論を踏まえ，中間とりまとめが報告された[2]．

これらの中期目標検討委員会や中期タスクフォースの議論では，世界技術積み上げモデル，日本技術積み上げモデル，日本経済モデルの3種類が用いられ，我が国の対策費用や経済影響などについて分析が行われた．特に，世界技術積み上げモデルにおいては，国際社会の中での日本という視点で，国際交渉で用いられる衡平性指標の一つである限界削減費用均等化の評価指標を用いて，我が国や欧米などの気候変動枠組条約付属書I 締約国（以下，Annex I）における削減数値目標や削減費用についての比較検討が行われた．しかし，技術積み上げモデルを用いた温暖化緩和策評価における限界削減費用分析では，エネルギー価格や各部門の対策技術オプションなどの諸設定だけでなく，投資回収期間の設定の違いも結果の差異に大きな影響を与え，中期目標検討において，懸案議題の一つであった．

そこで，本研究では，まず，投資回収期間の設定について考察し，次に中期目標検討において国際衡平性の議論の際に用いた世界技術積み上げモデルであるAIM/Enduse[Global]モデルの対策技術オプションを用いて，投資回収期間の設定基準の違いが，温室効果ガスの削減費用および削減ポテンシャル分析に与える影響について評価を行う．

2. 投資回収期間と割引率について

温暖化緩和策評価において，何を評価目的とするか，つまり，何を目的関数として最大化または最小化する最適化計算を行うかによって評価手法の概念が変わるため，対策技術オプションの選択判断基準を何に定めるかが異なってくる．対策費用の最小化を目的関数とする場合に

は，将来の価格を割引率を用いて現在価値へ割り戻し，そこで求まる対策費用を用いて各対策技術オプションの選択判断を行うため，この割引率の設定次第により対策費用の結果が異なることになる．また，費用対効果の相対的な判断については，どの程度の投資回収期間を設定するかによって，どの対策技術がコスト優位となるか選択判断の結果が変わってくる．したがって，割引率および投資回収期間の設定によって，対策技術の選択結果が異なることになる．

企業や投資家など意思決定の行動主体がどのような対策オプションを選択するかは，その行動主体の将来を左右する重要な意思決定問題である．複数のオプションの中から選択する代表的な評価方法として，正味現在価値法，内部収益率法，回収期間法，割引回収期間法などがある．温暖化対策技術を明示した，技術積み上げ型モデルにおいては，対策技術の選択の判断基準として，投資回収期間を直接計算に用いるのか，投資判断基準に用いる割引率を設定することで投資回収期間の概念を計算に考慮するかは，各研究者・研究機関のモデルによって異なる．そこで，先行研究例における割引率と投資回収期間の関係や，投資判断基準としてどの程度の割引率または投資回収期間を設定することが妥当なのかを考察する．

(1) USEPA による対策費用の評価手法

USEPA(2006) [3]においてNon-CO_2部門における各対策技術を明示した積み上げ型の分析手法によって，限界削減費用分析が行われているが，その分析の際に用いられる各対策技術のbreak-even cost（投資した分が便益によって回収される採算価格）とは，対策費用の正味現在価値と便益の正味現在価値が等しくなるような価格と定義されている．その定義式を展開すると採算価格 p ($/t$CO_2$eq)は式(1.1)で表わされる．ここで，$ER$を対策技術の導入によるGHG削減量，$R$を対策導入による副産物やエネルギー供給等による便益，Tを技術の耐用年数，DRを割引率，CCを初期費用，RCを運用費用，TRを税率とする．

ここで，式(1.1)の初期費用の年価を表す第一項を展開すると，式(1.2)のように表わされ，式(1.3)の資本回収係数の逆数が考慮されていることが分かる．式(1.3)に示される資本回収係数とは，原価（初期費用）について，ある一定の割引率を用いて将来のある時点までの一定期間で取り崩していく場合に，それがどれだけの年価に相当するのかを算出するための係数である．そして，資本回収係数の逆数は投資回収期間を示しているため，USEPA(2006) [3]では対策機器の対策費用を年価で比較する際に投資回収年の概念が考慮されているといえ，この採算価格を求める際に用いる割引率は10%と設定されている．これを投資回収期間に換算すると，例えば，設備の耐用年数が30年のプラントに対して9.4年に相当し，耐用年数が10年の民生家電機器の場合は，6.1年に相当することを意味している．

$$P=\frac{CC}{(1-TR)\,ER\sum_{t=1}^{T}\frac{1}{(1+DR)^{t}}}+\frac{RC}{ER}-\frac{R}{ER}-\frac{CC}{ER\times T}\frac{TR}{(1-TR)} \tag{1.1}$$

$$\text{初期費用の年価}=\frac{CC}{(1-TR)\,ER\dfrac{(1+DR)^{T}-1}{DR(1+DR)^{T}}} \tag{1.2}$$

$$\left[P\rightarrow M\right]_{T}^{\alpha}=\frac{DR(1+DR)^{T}}{(1+DR)^{T}-1} \tag{1.3}$$

(2) MARKALおよびTIAMによる対策費用の評価手法

MARKALモデルおよびTIAMモデルは，温暖化対策技術を明示した技術積み上げ型モデルであり，分析対象期間の総対策費用を最小化する最適化計算を行っている．Loulou et al (2004) [4] より，対策費用の年価は，初期費用の年価，運用費用（各年で固定の運用費用と可変の運用費用），エネルギー等の副産物による便益，炭素税，および厚生の損失からなり，式(1.4)で表わされる．また，分析対象期間の総費用は式(1.5)で表わされる．ここで，InvCを初期費用，InvACを初期費用の年価，INVを対象年 t における技術導入可能量，Fixを年々の固定費用，CAPを対象年 t における技術導入量，Varを年々の運用費用，ACTを技術の稼働量，Delを技術への単位サービス当たりの輸送費用，Inpを単位技術当たりの稼働に必要とされるサービス量，MinCをエネルギー資源の採鉱の費用，Minを採鉱量，TraCを貿易費用，TRDを貿易量，IPCをサービスの輸入価格，IPをサービスの輸入量，EPCをサービスの輸出価格，EPをサービスの輸出量，Taxを炭素税，ENVをGHG排出量，DLを厚生の損失，rを地域，Rを地域数，t, jを年，kを対策技術，Tを技術の耐用年数，sを分析期間，cをサービス(エネルギーまたは材料)，lを価格レベル，hを投資判断基準に用いる割引率，dを一般的な割引率，NPERを分析対象年までの分析期間ステップの数，NYRSを各分析期間ステップの年数，とする．

分析対象期間の総費用を求め，費用最小化の最適化計算する際には，式(1.5)に示すように資金調達コスト（利子率）等を考慮した一般的な割引率5%を用いて正味現在価値が求められている．一方，対策費用の年価は式(1.4)であり，その中で初期費用の年価InvACは式(1.6)で表わされ，ここでも他研究と同様に式(1.3)の資本回収係数を用いて，ある一定の割引率で初期費用を年価に割り戻していることが分かる．ここで，MARKALモデルおよびTIAMモデルでは，一般的な割引率（社会時間選好率

や利子率に相当する割引率：discount rate） d と投資判断基準に用いる割引率（投資判断基準となる収益率：hurdle rate）hとを区別しているが，TIAMモデルでは，この投資選択判断に用いる割引率を各部門・機器の特徴によって10~20%と異なる値を設定し，一般的な割引率には世界で一律5%を用いている[5]．また，機器特有の投資選択判断に用いる割引率を定義しない場合には，それらの機器に対しては一般的な割引率 d と同じ値を用いられている[4]．したがって，投資判断基準に用いる割引率を10~20%とした場合，これを投資回収期間に換算すると，例えば，設備の耐用年数が30年のプラントに対して5.0~9.4年に相当し，耐用年数が10年の民生家電機器の場合は，4.2~6.1年に相当することを意味している．

$$AC_{r,t} = \sum_k \left[\begin{array}{l} InvC_{r,t,k} \Big/ \sum_{j=1}^{T_k} \frac{1}{(1+h)^j} \times INV_{r,t,k} \\ +Fix_{r,t,k} \times CAP_{r,t,k} + Var_{r,t,k} \times \sum_s ACT_{r,t,k,s} \\ +\sum_c \left(Del_{r,t,k,c} \times Inp_{r,t,k,c} \times \sum_s ACT_{r,t,k,s} \right) \end{array} \right] + \sum_{c,s} \left(\begin{array}{l} MinC_{r,t,c,l} \times Min_{r,t,c,l} + TraC_{r,t,c} \times TRD_{r,t,c,s} \\ +IPC_{r,t,c,l} \times IP_{r,t,c,l} + EPC_{r,t,c,l} \times EP_{r,t,c,l} \end{array} \right) + \sum_c \left(Tax_{r,t,p} \times ENV_{r,t,p} \right) + \sum_d DL_{r,t,d} \quad (1.4)$$

$$NPV = \sum_{r=1}^{R} \sum_{t=1}^{t=NPER} \left[\frac{1}{(1+d)^{NYRS \cdot (t-1)}} \times AC_{r,t} \times \sum_{j=1}^{NYRS} \frac{1}{(1+d)^{j-1}} \right] \quad (1.5)$$

$$InvAC = \frac{InvC}{\sum_{j=1}^{T} \frac{1}{(1+h)^t}} = InvC \times \frac{h(1+h)^T}{(1+h)^T - 1} \quad (1.6)$$

(3) McKinsey&Companyによる対策費用の評価手法

McKinsey and Company(2009) [6] においても，各対策技術オプションを明示した積み上げ型の分析手法によって，温暖化対策に関する対策費用および削減ポテンシャルの分析が行われている．削減費用は「（代替技術の総費用－ベースライン技術の総費用）÷（ベースライン技術の排出量－対策技術の排出量）」と定義され，技術の総費用を年価で扱う際に，技術の耐用年数を投資回収期間として初期費用を年価換算し，また利子率を4%を用いている．このように耐用年数を投資回収期間とする場合，省エネの効果や副産物によって得られる便益の効果をより長い期間を見込むことができるため，削減費用が低く推計され，No regretの対策（導入された技術が導入に要した費用を相殺するほどのエネルギー削減効果をもたらす場合には，削減費用は負となる）がより多く見積もられている．ICCA(2009)[7] においても，McKinsey and Companyが同様の分析手法を用いて削減費用分析を行っているが，利子率を4%とし，また対策技術の耐用年数を投資回収期間にとり，社会的な視点で積極的に対策が導入されるように潜在的な削減可能量を顕在化させたものを「Society View」ケースとし，一方で，財政的，技術的な努力の必要性を考慮して利子率を10%とし，投資回収期間を10年にとった場合を「Busines View」ケースとして，対策費用と削減量の差異を示している．

(4) GAINSによる対策費用の評価手法

GAINSモデルは，対策技術を明示した技術積み上げ型モデルであり，大気汚染物質から温室効果ガスに関する評価へと対象ガス種を拡張したものである．Amann et al (2009) [8]より，式(1.7)に示すように対策費用には各対策技術の初期費用Iと運用費用OM（固定の運用費用と可変の運用費用）が考慮され，詳しくは排出部門別にそれらの算出方法が設定されている．また，式(1.8)に示すように，分析対象年における対象地域全体の総対策費用を最小化する計算を行っている．ここで，Iを初期費用，I^{an} を初期費用の年価，O^{fix} を各年の固定運用費用，O^{var} を各年の可変運用費用，$x_{i,k,m}$ を技術mに関係する活動種kの活動量，$y_{i,k,m}$ を燃料転換や活動種転換による効率改善を表す代替量．qを割引率，iを対象国，kを活動種（サービス種），mを対策技術，とする．

Amann et al(2009)[9] では，McKinsey and Company(2009) [6] と同様に，社会的な視点で潜在的な削減可能量を顕在化するために，対策技術の耐用年数を投資回収期間として初期費用を年価換算した場合を「long payback」ケースとし，一方で，民間企業の視点でとらえ，投資回収期間を対策技術の耐用年数よりも短く設定した場合を「short payback」ケースとして，対策費用と削減量の差異を示している．短い投資回収期間の設定については具体的には示されていないが，筆者とのpersonal communicationによると，専門家へのインタビューを元に部門別に異なる設定をしているとのことである．そこで，初期費用の年価への換算式を見ると式(1.9)が用いられており，他の研究と同様に式(1.3)の資本回収係数を用いて，ある一定の割引率で初期費用を年価に割り戻している．この割引率の設定については，Amann et al(2009)[9]では「民間企業は投資を正当化するために，12～25%と高めに設定する」と記述されているため，それらを彼らが設定する投資判断基準に用いる割引率と判断し，投資回収期間に換算すると，例えば，設備の耐用年数が30年のプラントに対して4.0～8.0年に相当し，耐用年数が10年の民生家電機器の場合は，3.6～5.7年に相当することを意味している．

$$C_{i,k,m} = I^{an}_{i,k,m} + OM^{fix}_{i,k,m} + OM^{var}_{i,k,m} \quad (1.7)$$

$$C_{total} = \sum_{i,k}\left(\sum_{m} C^{x}_{i,k,m} \times x_{i,k,m} + \sum_{k'} C^{y}_{i,k,k'} \times y_{i,k,k'}\right) \quad (1.8)$$

$$I^{an} = I \times \frac{q(1+q)^{lt}}{(1+q)^{lt}-1} \quad (1.9)$$

(5) 内部収益率法による評価手法

企業や投資家など意思決定の行動主体がプロジェクトへの投資を評価する際に用いる正味現在価値 (NPV: Net Present Value)法では，式(1.10)に示すように，投資プロジェクトの予想収益を，ある一定の利子率で割り引いてその現在価値を計算し，そこから投資額を差し引き，その差額を求める．NPVの値が０より大であれば，その投資プロジェクトは採用されるべきであると判断される．ここで，I：投資額の現在価値，C_i：i期の予想収益，r：利子率を表す．しかし，NPV法では利子率の設定によってプロジェクトの価値が変わるため，利子率（つまり資金調達コスト）どのように設定するかが大きな課題となる．

そこで，企業や投資家などがプロジェクト（例えば温暖化対策のための新規プラントの設置）の収益性を判断する標準的な指標として，NPV法よりも式(1.11)で表わされる内部収益率（IIR: Internal Rate of Return）法がよく用いられる．内部収益率とは，投資額の現在価値が，投資に対する将来予想されるキャッシュフローの正味現在価値とちょうど等しくなるような割引率（利率）fr のことである．この割引率を指標とすることで，計算プロセスにおいて利子率は直接反映せずに，割引率が資金調達コスト（借入金利，つまり，その国の市場における資本の利子率）より上回っているかどうかで，投資の良否を判断することができる．つまり，IRRと借入金利水準を比較したとき，IRRが基準となる金利水準を上回る場合にはNPVもプラスとなり，その水準が高いほどプロジェクトの収益力が高く，その投資は有利であると判断され，逆に，IRRの方が低い場合にはNPVもマイナスでプロジェクトの収益性には問題があり，不利であると判定される．一般に，プロジェクトの収益性を評価する際に，内部収益率（すなわち割引率）が10~20%程度が，そのプロジェクトに収益性があるかどうかの投資を判断する一つの目安のようである．

ここで，各i期の予想収益C_iが一定C_{const}だとすると，式(1.11)は式(1.12)のように展開され，内部収益率とは，初期費用を式(1.3)の資本回収係数を用いて年価に換算した値と予想収益C_{const}とが等しくなるような割引率を意味していることが言える．よって，割引率が10~20%程度が目安ということは，投資回収期間に換算すると，例えば，設備の耐用年数が30年のプラントに対して5.0～9.4年程度の投資回収期間が一つの目安となる．

ところで，日本におけるベンチャーキャピタル等の投資動向調査[10] 注1)についてプロジェクトのIIRの分布状況をみると，実際の現状では−40%(つまり負債を多く抱えたプロジェクト)～40%(つまり非常に収益性の高いプロジェクト)まで幅広く，ハイリスク・ハイリターンなベンチャー企業特有の事情を表しているものと言える．

一方，温暖化対策に特化したプロジェクトのIRRについて評価するために，現在登録されているCDMプロジェクトを考察すると，プロジェクトの96%が投資分析の評価指標としてIRRを用いており[11]，そのIRRのベンチマークレートはCDMプロジェクトの種類や規模によっても異なるが，概ね4%～30%であり[12] 注2)，CER（CDMプロジェクトによって排出削減された認証排出削減量 Certified Emission Reductionsの略称）の考慮の有無によって，実際のIRRはベンチマークレートの近傍の値となっている．特に最もプロジェクト数が多いのがIRRが8%~10%付近のものであり，これを投資回収期間に換算すると，CDMプロジェクト期間が10年の場合は投資回収期間が6.1～6.7年，プロジェクトが20年の場合は投資回収期間8.5～9.8年に相当することを意味している．

$$NPV = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{(1+r)^n} - I \quad (1.10)$$

$$I = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{(1+fr)^n} \quad (1.11)$$

$$C_{const} = I \times \frac{fr(1+fr)^n}{(1+fr)^n - 1} \quad (1.12)$$

(6) 投下資本利益率法による評価手法

投資した資本から得られる利益率のことを，投下資本利益率（ROI: Return on Investment）と呼ぶ．ROIもIIRと同様に，企業や投資家などが投資選択を判断する際の収益性を測る指標の一つであり，式(1.13)に表される．また，このROIの逆数が，投資回収期間を示す．

ROIは，企業全体の収益性を評価する際によく用いられる指標であり，ROIが10~20%程度が，その企業に収益性があるかどうかを判断する一つの目安のようであるが，現状では業界・企業によってROIが異なり，各業界の平均的なROIの分布を見ると概ね5~20%，2005年度の国内上場企業のROI平均は約5%であるとの報告[13]もある．よって，ROIが5~20%ということは，投資回収期間でいう

注1) 日本におけるベンチャー企業全般に関する調査である．

注2) IRRのベンチマークレートが0%または設定されず，さらにCERを考慮しない場合はIRRが負の値になるようなCDMもデータベースの中に数件見られるが，1000件以上ある中のごくわずかなため，それらは本考察の対象外としている．

と5～20年に相当することを意味する．

$$ROI = \frac{\text{当期経常利益}}{\text{投下資本}} \times 100 \qquad (1.13)$$

(7) アンケート調査による投資回収期間

中央環境審議会地球環境部会[14]では，投資回収期間を産業部門，民生業務部門で3年，民生家庭部門で5年としている．また，省エネセンターによる省エネ対策導入への投資回収期間に関するアンケート調査[15]を見ると，鉄鋼業が3年以下，非鉄金属製品，化学工業，輸送用機器器具，食料品は3~5年，電気機械器具は8年と回答され，各部門を平均して4.4年と報告されている．

ただし，これらはアンケート調査の回答結果であり，例えば投資回収年が業務部門で3年，産業部門で2年といった投資回収が可能な対策ばかり導入すると省エネによる十分なCO_2削減量が見込めないが，ESCO（Energy Service Company）事業の潜在的市場規模を見ると，業務部門で5～15年，産業部門で4-6年といったアンケート調査よりもより長い投資回収期間において，省エネによる大きなCO_2削減量が見込めることが報告[15]されている．これを式(1.3)の資本回収係数を用いて割引率に逆換算すると，業務部門（機器類の耐用年数が20年と設定した場合）では3~19%，産業部門（設備の耐用年数が30年と設定した場合）では，16~25%に相当することを意味している．

(8) IPCC第四次評価報告書の割引率に関するレビュー

IPCC第四次評価報告書(AR4: Fourth Assessment Report)の第三作業部会（WG III: Working Group III）の報告書(2007)[16]をレビューすると，産業部門(AR4 WGIII pp 472を参照)では3～10%，民生部門(AR4 WGIII pp 412を参照)では3～10%，自動車部門(AR4 WGIII pp 362を参照)では4%の割引率が用いられている，と記載がまとめられている．

ただし，ここで記述されている割引率とは，USEPAの式(1.2)，MARKALモデルおよびTIAMモデルの式(1.6)，GAINSモデルの式(1.9)などのように，投資選択判断の基準に用いる割引率のことか，MARKALの式(1.5)のような社会時間選好率を考慮した利子率に相当する一般的な割引率のことかは，AR4 WGIIIの記述からは判断できない．過去の国債の利回り（1~4%程度）と比較すると，記載されている値は利子率に相当する割引率に近いと考えられる．一方，環境問題への意識が高く，収益率はほぼ見込まずに利子率に近い低い割引率で投資選択判断を行うとした場合，投資回収期間に換算すると，式(1.3)の逆数より，産業部門では9.4～19.6年（耐用年数を30年と設定），民生部門の民生機器では6.1～8.5年（耐用年数を10年と設定），建築物では9.8～23.1年（耐用年数を40年と設定），自動車部門では8.1年（耐用年数を10年と設定）に相当する．

3. 分析方法および諸データの設定

(1) 対象地域，対象ガスおよび対象部門

本研究では，主要なGHG排出国に注目し，アジア地域を中心に世界を32地域に分類し，地域毎の削減量や削減費用を比較検討する．Annex IやNon-Annex I，ASEAN地域に結果を集約することも可能であり，その地域分類を**表-1**に示す．人為起源のGHGについては，京都議定書に定められるCO_2，CH_4，N_2O, HFCs，PFCs，SF_6を分析対象とする．対象部門については，発電部門，産業部門，民生家庭・業務部門，運輸部門，農畜産部門，廃棄物部門，フロンガス排出部門，資源採掘部門を考慮した．また，各部門において技術データベースを構築し，技術積み上げ型の評価方法を用いて，一国あるいは一地域に適用し，部門毎にシミュレーションを行った．

表-1 評価対象地域

Code	地域	Code	地域
JPN	日本	CAN	カナダ
CHN	中国	USA	米国
IND	インド	XE15	西欧15ヶ国(EU15)
IDN	インドネシア	XE10	東欧10ヶ国(EU10)
KOR	韓国	XE2	その他EU2
THA	タイ	TUR	トルコ
MYS	マレーシア	XEWI	その他西欧AnnexI
VNM	ベトナム	XEEI	その他東欧AnnexI
XSE	その他東南アジア	RUS	ロシア
XSA	その他南アジア	XENI	その他EU
XEA	その他東アジア	MEX	メキシコ
XCS	その他中央アジア	ARG	アルゼンチン
XME	中東	BRZ	ブラジル
AUS	オーストラリア	XLM	その他中南米
NZL	ニュージーランド	ZAF	南アフリカ
XOC	その他オセアニア	XAF	その他アフリカ

(2) 本研究の分析手法

本研究では，対策技術の対策費用について，式(1.14)に示すように，式(1.3)で表わされる資本回収係数を用いて対策技術や設備を導入する際に必要な初期費用を年価$\hat{C}^t_{l,i}$に換算し，また燃料費用や運転費用等の活動量に伴って年々変動する運用費用を考慮している．そして，各部門の各技術lについて，サービス供給量1単位あたりのGHG排出削減量$\Delta\hat{Q}^{t,GHG}_{l,i}$，基準で普及している技術（ストック平均）と比較し対策技術1単位あたりの追加費用$\Delta\hat{C}^t_{l,i}$を求め，削減量あたりの追加費用$\Delta\hat{C}^t_{l,i}/\Delta\hat{Q}^{t,GHG}_{l,i}$が小さい技術の順に，縦軸に削減量あたりの追加費用$\Delta\hat{C}^t_{l,i}$，横軸に可能削減量$\Delta\hat{Q}^{t,GHG}_{l,i}$の技術$l$に関する累積量を算定したものを削減費用曲線とし，すなわち，分析対象年tにおける総費用を最小化するように計算を行っている．ここで，$\hat{B}^t_{l,i}$を技術lの初期費用，α_iを割引率，$SC_{l,i}$を補助金率，$T_{j,i}$を技術lの耐用年数，技術lを1単位

運転したときの燃料費以外の運転費用を $\hat{g}^t_{0,l,i}$，エネルギー種kを1単位消費したときにかかる燃費を $g^t_{1,k,i}$，技術lを1単位運転するときのエネルギー種kの消費量 $\hat{E}^t_{k,l,i}$，エネルギー効率改善係数 $\xi^t_{k,l,i}$，$\hat{A}^t_{l,j,i}$ を技術lの一単位運転による第jサービスの供給量，$C^t_{l,i}$ を第jサービス供給の費用，$D^t_{j,i}$ を第jサービスの需要量，$\Lambda^t_{l,i}$ を運転余裕係数，$\psi^t_{j,i}$ を供給効率改善係数，GWP を地球温暖化係数，$Q^{t,m}_{j,i}$ を第j種サービス供給によるガスmの排出量，$\hat{e}^{t,m}_{l,i}$ を技術lを1単位運転するときの第mガスの排出量とする．また，各サフィックスを次のように定義する．i：地域，j：サービス種，m：ガス種，t：年（t=0は基準年），$\hat{}$：単位技術あたりの量.

$$\hat{C}^t_{l,i} = \hat{B}^t_{l,i}\cdot(1-SC_{l,i})\cdot\frac{\alpha_i(1+\alpha_i)^{T_{l,i}}}{(1+\alpha_i)^{T_{l,i}}-1} + \frac{\hat{g}^{\mathrm{t}}_{0,l,i}+\sum_k g^t_{1,k,i}\cdot\left(1-\xi^t_{k,l,i}\right)\cdot\hat{E}^t_{k,l,i}}{1+\Lambda^t_{l,i}} \quad (1.14)$$

$$\Delta\hat{C}^t_{l,i} = \frac{C^0_{l,i}}{D^0_{j,i}} - \frac{\hat{C}^t_{l,i}\cdot\left(1+\Lambda^t_{l,i}\right)}{\hat{A}^t_{l,j,i}\cdot\left(1+\Psi^t_{j,i}\right)} \quad (1.15)$$

$$\Delta\hat{Q}^{t,\mathrm{GHG}}_{l,i} = \sum_m GWP_m\cdot\left(\frac{Q^{0,m}_{j,i}}{D^0_{j,i}} - \frac{\hat{e}^{t,m}_{l,i}}{\hat{A}^t_{l,j,i}\left(1+\Psi^t_{j,i}\right)}\right) \quad (1.16)$$

本研究では，式(1.14)で求めた各対策技術の年価を用いて，各技術の追加費用を式(1.15)で求め，そして，式(1.14)および式(1.15)を用いて，各技術の費用対効果を比較評価することで，対策技術を選択判断を行っている．資本回収係数を用いて一定の割引率の下で，初期費用をある“一定の期間”に配分して年価に換算し，それを用いて各対策の費用対効果を比較するということは，この“一定の期間”が“投資回収期間”に相当する．例えば，設備の耐用年数が30年のプラントに対して割引率を33%と設定した場合，式(1.3)の逆数より，想定される投資回収期間は約3年となる．このように，本研究では，投資判断基準となる収益率に相当する割引率を設定して各対策技術を年価で評価することで，投資回収期間を選択判断に取り入れる手法を用いている．

(3) 投資判断基準に用いる割引率の設定

一般に，対策技術情報の不確実性や各行動主体のおかれた状況などにより投資行動や購買行動は異なるため，投資回収年数の設定には幅が考えられる．各部門において様々な対策技術が存在するが，投資回収年数がその対策技術の耐用年数よりも手前になることが多い．特に現状では，投資回収年が短い限られた対策が優先的に選択され，回収年数が長いものへのインセンティブが低くなり，十分に大きな温室効果ガスの削減効果（つまりエネルギー消費の削減効果）が望めない．しかし，低炭素社会の実現に向けて，最大限の省エネおよび光熱費削減を実現するには，投資回収年数の短い対策ばかりではなく，投資回収年数が長い対策も含め，包括的な対策が必要とされている．

しかし，意思決定の行動主体がどのような対策オプションを選択するかは，その行動主体の将来に関わる重要な問題であり，何を合理的な判断とするかは各行動主体の意思決定の基準による．したがって，投資回収期間または投資判断基準に用いる割引率をどの程度に設定するかはシナリオ変数であるため，本研究では次の三つのシナリオを分析した．その設定の概要を**表-2**に示す．

a) 低位割引率(LDR)シナリオ：環境問題に対して社会的・公共的な意識が高く，積極的に対策を導入するような環境があり，収益率はほぼ見込まずに，利子率に近い低い割引率を想定する．投資判断基準に用いる割引率を5%とする．

b) 中位割引率(MDR)シナリオ：CDMプロジェクトにおけるIRRのベンチマーク[12]や企業のROIの目安，また他の研究例に見られるように，プロジェクトや対策技術のリスクを考慮し，ある程度の収益率が見込まれるように割引率を想定する．投資判断基準に用いる割引率を10%とする．

c) 高位割引率(HDR)シナリオ：対策技術の見通しがあり，技術改善の進歩が早いエネルギー消費に関連した部門において，アンケート調査[15]に見られるように，投資回収期間が短い対策が優先的に選択される傾向があるため，高い収益率を見込まれるように割引率を想定する．部門によって投資判断基準に用いる割引率の設定は異なる．

ただし，非エネルギー起源排出部門である農業畜産，廃棄物，資源採掘，フロンガス排出部門については，エネルギー起源排出関連部門とは異なる特徴を持つ．例えば，排ガスや廃棄物の回収，設備の管理といった対策のように，技術の見通しが将来も大きく変わらない，または高度な技術ではなく技術改善の進歩がエネルギー起源排出関連部門と比べて遅いため，対策技術の選択のリスクが小さいと考えられ，本研究では全シナリオにおいて一律5%の割引率を設定した．

(4) 対策技術オプション

本研究では，分析対象年を2020年とし，各部門において実用化されている既存の技術を評価対象とし，数百種類の対策技術を考慮している．ただし，将来に期待される革新的な技術については，データの制約等により考慮していない．たとえば，CO_2分離回収貯留技術は，期待される革新的な技術の一つであるが，実用化に向けた実証試験の段階であり，立地条件や容量，導入費用などの

表-2　技術選択の評価基準の設定の概要

シナリオ	対象部門	投資判断基準に用いる割引率	想定される投資回収期間の例（カッコ内は設定した耐用年数）
HDR	家庭・業務（白物家電） 運輸（自動車，バス，トラック） 産業（その他業種横断）	33%	家電機器：3年（10−15年） 乗用車・バス・トラック：3年（8−12年） その他業種横断：3年（30年）
	発電 産業（鉄鋼，セメント） 運輸（鉄道，船舶，航空） 家庭・業務（断熱住宅）	10%	発電：9−10年（20−40年） 産業プラント：9−10年（30年） 鉄道・船舶・航空：8−9年（20年） 住宅断熱：9−10年（30年）
	非エネルギー起源排出関連部門（農業畜産，廃棄物，資源採掘，フロンガス排出）	5%	農業畜産：1−11年（1−15年） 廃棄物：10−16年（15−30年） フロン：1−13年（1−20年）
MDR	エネルギー起源排出関連部門	10%	家電機器：6−8年　（10−15年） 乗用車・バス・トラック：5−7年（8−12年） その他業種横断：9−10年（30年） ※他はHDRと同じ設定
	非エネルギー起源排出関連部門	5%	※HDRと同じ設定
LDR	全部門	5%	家電機器：7−10年　（10−15年） 乗用車・バス・トラック：6−9年（8−12年） 産業プラント：14−15年（30年） 鉄道・船舶・航空：12−13年（20年） 住宅断熱：15−16年（30年）

注1)　途上国・新興国では，経済が不安定であり投資リスクが大きいため投資回収年はより短いと考えられる．国別に価値観の違いや経済の安定性も異なるため，投資回収年数の評価基準は異なるはずだが，各部門における国・地域間の削減ポテンシャルの傾向の相違を相対的に比較するために，本研究では国別のリスクは考慮せず，国・地域間で同じ投資回収年数の評価基準を用いる．

データ制約もあり，2020年時点では本格的な導入は難しいと考え，対策技術として考慮してない．

また，本研究では，対策技術選択による削減費用および削減ポテンシャルを評価しており，対策技術の導入による需要の変化や価格の変化など，対策の導入に伴う波及効果は考慮されていない．

4. 結果および考察

(1) 削減費用および削減ポテンシャルの考察

投資判断基準に用いる割引率について，**表-2**に示すようにシナリオ分析すると，各対策技術における投資回収期間の度合いが変わるため，削減費用および削減ポテンシャルの結果に影響を与える．**図-1**に，炭素価格（限界削減費用）を200US$/tCO$_2$としたときの，排出主要国における削減費用曲線[注3)]の結果を示す．各部門において様々な対策技術が存在するが，低位割引率(LDR)シナリオでは，限られた対策のみが選択されるため追加的な削減費用が高くなり，十分な削減効果が期待できないことが分かる．一方，高位割引率(HDR)シナリオでは，より長い期間，各対策技術のエネルギー消費削減効果を考慮するため追加的な削減費用は安くなり，全体として追加的な削減費用は安くなる．特に，**図-1**に示すように削減費用が安価な対策（特に0US$/tCO$_2$以下）による削減量を見ると，投資判断基準に用いる割引率の違いによって，大きな差が生じていることが分かる．また，この割引率が異なると各対策技術の追加的な削減費用の結果が異なるため，選択される対策技術オプションやそれらの普及の度合いも変わることが，曲線の形状の違いから分かる．

また，主要な先進国と主要な途上国の傾向を比較すると，投資判断基準に用いる割引率の設定の違いは，途上国よりも先進国においてより顕著に影響が表れている．これは，先進国の方が途上国よりもエネルギー価格が高いためである．エネルギー価格が低いと，投資回収期間が長く（割引率が低く）とられたとしても，エネルギー消費削減分によるエネルギー費用の削減効果が小さいため，高効率技術がコスト優位ではなく選択されにくい．したがって，途上国・新興国では，投資判断基準に用いる割引率の設定の違いだけでなく，将来のエネルギー価格の動向が削減費用と削減ポテンシャルの結果に大きく影響を与える可能性があることが分かる．

中期目標の議論において“限界削減費用均等化”が国際衡平性指標の一つとして用いられているが，**図-1**のように，投資判断基準に用いる割引率の設定の違いにより各国の削減ポテンシャルの結果に差異が表れ，さらに将来のエネルギー価格や各部門の対策技術オプションの諸設定・制約の違いにより，結果に大きな影響を与えるため，限界削減費用を評価指標として各国の負担分担を議論する場合は，まず，その試算の前提条件を十分に理解する必要がある．

注3)炭素価格（限界削減費用）を200US$/tCO$_2$としたときに，その条件下での各技術対策導入の削減量あたりの追加費用とその導入量の組み合わせについて，追加費用が安いものから順に図示したものであり，限界削減費用曲線とは異なる．

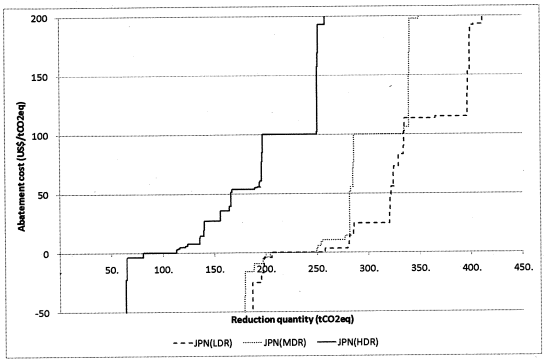

図-1a　日本

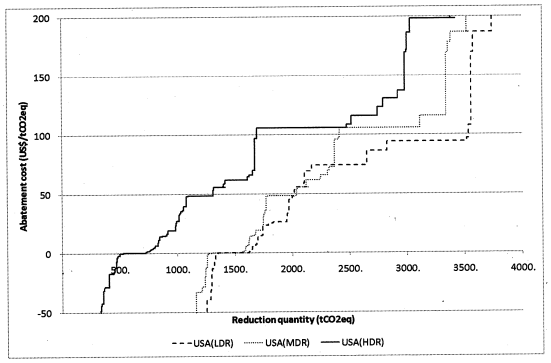

図-1b　米国

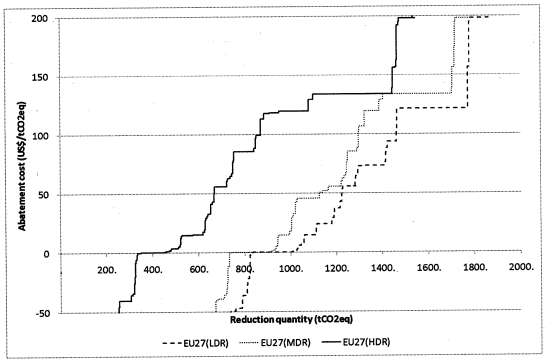

図-1c　欧州27カ国

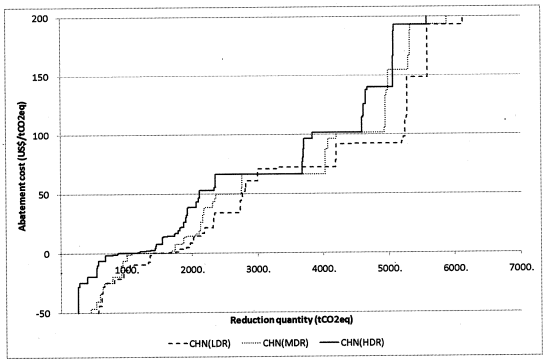

図-1d　中国

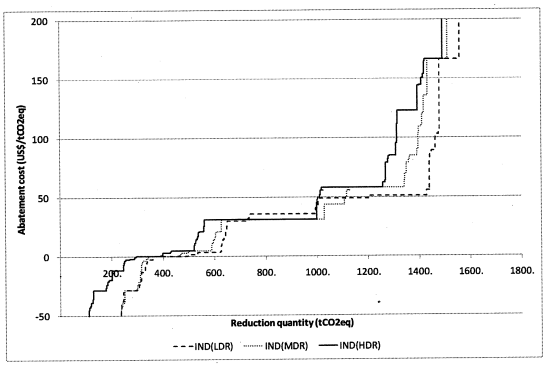

図-1e　インド

図-1　排出主要国の削減費用曲線

(2)　投資回収期間を長く取るための対策

各行動主体の投資行動・購買行動の選択基準を変化させることは難しいが，上手な方策を講じることでこの削減ポテンシャルを顕在させ，投資回収期間を長く取るような対策を講じることで，低炭素社会の実現を進めていく必要がある．ここで，いくつかの対策を考察する．

a)　省エネ対策への低利子融資または補助制度
　経済的支援措置によって，温暖化対策機器を普及させる施策．例えば，家庭部門において有効な温暖化対策ではあり，削減費用が高いために導入が充分に進んでいない対策として，太陽光発電，次世代自動車，高断熱住宅，高効率給湯器などがあるが，対策の導入を促進するために，本体購入に対して低利子融資または補助制度を実施する．ただし，このための財源を確保するための枠組み（資金メカニズム）も別途必要とされる．

b)　ESCO事業の促進
　省エネのための追加投資を肩代わりし，その分をエネルギー費用削減分で回収するような仕組みを促進する．

c)　見える化の徹底
　投資判断の主体に技術・機器に関する温室効果ガス排出量，初期費用や運転費用などの正確な情報を行き届かせ，活動主体のCO_2排出量の自覚を促すとともに，対策選択に関して的確な選択を促進する情報の開示を行う．カーボンフットプリント（商品の原料調達や製造段階から販売・使用・廃棄に至るライフサイクルを通じた温室効果ガス排出量）の商品への表示の義務化，電力消費のリアルタイムモニター導入の促進などが挙げられる．

このように，投資回収年数を長くするような施策の実施は大きな排出削減につながり，各行動主体にとっても，社会全体にとっても，温室効果ガスの大幅削減にむけて賢い選択と考えられる．

5. おわりに

技術積み上げモデルにおいては，投資回収期間または投資判断基準に用いる割引率の設定の違いが，対策費用および削減ポテンシャルの結果に大きな影響を与えることが示された．また，エネルギー価格が高い先進国諸国においてその傾向が強く，同じ炭素価格（限界削減費用）下において，対策技術オプションの選択やその導入量が異なることが分かった．また，各行動主体は投資行動・購買行動においてある一定の収益性を見込み短い投資回収期間で意思決定する傾向があるが，しかし，社会的な視点で積極的に低炭素社会に向けた対策事業を推進していくために，社会全体で見た潜在的な削減可能量を顕在化させることも重要であるため，長い投資回収期間による評価も重要な意味を持つ．

最後に，本研究では，投資回収期間や投資判断基準に用いる割引率について適切な設定の範囲を考察し，その設定の差異による削減費用分析への影響に注目したが，他にもシナリオ変数として，将来のエネルギー価格の差異や各部門の対策技術オプションなどの諸設定・制約などがあり，それらに関する議論は行っていない．したがって，限界削減費用分析において，シナリオ条件の違いを考慮した定量的な分析を引き続き行い，限界削減費用の結果の解釈について分析を深めていく必要がある．

謝辞：本研究は地球環境研究総合推進費A-0808の支援を得て実施した．

参考文献

1) 地球温暖化問題に関する懇談会中期目標検討委員会（第7回，平成21年4月14日）
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/tikyuu/kaisai/index.html
2) 地球温暖化問題に関する閣僚委員会タスクフォース会合（中間とりまとめ，平成21年12月11日）
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/t-ondanka/
3) United States Environmental Protection Agency: Global Mitigation of Non-CO_2 Greenhouse Gases, EPA 430-R-06-005, 2006
4) Loulou, R., Goldstein, G., and Nobel, K.: Documentation for the MARKAL Family of models, Energy Technology Systems Analysis Programme, 2004
5) Remme, U. and Tosato, G.C; The Global ETSAP-TIAM model - Features and Scenarios for a Low Carbon Society, 2nd International Expert Meeting on Bottom-up Based Analysis on Mitigation Poltential, 2008
6) McKinsey and Company: Pathways to a Low-Carbon Economy, 2009
7) International Council of Chemical Associations; Innovations for Greenhouse Gas Reductions - a life cycle quantification of carbon abatement solutions enabled by the chemical industry, 2009
8) Amann, et al ; Potentials and costs for greenhouse gas mitigation in Annex I countries – methodlogy-, IIASA Interim Report IR-09-043, 2009
9) Amann, M., Cofala, J., Rafaj, P., and Wagner, F.; The Impact of the Economic Crisis on GHG Mitigation Potentials and Costs in Annex I countries, 2009
10) Rafaj, P., and Hohne, N.; GHG mitigation potentials in Annex I countries Comparison of model estimates for 2020, IIASA Interim Report IR-09-034, 2009
11) (財)ベンチャーエンタープライズセンター；ベンチャーキャピタル等投資動向調査報告書/ファンド・ベンチマーク調査報告書，2008
http://www.vec.or.jp/category/data/houkoku/
12) 高橋健太郎；投資分析の障害を取り除くものは何か？，持続可能なアジア太平洋に関する国際フォーラム（ISAP 2010），2010
13) (財)地球環境戦略研究機関；CDM・JI プロジェクト関連データ，IGES CDM 投資分析データベース
http://www.iges.or.jp/jp/cdm/report.html
14) グロービス；MBA経営辞書 http://globis.jp/mk60
15) 中央環境審議会地球環境部会；目標達成シナリオ小委員会中間とりまとめ,2001
http://www.env.go.jp/council/06earth/r062-01/index.html
16) 省エネセンター；ESCO事業導入研究会報告書,1998
http://www.eccj.or.jp/esco/report01/index.html
17) Interngovenmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007, Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, Cambridge University Press

ASSESSMENT OF PAYBACK PERIOD AND ITS IMPACT ON GHG MITIGATION COSTS ANALYSIS

Tatsuya HANAOKA, Osamu AKASHI and Go HIBINO

The objectice of this paper is to assess the range of payback periods and specific discount rates for investments, and its impact on GHG mitigation cost analysis. Due to uncertainty of technology information and different circumstances of dicision makers, there is a certain range of payback periods and discount rates for investments. This study analyzes three scenarios from low to high discount rates for investments, and it is found that settings of discount rates have a significant impact on results of GHG mitigation cost analysis, especially in the developed countries. It is important to analyze mitigation costs under a long payback period and expose overall mitigation potentials from the social planning perspectives.