

東京大学 公共政策大学院

ワーキング・ペーパーシリーズ

GraSPP Working Paper Series

The University of Tokyo

GraSPP-DP-J-10-001

多基準多様性分析の熟議的実践
日本におけるエネルギーのベストミックスに関する考察

吉澤 剛

2010年4月

GraSPP
THE UNIVERSITY OF TOKYO

GraSPP Discussion Paper J-10-001

GRADUATE SCHOOL OF PUBLIC POLICY
THE UNIVERSITY OF TOKYO
HONGO, BUNKYO-KU, JAPAN

GraSPP
THE UNIVERSITY OF TOKYO

GraSPP-DP-J-10-001

多基準多様性分析の熟議的実践

日本におけるエネルギーのベストミックスに関する考察

吉澤 剛¹⁾

2010年4月

1) 東京大学公共政策大学院 特任講師

〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

g-yoshizawa@pp.u-tokyo.ac.jp

注：著者の所属、連絡先はいずれも執筆当時のものです。

目次

1. はじめに	3
2. 手法	3
3. 結果	6
3-1. 多基準マッピング	6
3-2. 多様性最適ポートフォリオ	12
3-3. エネルギーミックスの評価者間比較	24
3-4. 二次元尺度構成法	26
4. 議論	29
4-1. ベストミックスに関する考察	29
4-2. 教訓	29
(1) 上限制約範囲についての事前の合意	29
(2) 上限制約とパフォーマンス評価との関連づけ	30
(3) 下限制約	30
(4) 集合制約の設定の自由度	30
(5) オプションの多種性	30
(6) オプションの相違性	30
(7) 熟議の意義	31
(8) 熟議後のパフォーマンス評価、上限制約の見直し	31
(9) パフォーマンス評価と多様性最適ポートフォリオとの連動	31
4-3. ワークショップの再設計	31
5. 結論	32
謝辞	33
参考文献	33

1. はじめに

エネルギー資源の多くを輸入に依存するわが国では、多様なエネルギーオプションの開発・普及に適切に投資していくことが求められる。しかしベストミックスに関するこれまでの分析では、経済性や二酸化炭素排出量以外の基準や各オプションのパフォーマンスの不確実性の考慮はほとんどなされていない。本研究では定量的手法とステークホルダーによる熟議型の定量的手法を組み合わせた多基準多様性分析の方法論を開発・実践し、ステークホルダーによるエネルギー多様性についての見解やその相違を図示するとともに、国のエネルギーバランスに関する合意形成や意思決定のあり方について政策的・社会的含意を示す。

エネルギーオプションの多様性についての研究は、費用便益に基づく経済的分析（e.g. 電気事業連合会 2004）が中心であり、地球温暖化問題で近年は二酸化炭素排出量（e.g. 電力中央研究所 2000）も考慮に入れられるようになったが、スピルオーバー、技術的・地政学的リスク、資源制約、社会受容性など幅広い基準や各オプションのパフォーマンスの不確実性が考慮されているとは言いがたく、データそのものも不足している。なお、これは日本における調査研究に限ったことではなく、欧米でも同様の傾向が見られる。こうした状況で、スターリング（Stirling 1997）は多基準マッピングというコンピュータベースの定量的手法を発案・設計した。これは不確実性のある評価項目について、区間データを入力して項目間の重み付けをすることで、主観的判断による多基準評価を助け、結果をグラフ化するというものである。また、彼は多様性の概念が多種性・均衡性・相違性という3つの要素からなっていることを理論的・数学的に導き、多様性分析という手法の設計を行い、これを基にしたステークホルダーの熟議による社会的意思決定のあり方を描いている（Stirling 2007）。著者は2007年7～10月に多基準マッピングのソフトウェアMC-Mapperの出力データを利用し、Matlabで書かれた多様性最適ポートフォリオの計算コードと接続するためのExcelマクロプログラムを独自に開発した。その試験運用のため、スターリングらとともに日英のエネルギー関係者9名へのインタビューを行った。そこでそれぞれの国の文脈におけるエネルギーオプションについて個別に多基準多様性分析を実施してもらい、得られた結果を分析・考察したものを2008年に発表した（Yoshizawa, Stirling & Suzuki 2008）。本稿の理論的なフレームワークはそちらを参照されたい。

上記研究から得た実践上の課題としては、それぞれの関係者の評価・分析はあまりにも多様であり、また分析者がそれらの結果を任意にまとめることの正統性と技術的難しさであった。そこで、本研究では、日本におけるエネルギーオプションのベストミックスを探るという目的のもと、エネルギー関係者や一般市民からの知見を統合するだけでなく、参加者の評価を得た後、ワークショップ形式によりお互いに熟議する場を設ける。熟議後の評価も実施し、熟議の効果を探るとともに、より合意的なベストミックスのあり方も併せて展望する。

2. 手法

本研究の主題は、2030年の日本における一次エネルギーの発電電力量のベストミックスである。コストや環境負荷、セキュリティなどの多基準な観点から各オプションのパフォーマンスを評価し、全発電電力量に占める各オプションの多様性を見るためにパフォーマンスと多様性のトレードオフをシェアの推移で表現する「多基準多様性分析」（Multi-Criteria Diversity Analysis; MCDA）という手法を採用する。各個人が行う多基準多様性分析手法については、2008年の調査研究（Yoshizawa, Stirling & Suzuki

2008)と同じ様式に従い、多基準マッピングソフトウェア MC-Mapper によるパフォーマンス評価と、Excel マクロによる多様性評価を経て、Matlab で書かれた多様性最適ポートフォリオ出力コードに接続した。ただし、評価者による作業負担の軽減のため、Excel マクロは「基本」スプレッドシートのみを用い、「オプション」「ディスパリティ」「相互作用」「感度」のスプレッドシートは未使用とした。

熟議のためのワークショップは 2010 年 2 月に 3 時間かけて実施した。多基準多様性分析における評価者となるワークショップ参加者はエネルギー政策全般に知見の深い大学研究者・学生を中心とした 6 名である。少人数ながら若手からシニアまで幅広い年代を確保し、また、専門外の一般市民も同様にワークショップに参加してもらうなどして、参加者の経歴や知識レベルに幅を持たせるようにした。また、参加者をそれほど多くせず、かつ筆者がファシリテーターを務めることで、全体での議論が適度に弾むように配慮した。このワークショップは成果を具体的な政策提言に結びつけない実験的なものであり、参加者が現在の職業的立場を離れて自由に意思を表明できるよう、ワークショップの結果はすべて匿名化することとした。表 1 はワークショップ参加者の ID と所属である。

表 1 ワークショップ参加者

ID	所属（専門）
A	一般
B	大学研究者（エネルギー技術社会論）
C	修士課程学生（開発行政）
D	民間企業元エンジニア（原子力技術政策）
E	博士課程学生（エネルギー制度設計）
F	大学研究者（地域技術・産業政策）

これまでに開発された専用のソフトウェアを利用した多基準多様性分析手法を基盤にするため、PC による分析が不可欠である。そのため、ワークショップは、参加者それぞれが PC を利用できる演習室を利用した。参加者はワークショップの趣旨と方法論について説明を受けた後、以下のステップで分析を進めた。

1. 各参加者は MC-Mapper を用いて多基準マッピングを実施する。
2. 各参加者は自分の設定したエネルギーオプションについてそれぞれ総発電量に占める割合の上限値（上限制約）を設定する。
3. 多基準多様性分析のために開発された Excel マクロの「基本」スプレッドシートを用いて、1. のアウトプットデータを変換し、2. のオプション個別の上限制約のみを入力して、演算を行う。
4. Matlab ソフトウェアを用いて、3. のアウトプットデータから多様性最適ポートフォリオを描出し、その他の結果も併せて出力する。
5. 多基準マッピングの出力である総合ないし各評価項目のパフォーマンス順位と、多基準多様性分析の出力である多様性最適ポートフォリオの両方を用い、各参加者は自らの評価の着眼点について解説するとともに、出てきた評価結果を見て意見を表出する。
6. 他の参加者はそれを受けた質問やコメントを投げ、お互いの着眼点や評価結果について討議、熟議する。

7. 議論を自らの評価に反映するため、各参加者はふたたび1. ～4. を行う。

5. や6. の熟議プロセスはビデオにより録画と録音を行い、参加者同士の会話を文字に起こした。その記録を以下の分析結果と組み合わせて、なぜそのような評価を行ったのか、どのような意識に基づくものかを明らかにすることを試みた。

参照として MC-Mapper に初期登録したデフォルトのエネルギーオプションは、石油、石油+CCS、石炭、石炭+CCS、LNG、原子力、水力、地熱、太陽光、太陽熱、風力、バイオマス、廃棄物、波力、潮流、海洋温度差の 16 オプションである。波力、潮流、海洋温度差はまとめて海洋エネルギーとしても示している。デフォルトのオプション評価項目は、英国南東部エネルギーワークショップで用いたエンジニアリングコスト、気候変動インパクト、SO₂ 排出、対流圏オゾン、ダスト、土地利用、騒音、間接マテリアル投入量、間接エネルギー導入量、雇用、地域経済発展、社会受容性、核拡散、大惨事リスク、長期的セキュリティという 15 項目を参考として示しつつ、別セットとしてコスト、政治リスク、技術リスク、社会受容性、環境影響の 5 項目を掲げた。もちろん、各評価者はこれらデフォルトのオプション・評価項目に対し自由に追加や削除を行うことができる。

3. 結果

本章ではまず一次出力として、多基準マッピング、多様性最適ポートフォリオを評価者ごとに結果を示し、解説を加える。また、そこでは、ワークショップを通じた言説分析により、評価者がどのような観点で評価を行ったのか、言葉をそのまま引用する形で評価者自身に語らせることにした。次に、一次出力結果を総合的に分析したエネルギーミックスの評価者間比較、二次元尺度構成法を二次出力として棒グラフや分散図で示した。

3-1. 多基準マッピング

多基準マッピングはエネルギーオプションごとの総合的なパフォーマンスを横向きの棒グラフで示している。右側に値があるほどパフォーマンスが良い（例：コストが低い、環境負荷が低い、社会受容性が高い）ということである。棒グラフの左端がパフォーマンスの値の下限で、右端が上限にあたる。棒の長さが長いほど、そのオプションのパフォーマンスに不確実性が高いという評価になる。



図1 総合パフォーマンス順位 (A)

Aは16のエネルギーオプションを挙げており、他の参加者と比較して多い方にあたる。評価項目と重みづけは、コスト(56)、政治リスク(52)、技術リスク(51)、社会受容性(32)、環境影響(16)であり、その設定の仕方は標準的である。各評価においては下限値と上限値の幅を大きく取り、かつ、各オプション間の差異を抑えているため、最終的な多基準マッピングとしては不確実性が高いもののパフォーマンスとしては目立った特徴がない。それでも海洋温度差発電の評価が高く、逆に波力が低いという結果となり、海洋エネルギーの評価に差が出たことは特筆すべき点である。また、石油・石炭・LNG・原子力は不確実性が小さくなっており、水力を含めた再生可能エネルギーよりは安定的であるという判断をしたと見られる。水力の環境影響が低いことについて、Aはダムの影響を挙げている。



図2 総合パフォーマンス順位 (B)

Bは16のエネルギーオプションを挙げるが、「マイクロ水力」というオプション項目を独自に追加している。廃棄物は「バイオマス系区分になるのかな」として、オプションから削った。評価項目・重みづけとしては、単位あたりコスト(80)、発電量ポテンシャル(70)、社会受容性(60)、資源制約(80)、CO₂排出(90)、環境影響(75)、供給安定性(70)、エネルギーセキュリティ上のリスク(80)、経済的波及効果(60)である。不確実性は高いものの、総合的に原子力が最もパフォーマンスが良い結果となり、太陽光・太陽熱・風力が続いている。原子力は「結局上限で言うと良くなっちゃうという問題がありますね」と不確実性の幅が上に振れる分、パフォーマンス中間値で見る現在のポートフォリオでは最もパフォーマンスが良くなってしまふことを指摘している。環境影響において評価が厳しかった水力、単位あたりコストや発電量ポテンシャル、環境影響で厳しい評点がなされた地熱は再生可能エネルギーの中でもパフォーマンスが低い位置につけている。波力・潮流・海洋温度差の海洋エネルギーはほとんどの項目で評価が低く、それが総合的な結果にも反映されている。海洋関係は「環境的な意味では良いですけど」と断った上で、「見通しが分からない」ところや、「資源制約が波力とか潮流は日本で見るとやれるところが少ないんじゃないか」という点で、辛口の結果としている。社会受容性に関して、石油や石炭のCCSは「CCSが入るとかえって悪くなるんじゃないかという気がして、こう『どこかに注入します』とか言うところ…イメージ論的にダメなんじゃないか」として評価を下げている。地熱も「温泉絡みとか」の理由によって社会受容性は抑えられている。

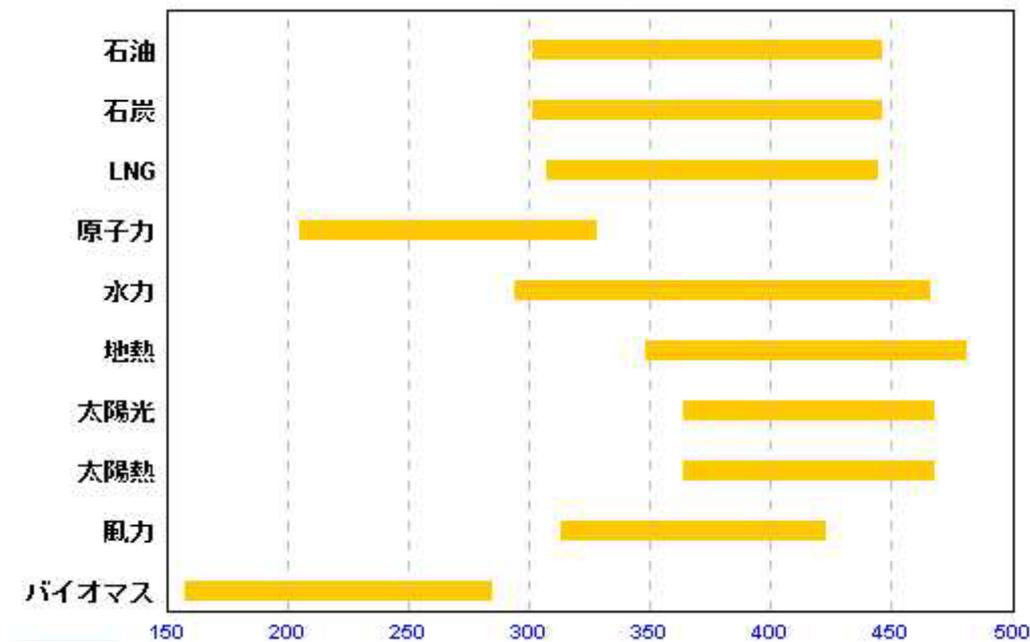


図3 総合パフォーマンス順位 (C)

Cはオプションを10に限るが、評価項目は技術リスク (50)、社会受容性 (20)、環境影響 (60)、途上国導入によるリスク (80)、大惨事リスク (80)、長期的セキュリティ (80)、資源の有限性 (10)、資源の配分 (100)、浪費誘発性 (100)、素人操作リスク (50)、設備投資 (20) の11と多く設定している。途上国導入によるリスクは「途上国が導入したことにより管理が甘くなるということ考えた」ということであるが、今回のワークショップでは日本の国内供給を考えているため、その文脈で再定義する必要がある。ここは該エネルギーオプションの供給システムの途上国導入が失敗したことにより、同様の国内供給システムの安全性が問われ、リスクが高まるという解釈に置き換えられよう。素人操作リスクについて、Cは太陽光や太陽熱など、個別住宅への設置において「専門家が入らないことによってリスクが発生してしまう可能性がある」と見ている。結果としては、地熱・太陽光・太陽熱の評価が高く、次いで水力・風力や石油・石炭・LNG がほぼ並んでいる。原子力は社会受容性、途上国導入によるリスク、大惨事リスク、長期的セキュリティの点で評点が抑えられ、パフォーマンスが低い。さらにバイオマスは、技術リスク、長期的セキュリティ、資源の有限性、資源の配分という観点から原子力よりも総合的なパフォーマンスが下がっている。Cは「太陽熱と太陽光がほとんど変わらないことと、地熱がなぜか高く入れたことについてはよく分かりませんので検証中です」としている。

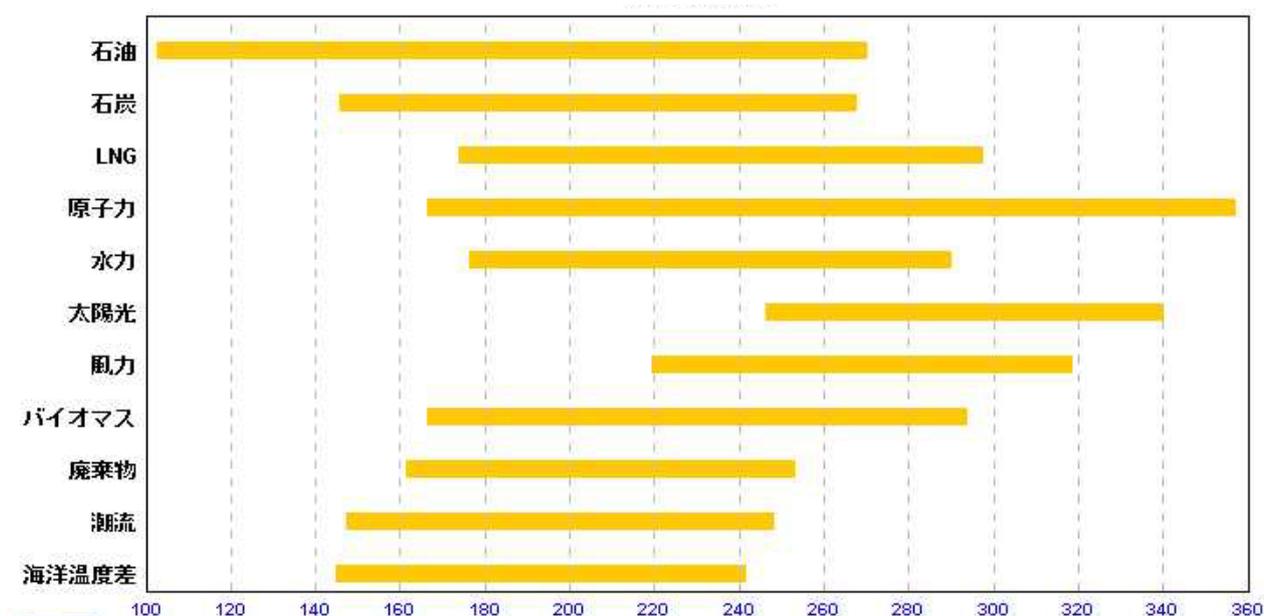


図4 総合パフォーマンス順位 (D)

Dは11のエネルギーオプションを同定しているが、石油と石炭はそれぞれCCSをこの中に含めているためである。各オプションに対してコスト(100)、実現可能性(81)、資源寿命(64)、社会受容性(65)、政治的リスク(40)、技術リスク(41)、技術改善余地(20)の点からパフォーマンス評価をしている。評価項目における実現可能性は導入規模や「やれって言ってすぐできるの?」といったリードタイムも含めたものである。そのため「もう既に使っているものについては可能性は高い」。水力、太陽光、風力はスペースの問題から実現可能性は低い。技術リスクは環境影響および核拡散を含む。また、技術改善余地とはすなわち開発可能性である。結果としては、太陽光、風力という再生可能エネルギーが高い評価を受けている。原子力はそれに続く形であるが、不確実性が高いため、上限値で見ると他のどのオプションよりも良い。「原子力に幅があるのは、今の軽水炉だと化石燃料に毛が生えた程度だけでも高速炉ができれば無限に近い」ためである。対して、石油は特にコスト、資源寿命、政治的リスクの点で下限値が低く見積もられ、全体として評価を下げている。



図5 総合パフォーマンス順位 (E)

Eは海洋エネルギーを一つにまとめ、オプション総数としては11である。評価項目は初期費用+メンテナンスコスト (40)、気候変動インパクト (35)、技術のイメージ (10)、立地の容易さ (15)、国際的政治変動リスク (15)、大事故リスク (15)、資源調達の容易さ (40)、安定性 (40) となっている。結果はそれぞれがかなり分散的であり、水力、海洋エネルギー、地熱に対して総合評価が高い。Eは「多様性が分かるように」ということで、パフォーマンス評価のグラフ自体に多様性を反映させようとしたと言うが、「最終的に最後の重みづけではあまり反映されなかった」と振り返る。水力はコストや政治変動リスクの低さ、海洋エネルギーや地熱は技術のイメージや立地の容易さなどにおいて優位なためである。石油や石油+CCSは気候変動インパクトや政治変動リスク、資源調達の容易さの点で厳しい結果となった。評価者本人は「石炭、LNGと石炭+CCSがもう少し上に来ると思いましたが」としているが、予想に反した結果である。

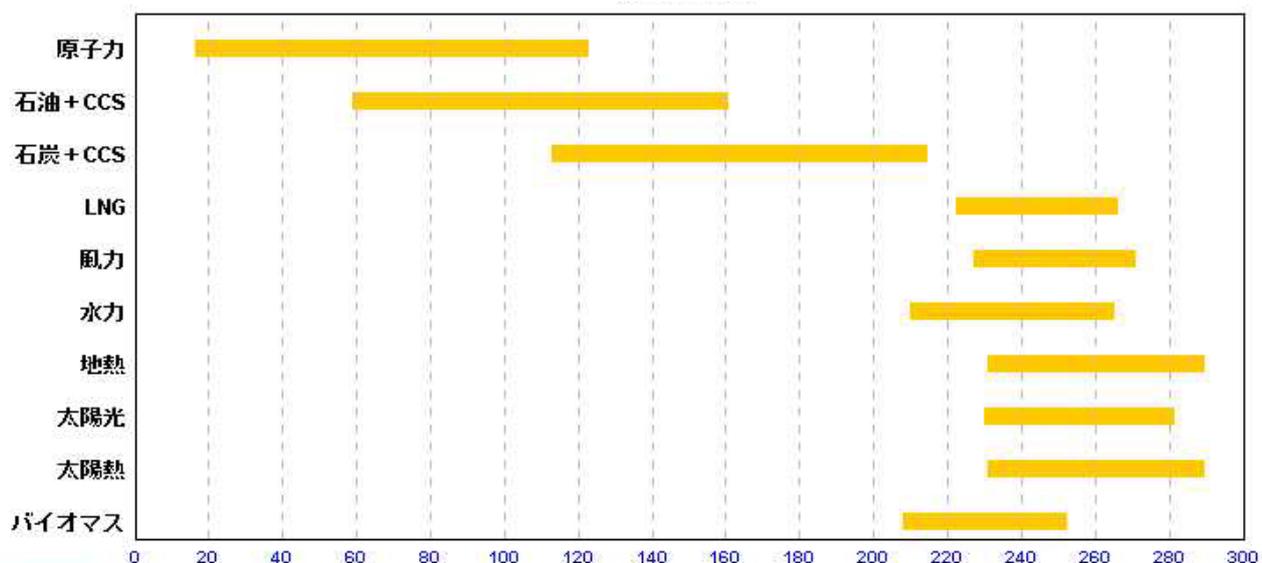


図6 総合パフォーマンス順位 (F)

Fの評価では、オプションのうち、石油や石炭はすべてCCSとなったという仮定がなされている。評価項目はコスト(80)、政治リスク(50)、技術リスク(81)、社会受容性(51)、環境影響(34)の標準的フォーマットを採用している。結果として、太陽熱・地熱・太陽光の再生可能エネルギー、それから風力、LNG、水力、バイオマスと続く。地熱について、Fは「日本は地熱が結構豊富なのでうまくやればコストが安くできるはず」と期待を込めている。LNGが他の再生可能エネルギーと同じような高い評点を受けていることが特徴である。石炭+CCSと石油+CCSでは、コストや政治リスクにおいて石炭に軍配が上げられている。また、原子力は評価項目すべてにおいて否定的な点が付けられており、総合では最も低い評価を受けている。

3-2. 多様性最適ポートフォリオ

多様性最適ポートフォリオは多基準多様性分析における最終的な Matlab 出力結果のうちの一つであり、パフォーマンスと多様性のトレードオフ関係におけるオプション割合（シェア）の推移が最も可視的で分かりやすい（図 7 ほか）。図では左端がパフォーマンスのみを考慮したシェアであり、右端が多様性のみを考慮したものとなっている。また、ポートフォリオにおけるパフォーマンスと多様性のトレードラインの 50%（パフォーマンス：多様性＝50：50）、55%（55：45）、60%（60：40）、75%（75：25）におけるオプションのシェアを割合の値として、評価者の初期設定と、熟議後の再設定の両方を示した。それに合わせ、評価者が Excel マクロで設定した上限制約を参照として同じ表に載せた（表 2 ほか）。

表 2 エネルギーオプションの上限制約とシェア（A）

オプション	初期評価					熟議後				
	上限制約	50%	55%	60%	75%	上限制約	50%	55%	60%	75%
石油	0.2	0.15	0.16	0.17	0.20	0.2	0.10	0.10	0.10	0.09
石油+CCS	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10
石炭	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10
石炭+CCS	0.2	0.13	0.11	0.09	0.01	0.2	0.10	0.11	0.11	0.13
LNG	0.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.2	0.08	0.08	0.09	0.11
原子力	0.2	0.03	0.03	0.04	0.12	0.2	0.20	0.20	0.20	0.20
水力	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
地熱	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01
太陽光	0.1	0.10	0.10	0.10	0.07	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10
太陽熱	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10
風力	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
バイオマス	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01
廃棄物	0.2	0.20	0.20	0.20	0.20	0.2	0.07	0.07	0.06	0.03
波力	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01
潮流	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01
海洋温度差	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01	0.005	0.01	0.01	0.01	0.01

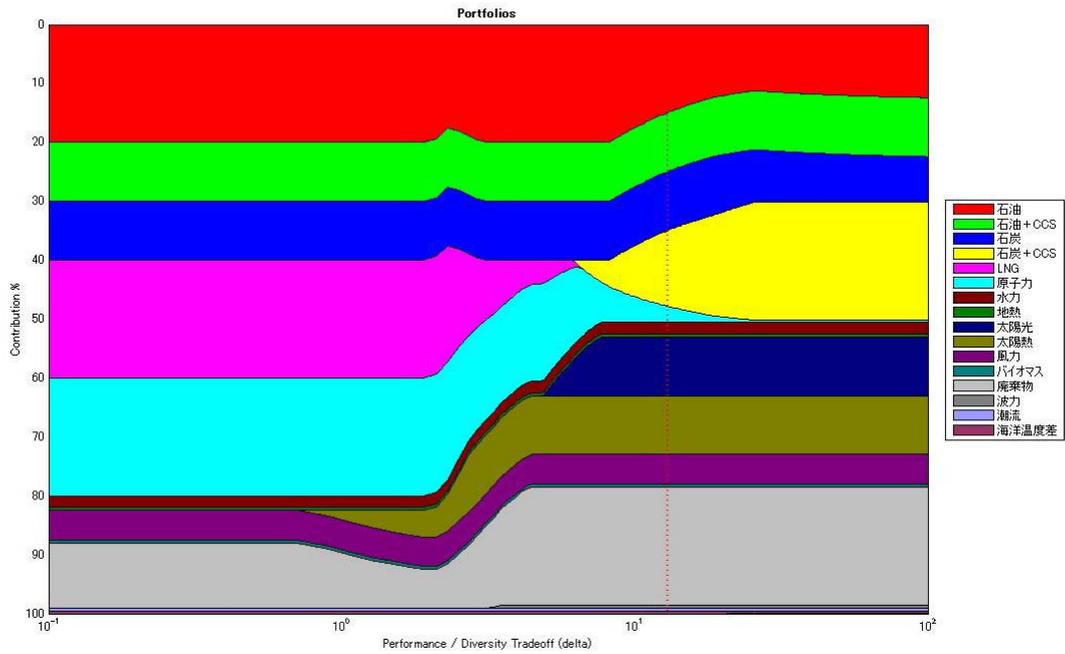


図 7 多様性最適ポートフォリオ：初期評価 (A)

制約条件が強く、全体的に静的なポートフォリオとなっている。多様性の増大に伴い、LNG と原子力が石炭+CCS、太陽光、太陽熱などに置き換わっている。潮流や海洋温度差は比較的性能が良い部類であるが、全体比率の1%に抑えられているため、主要な働きをしない。

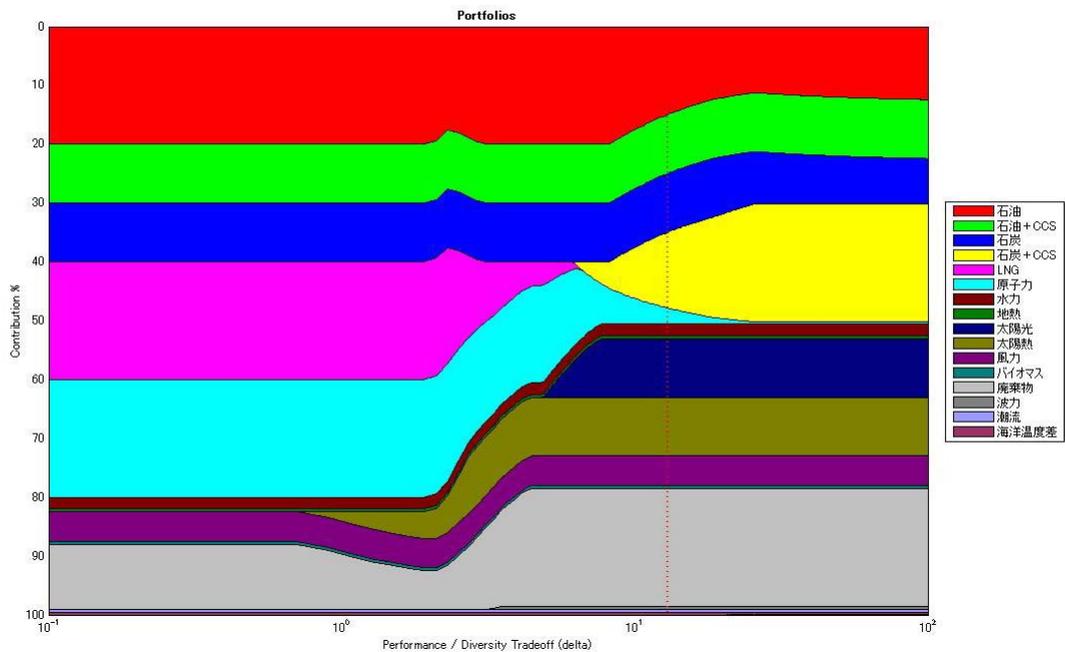


図 8 多様性最適ポートフォリオ：熟議後 (A)

表 3 エネルギーオプションの上限制約とシェア (B)

オプション	初期設定					熟議後				
	上限制約	50%	55%	60%	75%	上限制約	50%	55%	60%	75%
石油	0.3	0.08	0.07	0.06	0.02	0.3	0.06	0.05	0.04	0.00
石油+CCS	0.3	0.12	0.11	0.11	0.08	0.3	0.12	0.11	0.11	0.07
石炭	0.4	0.14	0.13	0.13	0.09	0.4	0.15	0.15	0.15	0.14
石炭+CCS	0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.4	0.00	0.00	0.00	0.00
LNG	0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.4	0.00	0.00	0.00	0.00
原子力	0.5	0.20	0.22	0.24	0.33	0.5	0.19	0.20	0.21	0.28
水力	0.15	0.02	0.01	0.00	0.00	0.15	0.02	0.02	0.02	0.03
地熱	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00
太陽光	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
太陽熱	0.15	0.10	0.10	0.11	0.13	0.15	0.10	0.11	0.11	0.13
風力	0.2	0.05	0.06	0.07	0.11	0.2	0.02	0.03	0.03	0.07
バイオマス	0.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.3	0.00	0.00	0.00	0.00
波力	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
潮流	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
海洋温度差	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
マイクロ水力	0.1	0.04	0.03	0.02	0.00	0.1	0.08	0.08	0.08	0.08

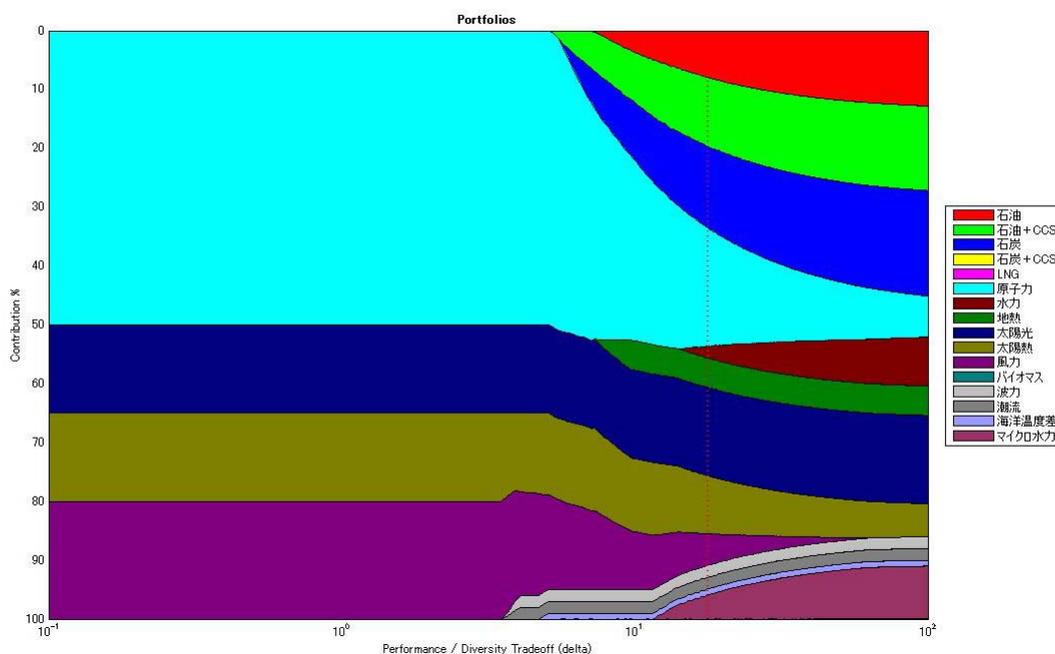


図 9 多様性最適ポートフォリオ：初期評価 (B)

最もパフォーマンスが良いと評価され、B いく「制約を…緩くした」原子力がポートフォリオでは支

配的であるが、多様性が増すに従って石油、石油+CCS、石炭が割合を伸ばしている。また、水力、マイクロ水力、地熱、海洋エネルギーなどが比率を高めている一方で、太陽熱や風力の割合は漸減している。石炭+CCS、LNG、バイオマスはオプションとしてパフォーマンスの面でも多様性の面でも重要度が低く、ポートフォリオに現れてこない。

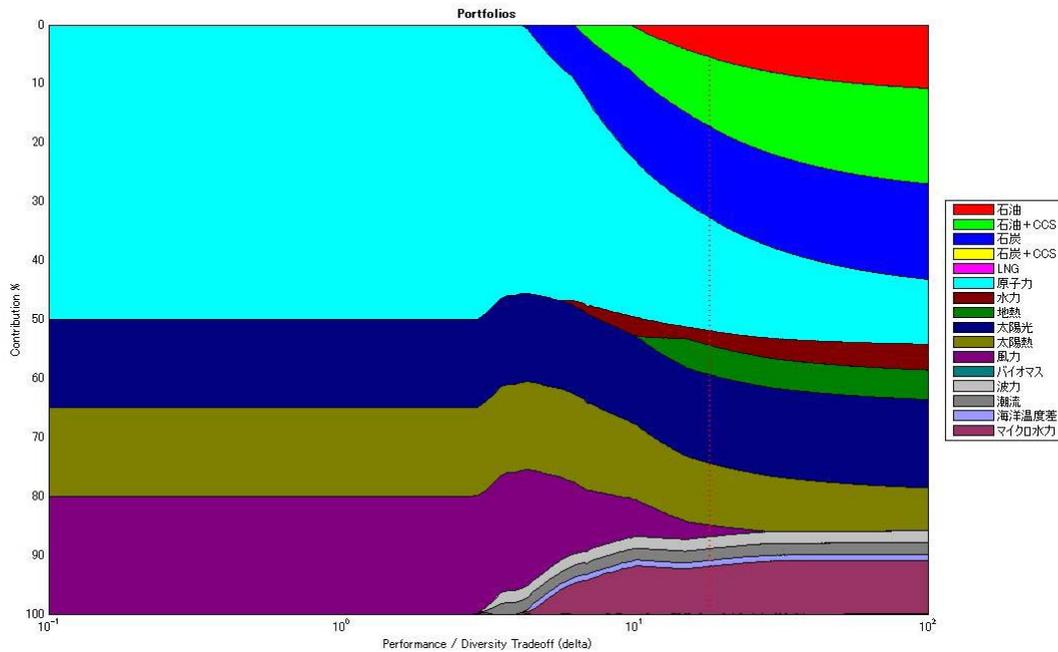


図 10 多様性最適ポートフォリオ：熟議後 (B)

表 4 エネルギーオプションの上限制約とシェア (C)

オプション	初期設定					熟議後				
	上限制約	50%	55%	60%	75%	上限制約	50%	55%	60%	75%
石油	1	0.10	0.10	0.10	0.10	1	0.28	0.28	0.28	0.27
石炭	0.8	0.10	0.10	0.10	0.10	0.8	0.02	0.02	0.02	0.02
LNG	1	0.21	0.21	0.22	0.25	1	0.13	0.13	0.14	0.16
原子力	0.5	0.42	0.41	0.41	0.39	0.5	0.41	0.40	0.40	0.38
水力	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
地熱	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
太陽光	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
太陽熱	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
風力	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
バイオマス	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

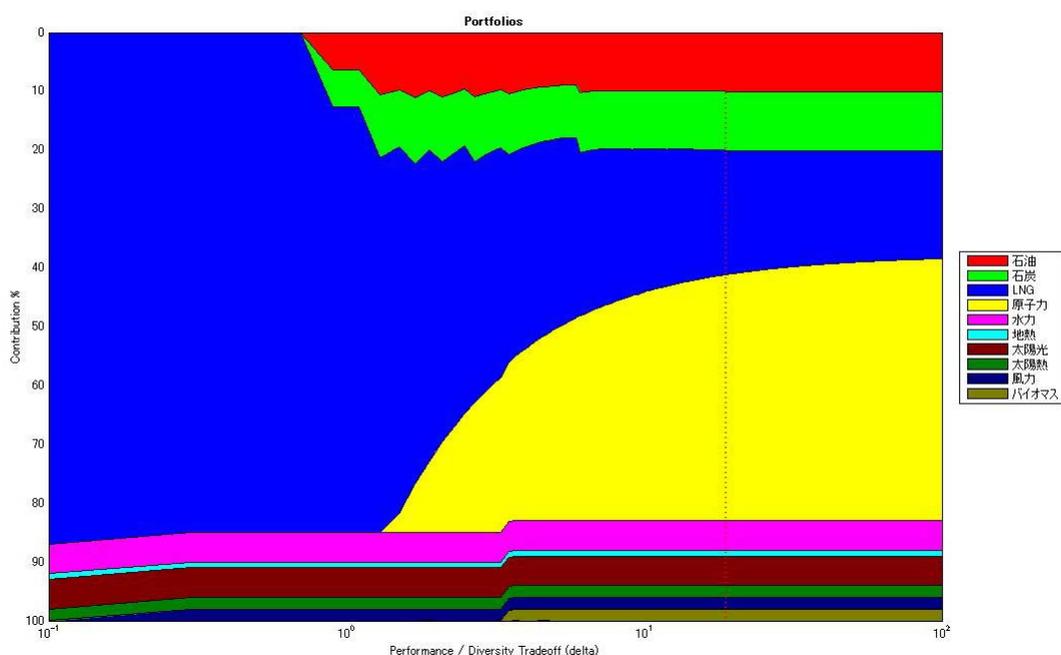


図 11 多様性最適ポートフォリオ：初期評価 (C)

地熱、太陽光、太陽熱などの再生可能エネルギーはパフォーマンスが比較的高いとされているが、導入割合の上限が低く抑えられているため、ポートフォリオでは支配的な位置を占めていない。それらを除いた従来型エネルギーでは LNG のパフォーマンスが良く、かつ上限値が特に設定されていないので、ポートフォリオで目立っている。多様性の上昇に伴い、石油、石炭、原子力がオプションとして入ってくるが、特に原子力は急激に立ち上がって LNG に置き換わるものとなっている。

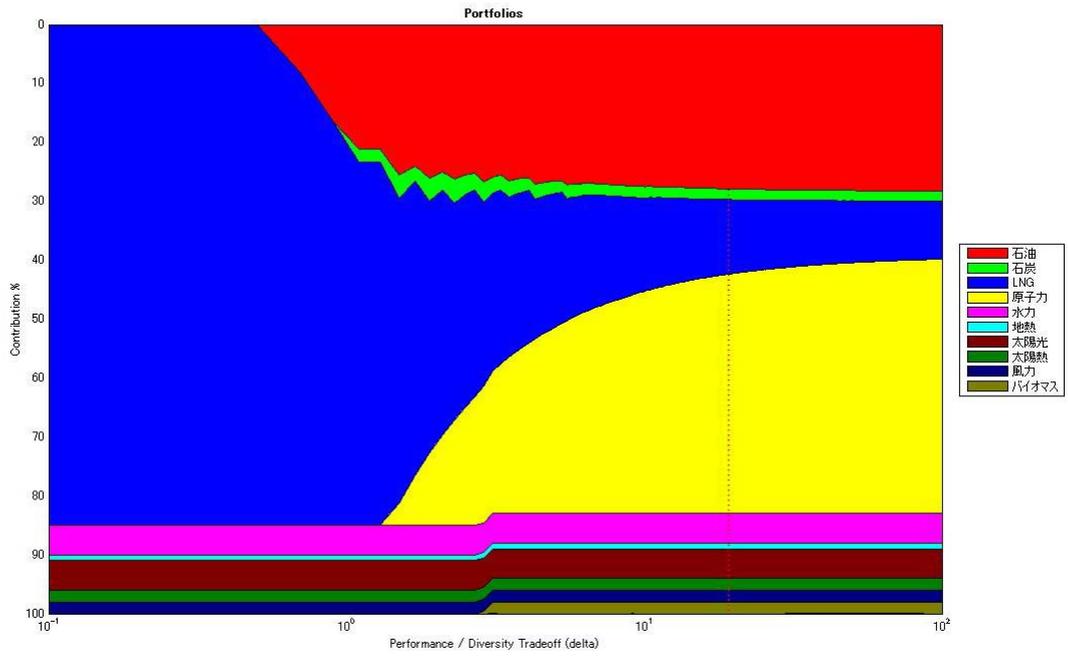


図 12 多様性最適ポートフォリオ：熟議後 (C)

表 5 エネルギーオプションの上限制約とシェア (D)

オプション	初期設定					熟議後				
	上限制約	50%	55%	60%	75%	上限制約	50%	55%	60%	75%
石油	0.2	0.18	0.17	0.15	0.10	0.2	0.20	0.20	0.20	0.15
石炭	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00
LNG	0.15	0.13	0.13	0.14	0.15	0.15	0.01	0.01	0.01	0.03
原子力	0.4	0.23	0.23	0.24	0.27	0.4	0.32	0.32	0.32	0.33
水力	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10
太陽光	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10
風力	0.1	0.07	0.07	0.07	0.10	0.1	0.08	0.10	0.10	0.10
バイオマス	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03	0.05	0.04	0.02	0.03	0.04
廃棄物	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
潮流	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
海洋温度差	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

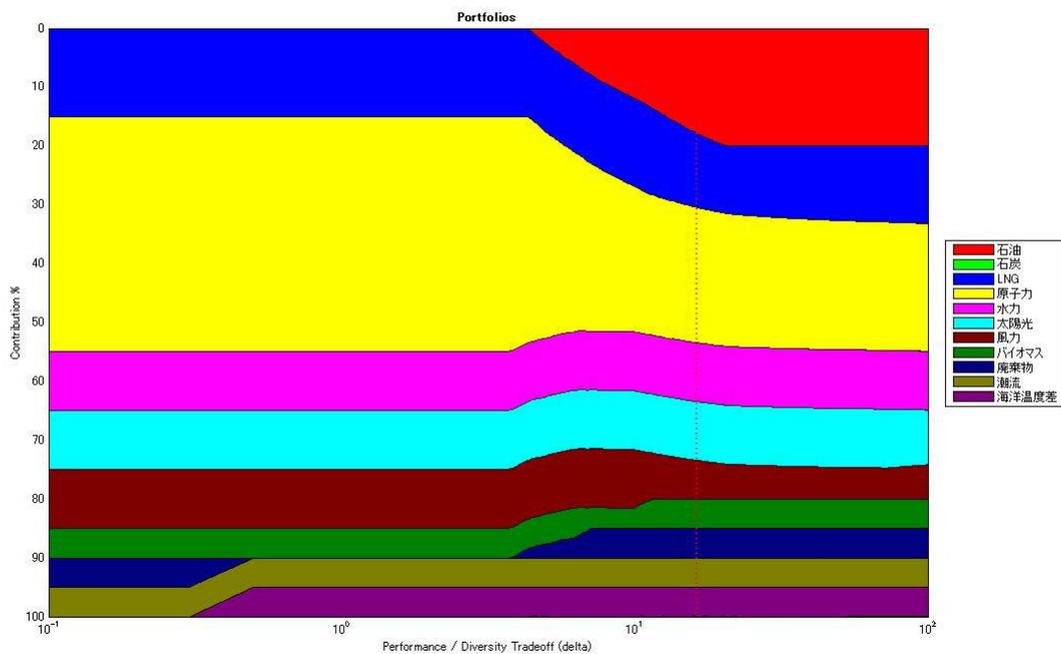


図 13 多様性最適ポートフォリオ：初期評価 (D)

各オプション上限制約が厳しく、多様性が増しても海洋温度差、追って石油が加わる程度で全体的なポートフォリオには大きな影響を与えない。また、石炭がオプションとしてまったく現れておらず、D 本人も「不思議」とであると訝るが、このポートフォリオの特徴となっている。

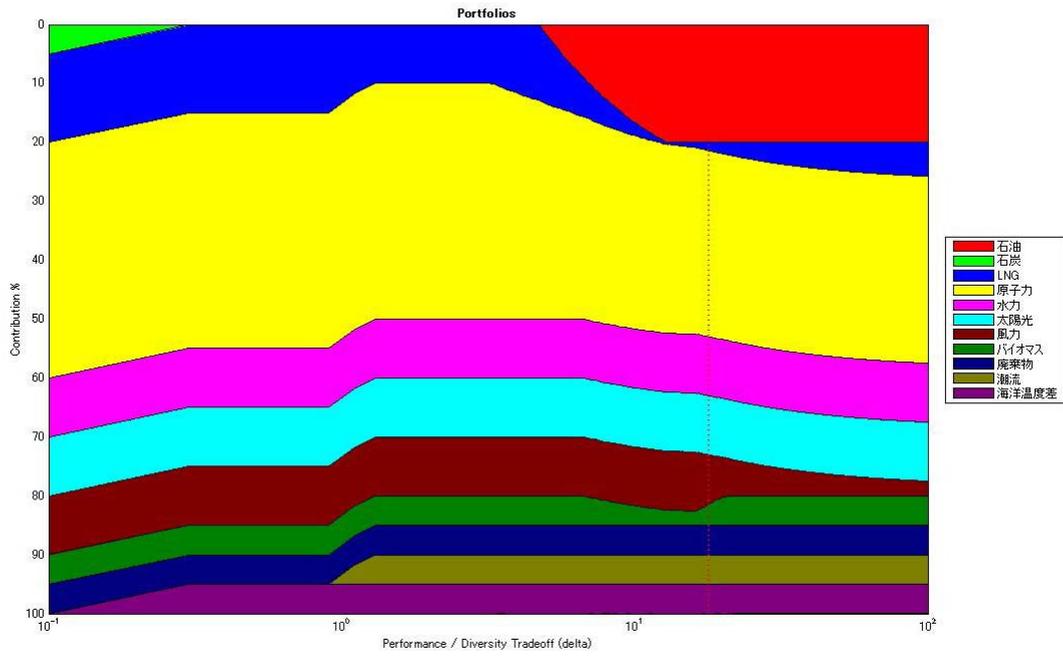


図 14 多様性最適ポートフォリオ：熟議後 (D)

表 6 エネルギーオプションの上限制約とシェア (E)

オプション	初期設定					熟議後				
	上限制約	50%	55%	60%	75%	上限制約	50%	55%	60%	75%
石油	0.4	0.24	0.24	0.23	0.19	0.3	0.26	0.25	0.25	0.22
石油+CCS	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.2	0.19	0.19	0.18	0.16
石炭	0.25	0.19	0.20	0.20	0.22	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
石炭+CCS	0.25	0.00	0.01	0.01	0.04	0.25	0.02	0.02	0.03	0.08
LNG	0.2	0.02	0.02	0.02	0.02	0.2	0.05	0.05	0.05	0.06
原子力	0.225	0.23	0.23	0.23	0.23	0.225	0.23	0.23	0.23	0.23
水力	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10
地熱	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
太陽	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
風力	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
海洋エネルギー	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

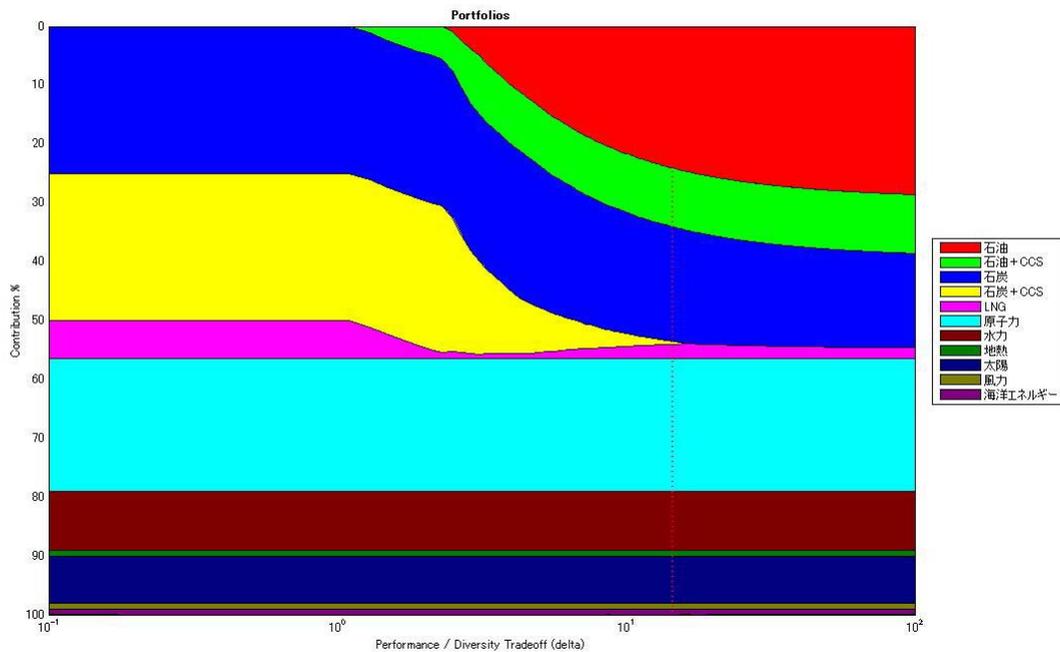


図 15 多様性最適ポートフォリオ：初期評価 (E)

化石エネルギーにおける配分がダイナミックに変化しており、石炭+CCSが石油に置き換わる構図となっている。Eは「気持ちとしては石炭を使うのがほぼCCSにしたいぐらいだったんですが」と感想をもらすが、むしろ石炭+CCSが多様性の増加とともに消えて、石炭はほぼ同じ割合で残り続けるという皮肉な結果となった。一方で、原子力や再生可能エネルギーは上限制約により多様性が増しても全体における割合は変わらない。

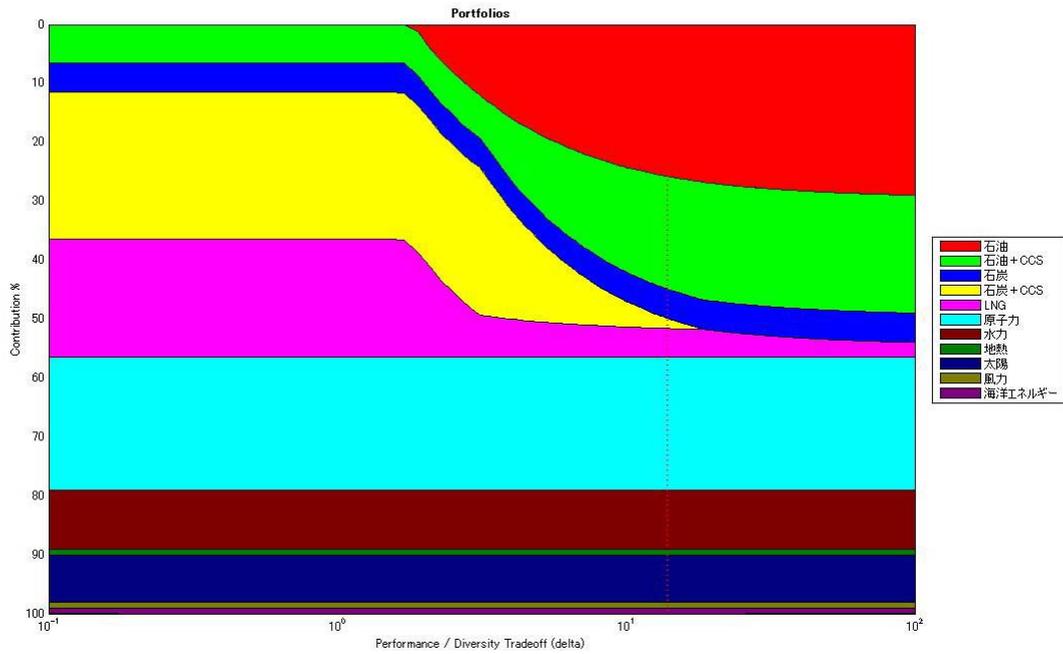


図 16 多様性最適ポートフォリオ：熟議後 (E)

参加者のうち、E だけ上限制約の変更を行っており、それが熟議後のポートフォリオに大きく反映されている。先に語った「石炭はほぼ CCS にしたい」との言葉通り、上限制約として通常石炭を 25% から 5% に下げ、それに合わせて通常石炭も 40% から 30% まで下げている。逆に石油+CCS は 10% から 20% まで上げている。この結果、上の図では多様性の増大に従って石油+CCS が前より強く出る一方、全体として石炭がシェアを減らしている。また、パフォーマンスが強く働くところでは、LNG がかなり存在感を増している。

表7 エネルギーオプションの上限制約とシェア (F)

オプション	初期設定					熟議後				
	上限制約	50%	55%	60%	75%	上限制約	50%	55%	60%	75%
原子力	0.3	0.14	0.13	0.11	0.02	0.3	0.14	0.13	0.11	0.02
石油+CCS	1	0.14	0.13	0.11	0.04	1	0.14	0.13	0.11	0.04
石炭+CCS	1	0.23	0.23	0.23	0.23	1	0.23	0.23	0.23	0.23
LNG	1	0.04	0.03	0.03	0.01	1	0.04	0.03	0.03	0.01
風力	0.3	0.24	0.23	0.22	0.18	0.3	0.24	0.23	0.22	0.18
水力	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10
地熱	0.2	0.00	0.01	0.03	0.09	0.2	0.00	0.01	0.03	0.09
太陽光	0.3	0.01	0.02	0.05	0.14	0.3	0.01	0.02	0.05	0.14
太陽熱	0.2	0.00	0.01	0.03	0.09	0.2	0.00	0.01	0.03	0.09
バイオマス	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.1	0.10	0.10	0.10	0.10

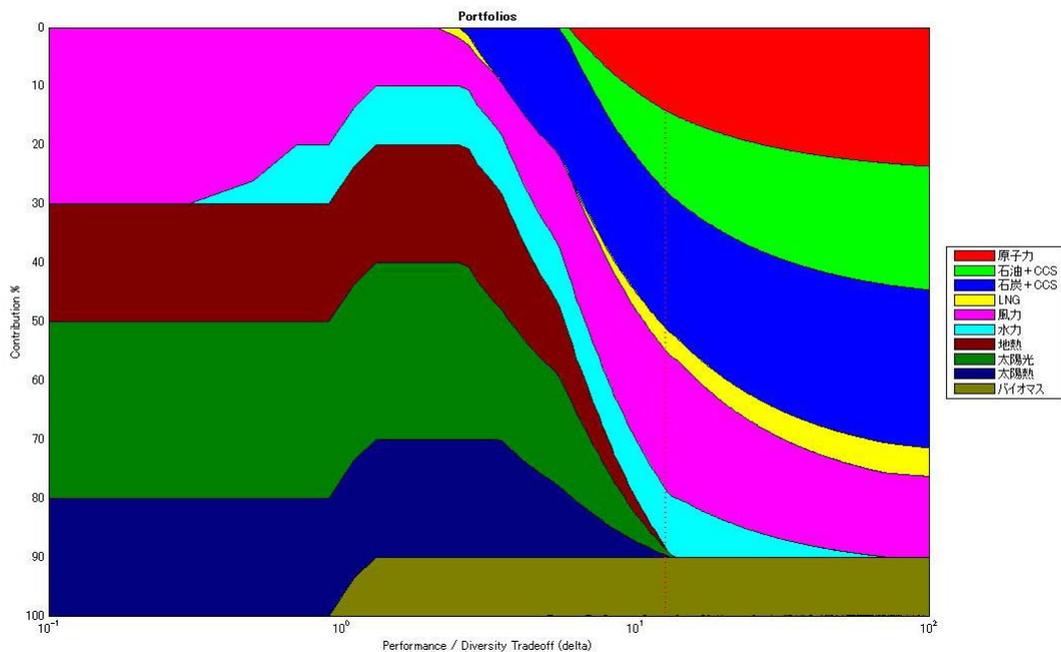


図17 多様性最適ポートフォリオ：初期評価 (F)

すべてのオプションがポートフォリオに現れ、かつ多様性の増大に伴って全体が大きく変化している。地熱、太陽光、太陽熱が急速に収束するなかで、原子力、石油+CCS、石炭+CCS、LNG がにわかに割合を増している。水力やバイオマスは早いタイミングでポートフォリオに入ってきている。

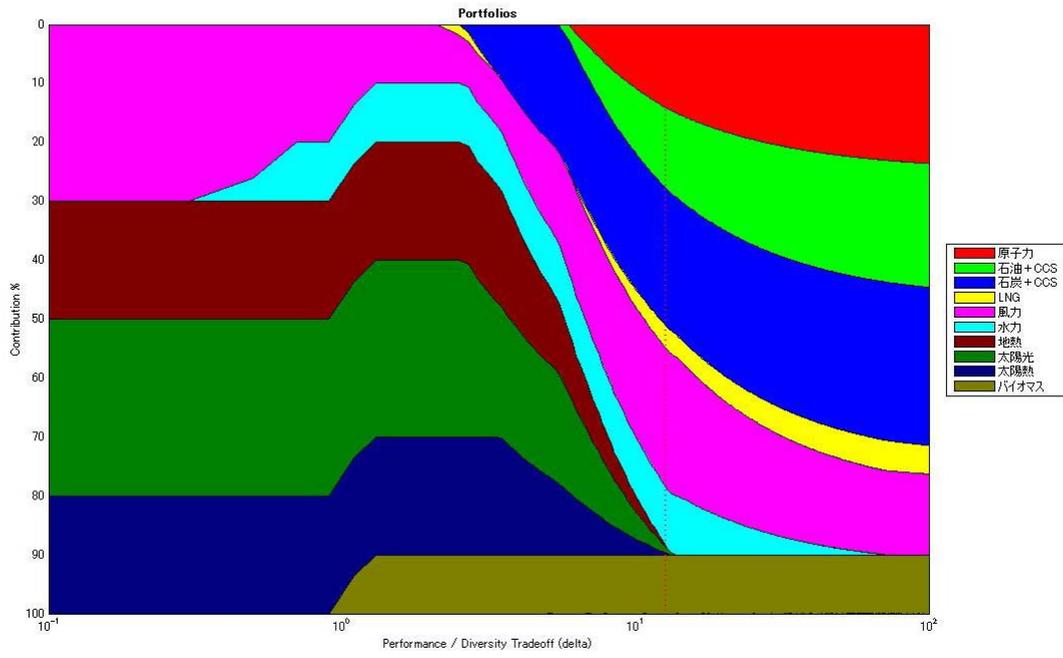


図 18 多様性最適ポートフォリオ：熟議後 (F)

3-3. エネルギーミックスの評価者間比較

多基準多様性分析の基盤となる多基準マッピングは、評価者ごとに自由に評価項目が設定できるという特徴がある。そのため、ワークショップ参加者間の比較分析をする際には、どのように評価項目を揃えるかという点について難しさがある。ここでの難しさは各評価項目のまとめ方における分析者の恣意性をいかに減らし、正統性を高めるかという意味においてである。

石油、石油+CCS については、一方に他方を含めるとしてオプションを設定している評価者が多いため、両者を併せて「石油+CCS」というオプション名に便宜上統一した。「石炭+CCS」も同様に、石炭のみのオプションを含めている。「太陽」は太陽光発電と太陽熱発電の両方を含めている。「海洋エネルギー等」は、波力、潮流、海洋温度差に加え、マイクロ水力を含めている。

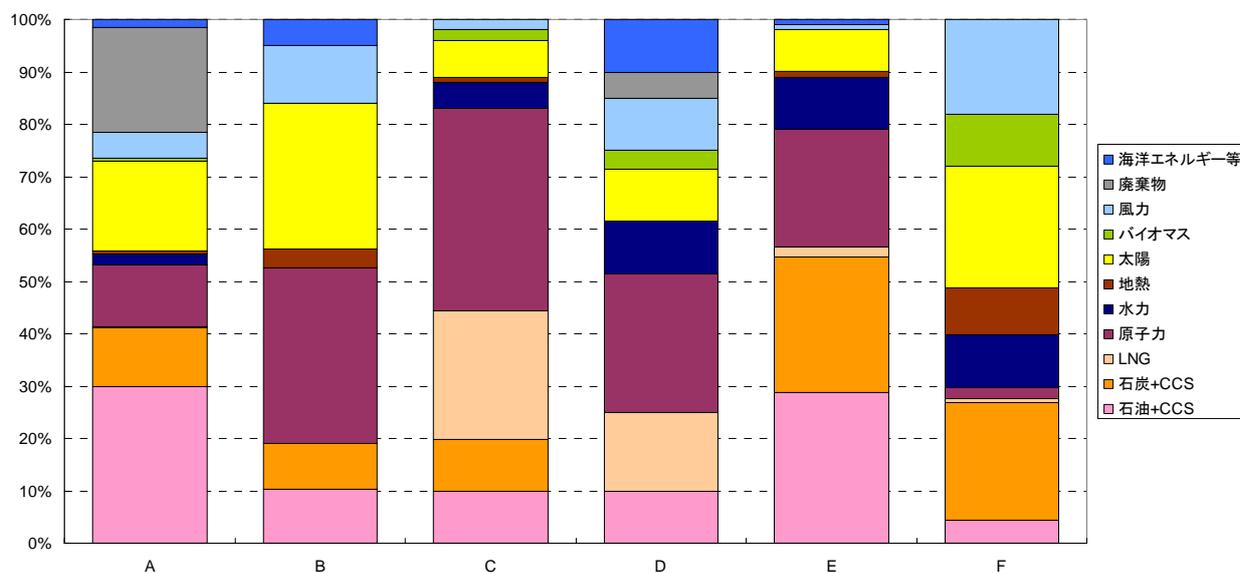


図 19 初期設定でのエネルギーミックス (パフォーマンス : 多様性=75 : 25)

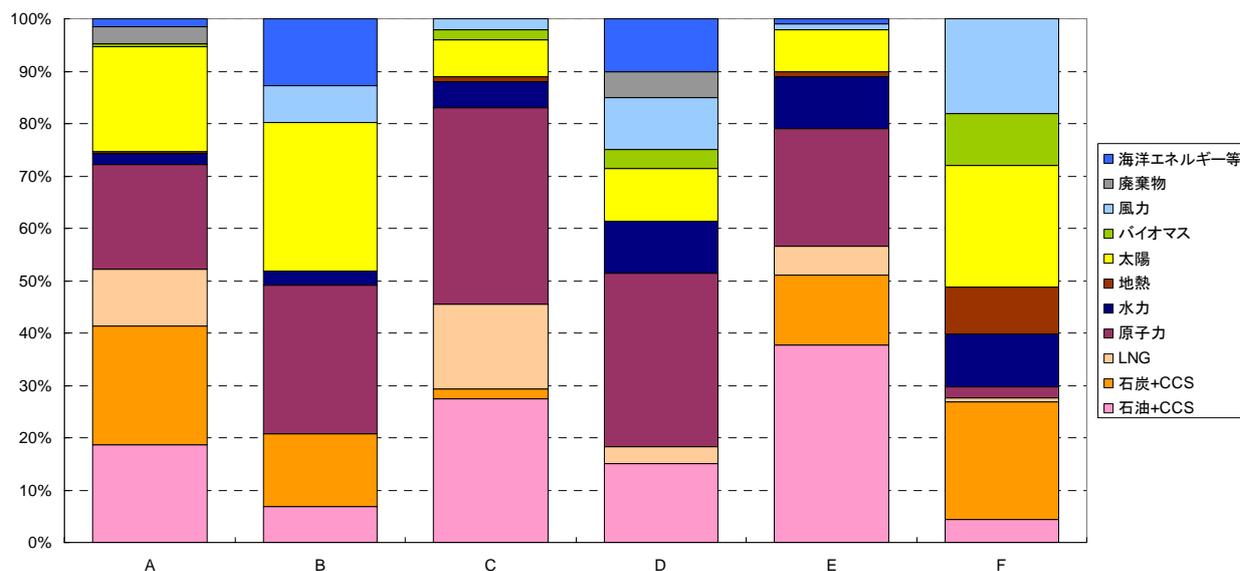


図 20 熟議後のエネルギーミックス (パフォーマンス : 多様性=75 : 25)

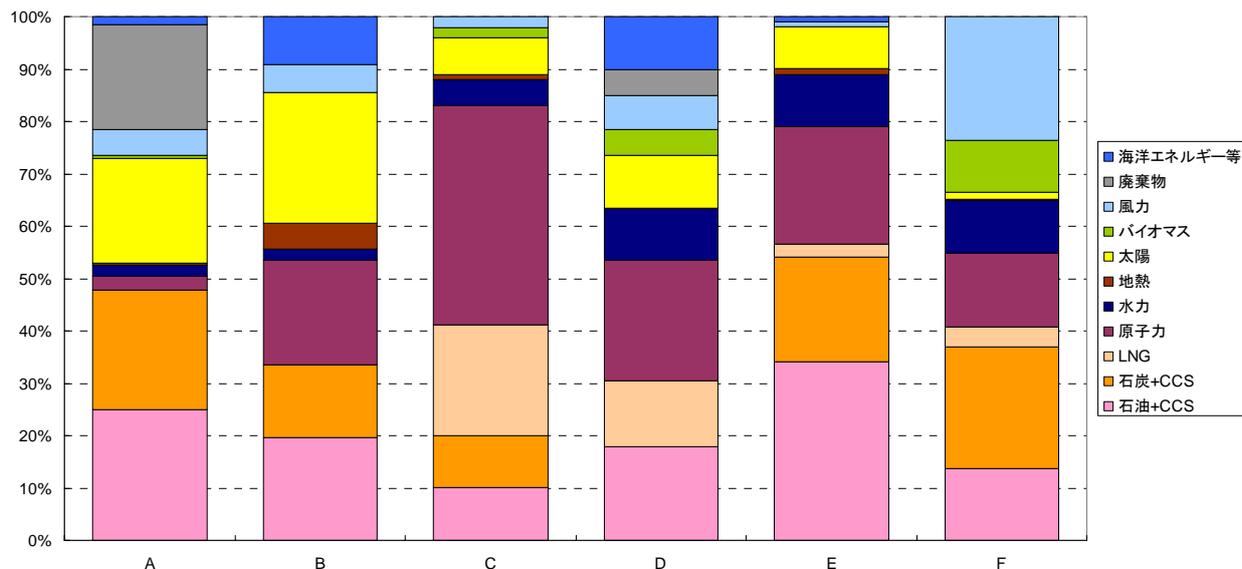


図 21 初期設定でのエネルギーミックス (パフォーマンス : 多様性=50 : 50)

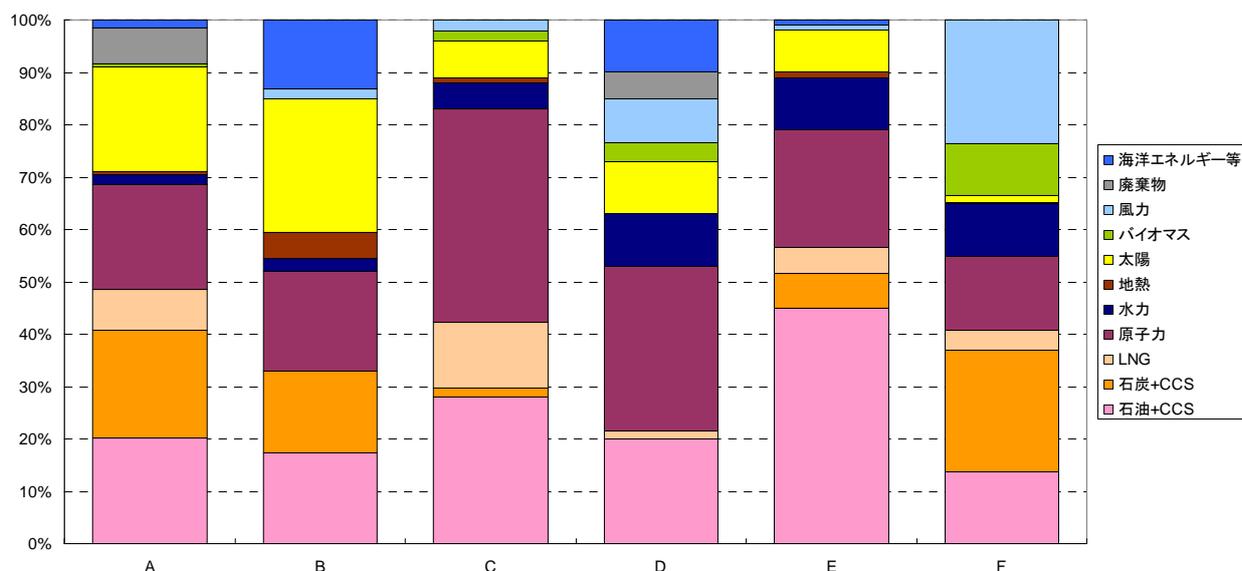


図 22 熟議後のエネルギーミックス (パフォーマンス : 多様性=50 : 50)

この棒グラフからは、各評価者の描いたエネルギーミックスがそれぞれ大きく異なっており、多様性の増大に伴ってその相違が解消されるわけではないことが分かる。このグラフをそれぞれ解釈して評価者間で比較することは労力を要するので、次節で二次元尺度構成法による分析を行い、より分かりやすい表現で考察することとする。

3-4. 二次元尺度構成法

主成分分析により、二成分を抽出し、それらを軸とした二次元平面に参加者を相対的に配置したものが以下の図 23～図 26 である。これは第一軸（横軸）と第二軸（縦軸）がそれぞれ第一主成分、第二主成分からなる二次元尺度構成法と見てよい。各軸を構成する因子負荷量は表 8 の通りであるが、負荷量が特徴的に大きい値を赤字で、小さい値を青字で示している。すなわち両軸が直交する二次元平面で横軸を構成する特徴的な因子は、右方向では原子力や石油+CCS、左方向では地熱やバイオマスとなる。大雑把に言えば、右方向に行くほど従来のように化石燃料や原子力エネルギーを主体に考え、左方向に行くほど逆に再生可能エネルギーの活用を中心的に考えている。縦軸については、上方向では石炭+CCS や廃棄物、下方向では原子力や LNG が特徴的な構成因子となる。縦軸の解釈は横軸より困難であるが、上方向に行くほど太陽や風力など分散型電源を持つ再生可能エネルギーや、CCS を伴う石油や石炭および廃棄物といった再生産型のエネルギーが強く、施設の建設から運用のフェーズまで環境に配慮した傾向を有していると言える。

表 8 オプションごとの因子負荷量

	第一主成分	第二主成分
石油+CCS	1.64	0.87
石炭+CCS	0.58	1.69
LNG	-0.33	-1.40
原子力	1.81	-1.75
水力	-0.33	-0.38
地熱	-1.10	-0.24
太陽	0.47	0.68
バイオマス	-0.92	-0.23
風力	-0.37	0.29
廃棄物	-0.83	0.67
海洋エネルギー等	-0.63	-0.43

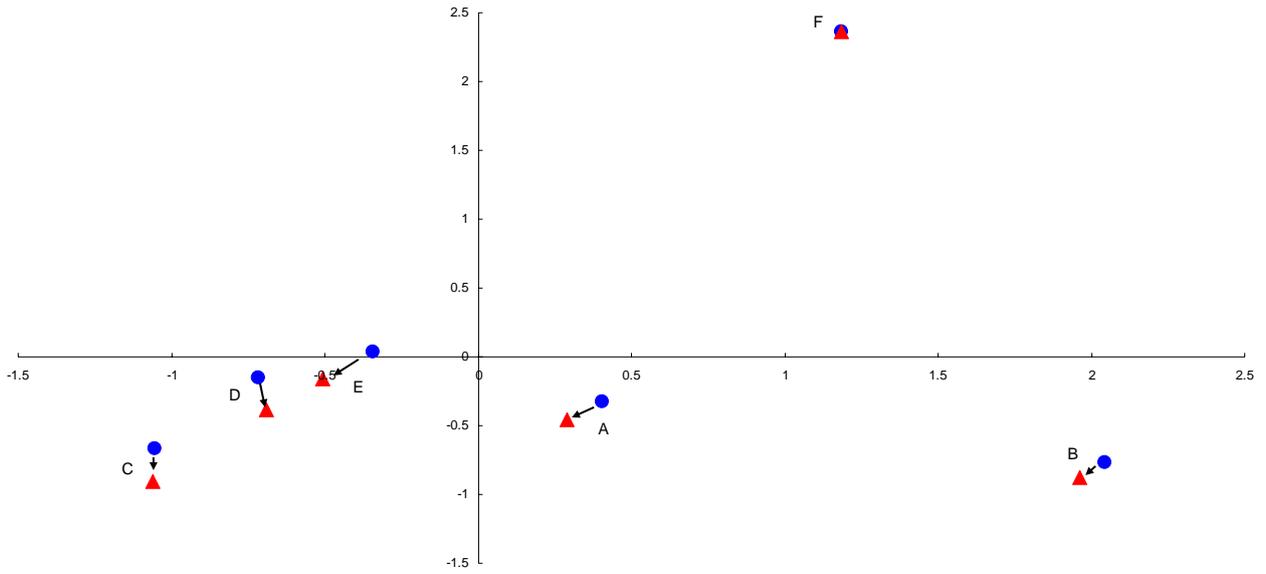


図 23 参加者の相対的配置と熟議後の変化（パフォーマンス：多様性=75：25）

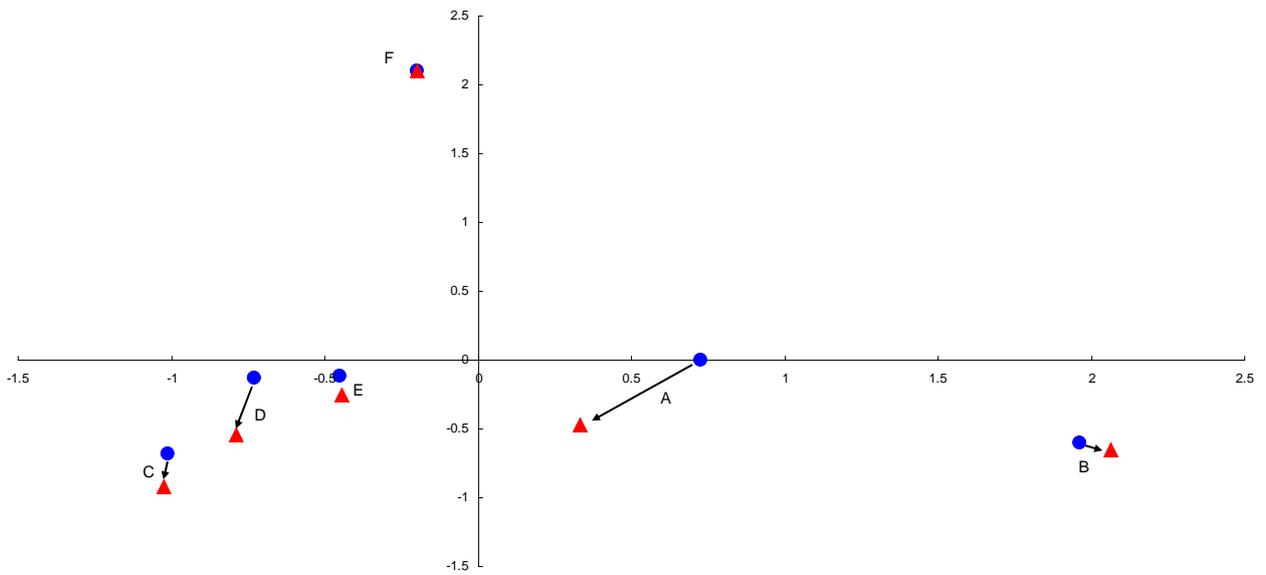


図 24 参加者の相対的配置と熟議後の変化（パフォーマンス：多様性=60：40）

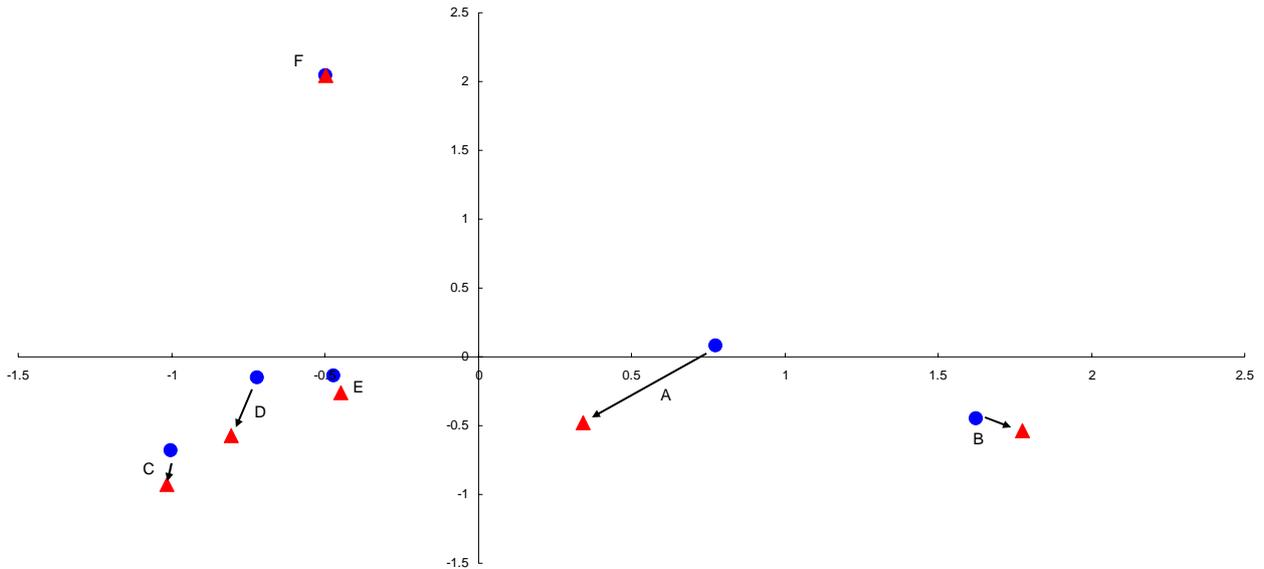


図 25 参加者の相対的配置と熟議後の変化（パフォーマンス：多様性=55：45）

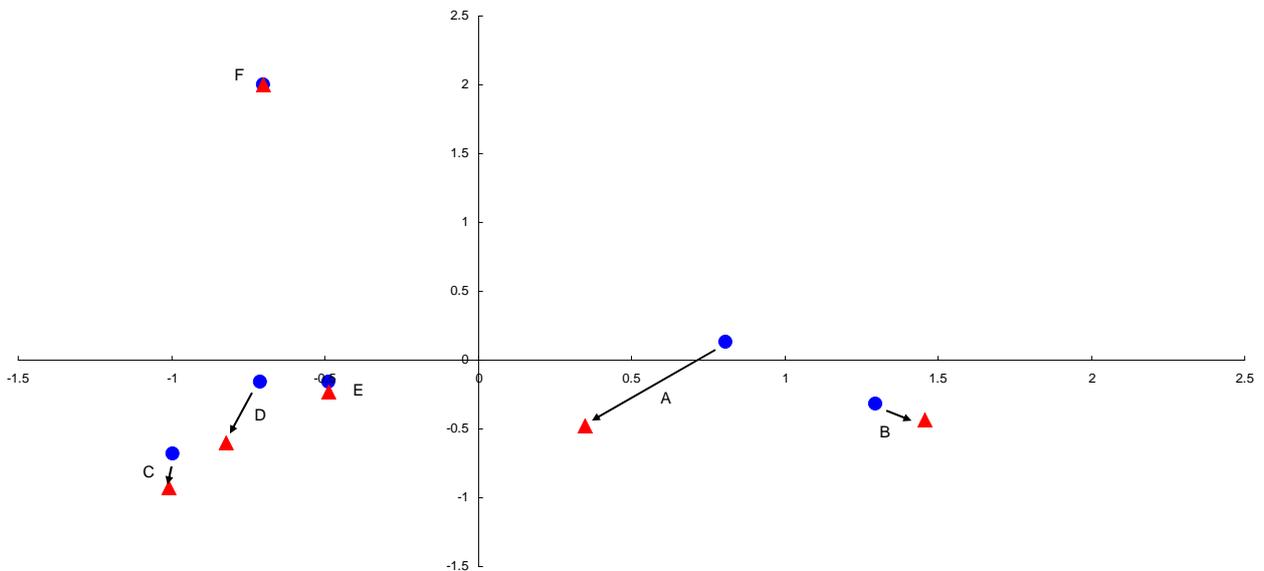


図 26 参加者の相対的配置と熟議後の変化（パフォーマンス：多様性=50：50）

多様性の増大に伴い、Bが他の参加者のオプション構成に近づいていることが分かる。だが、興味深いことに、熟議の後でBは他の参加者が示す見解の推移に逆行する向きに見解を移している。大きく見ると、A・Bの集団、C・D・Eの集団、Fという3グループが存在し、それは多様性の増大によってもグルーピングの見直しが必要となることはない。ただし、Fのポートフォリオは多様性の増大に従って大きく横軸に水平展開している。それは図17のポートフォリオを見れば理解しやすい。Fは風力、地熱、太陽光、太陽熱など新エネルギーの上限制約が緩いが、その他の参加者ではオプションの割合の上限制約が厳しく、パフォーマンスとしては優位に立つ新エネルギーのオプションがポートフォリオを通じて支配的になることはない。つまりF以外のポートフォリオはパフォーマンスから多様性への推移においても全体の割合の変化は乏しく、熟議によって互いの参加者が見解の歩み寄りを見せる余地は少なくなっている。

4. 議論

4-1. ベストミックスに関する考察

熟議後のパフォーマンス-多様性比率 50 : 50 および 75 : 25 のポートフォリオにおける A と E のデータのほぼ中間値を取ると図の零点になり、今回の評価者間での落としどころと見られる。

表 9 発電電力量におけるオプション別シェア

オプション	50%ライン	75%ライン	発電電力量 (2007 年)
石油+CCS	32	28	13.2
石炭+CCS	13	17.5	25.3
LNG	6	8	27.4
原子力	22.5	21	25.6
水力	6	6	6.6
地熱	1	1	-
太陽	14	14	-
バイオマス	0.5	0.5	-
風力	0.5	0.5	-
廃棄物	3.5	1.5	-
海洋エネルギー等	2	2	-

表 9 に示したように、現在の発電電力量シェアと比べると、今回の多様性分析では、石油 (+CCS) がシェアを大きくしている一方で石炭 (+CCS) がやや低めに抑えられ、また LNG が極端にシェアが少なくなっている。新エネルギーの各オプションでは上限制約のため LNG の減少分を回収できるだけのシェアを持ちえないので、石油がシェアを伸ばす結果となっている。

4-2. 教訓

多基準多様性分析のソフトウェア類やそれらを用いたワークショップの設計と運用において、今後改善すべき点や、成果として強調すべき点として以下が得られた。

(1) 上限制約範囲についての事前の合意

実用上は「パフォーマンスの多基準マッピング」や「多様性最適ポートフォリオ」を見て議論を深めるよりも各オプションの上限制約についてお互いに検討して、ある程度の範囲で合意を得ることがより重要であると見られる。上限制約はポートフォリオの左側であるパフォーマンス割合の初期条件を大きく規定し、ポートフォリオにおけるシェア推移にも強く抑制をかける。上限制約は政策的な誘導があったとしても物理的に導入しうる限界だと想定するということに参加者が同意できれば、議論はそれほど対立的にならないだろう。ここでのポイントは上限制約をあまり強くし過ぎないということである。2030 年という将来を考えると、現在のオプションのそれぞれのシェアに縛られすぎると、将来の選

択肢を狭めることにもなり、また、各アクターの見解の相違を許容しつつ、それぞれが納得しうるバランスを見出す可能性も減らす。

とはいえ、上限制約を緩くし過ぎることも現実的でない。実践からの教訓として、例えば、ある新エネルギーオプションの現在の供給割合が一次エネルギー全体の0.5%であったとしたら、上限制約はその2~3倍から10倍くらいの範囲で設定することが適当であると見られる。

(2) 上限制約とパフォーマンス評価との関連づけ

上限制約は「資源制約」や「開発可能性」といった評価項目として間接的に考慮されている場合、二重制約となる可能性もある。そのため、上限制約についての項目のオプション評価基準への組み込み、および上限制約の幅のパフォーマンス評価との連動がなされてもよい。

(3) 下限制約

日本ではたとえば石油、LNG、水力、原子力など、2030年時点で発電電力量に占めるシェアが0%となることはまず考えにくい。だが、多様性の増大に伴い、相違性の小さいLNGがポートフォリオから消える状況が多く発生しているので、結果の現実味が乏しくなっている。これを避けるには、特定のオプションに下限制約を設けられるようにすべきであろう。

(4) 集合制約の設定の自由度

今回のワークショップで扱わなかったExcelマクロにある「集合制約」は各オプションを意識しておらず、地球温暖化など大きな文脈に対応するものになっている。だが、現実には石炭と石炭+CCSで合算して上限25%などの意思決定が働くことがありうる。これは両オプション間の相互作用を調整しても抑えきれぬものではないので、こうしたオプションの細かいレベルでの分割に対応しうる自由度を確保する必要がある。

(5) オプションの多様性

上記に関連して、オプションをどこまで分割ないし細分化して考えるかということは、多様性の要素の一つである多様性(variety)に関わり、多様性最適ポートフォリオに少なからず影響する。多様性の効果を見るためには、オプションを細かいレベルまで分けておくことが必要であるが、(4)の集合制約設定ができるようにならなければ非現実的な多様性を持ったポートフォリオが描かれることになる。

(6) オプションの相違性

LNGは中庸であり相違性が他より低いために、多様性を重視したポートフォリオでは消えていくことになるという、前回の調査研究と同様の展開となった。現実のポートフォリオとの乖離を分析手法やアルゴリズムの問題に帰するのではなく、むしろ本当にLNGは中庸であるのか、パフォーマンス的にも特徴的も劣るオプションを採用しているのは他のオプションの実際上の上限制約があるためなのか、あるいは「中庸こそが特徴」という同定しづらい特徴項目をもっているためなのか、関係者の密な議論が期待されることとなったが、結果として時間内にきちんと詰められなかった。

一つの現実的な課題としては、LNG普及政策において、他電源に比べたときのLNGの特徴をもっと知らせる必要がある。専門家や一般にとって、パフォーマンスは良いが特徴が乏しいとみなされ、いくつかの多様性ポートフォリオでは明らかにシェアが限られている。

(7) 熟議の意義

熟議することでワークショップに参加した他の評価者の見解を知るという気づきを与えることは重要である。参加者にとって、単なる学習の機会を与えるだけではなく、異なる見解を持つ他の評価者に対して定量化・図示化手法によって自らの見解を明らかにし、説明責任を果たすという意味がある。また、学習という観点でも、本人が残したいエネルギーオプションは多様性の増加とともに残るとは限らず、オプションの価値を相対化する視点を自ら得ることができる。

(8) 熟議後のパフォーマンス評価、上限制約の見直し

熟議後の見直しについては一定の成果があったものの、評価者に改めて評価をするインセンティブの難しさが浮き彫りともなった。「確かに他の人の言っていることも頷けるが、だからといってそれに自分の評価を変えるほどの論拠があるわけではない」というような考えから、また再評価に要する負担・労力から、大きく評価を変えるという判断を留保する評価者が少なからず見られた。また、評価者の心理として、専門家であればあるほど自分の初期判断に自負があり、他者の見解で判断を大きく変えるわけには行かないという部分があったのではないかと推察される。逆に、素人であればあるほど他者の見解に左右されやすくなるが、自分の中に確かな判断軸があるわけではないので、どの見解を採用していか分分からず、結局自分が最初に感覚的に評価したものに近いところで諦めてしまう、という傾向も感じられた。この解決案としては、見解の近い二人の評価者が互いのマップを交換し、それを修正するという方法を取れば、改めてパフォーマンス評価に取り組むインセンティブが付与されると考えられる。あるいは最初から複数の評価者が熟議しながらパフォーマンス評価から多様性分析までの一連の手続きを共同して行ってもよい。

(9) パフォーマンス評価と多様性最適ポートフォリオとの連動

パフォーマンス評価である MC-Mapper の java プログラムの改訂を目指したが、作者からソースコードが入手できなかった。本来であれば、多基準多様性分析の Excel マクロのうち、基本機能である個別・集合の上限制約やパラメータ設定などを java プログラムの中に実装し、その出力を Matlab 用の入力に直接接続すればより効率的であった。各参加者の PC 上で MC-Mapper からポートフォリオ出力まで簡易に行えれば、参加者自身がポートフォリオを見ながら内省する時間や、データを修正する機会がもっと十分に与えられたといえる。

4-3. ワークショップの再設計

より良い多基準多様性分析とそれを用いた熟議のあり方を考えると、理想的には例えば次のようなスケジュールでワークショップを1日半かけて行うことが望ましいのではないかとと思われる。

1日目：エネルギーオプションについて

13:30～16:30 現在のエネルギーガバナンスについての講演

(技術、経済、環境、セキュリティ) 各 45分

16:30～18:00 エネルギーオプションおよびその上限制約についての議論

2日目：評価について

- 9:00～10:30 オプション評価基準についての議論
- 10:30～12:30 パフォーマンス評価
- 13:30～15:30 各参加者によるプレゼンテーション・討議
(オプション・上限制約・評価基準の厳格化)
- 15:30～16:30 再びパフォーマンス評価

あるいは1日のワークショップに詰めることも可能かもしれず、多忙な各アクターの参加を実現するにはこちらの方が現実的である。

- 10:00～11:20 現在のエネルギーガバナンスについての講演
(技術、経済、環境、セキュリティ)各20分
- 11:30～13:00 エネルギーオプションおよびその上限制約についての議論
- 14:00～14:30 オプション評価基準についての議論
- 14:30～15:50 パフォーマンス評価
- 16:00～17:30 各参加者によるプレゼンテーション・討議・パフォーマンス評価
(オプション・上限制約・評価基準の厳格化)

熟議を経た後の2回目の評価であるが、ワークショップの目的がより実質的な成果を求めるのであれば4～6名の少人数でいくつかグループを作り、グループ内で合意しうるように一つの多様性最適ポートフォリオを作成することがよい。一方で、より学術的成果を追求するのであれば、今回のように改めて各個人がパフォーマンス評価やポートフォリオ作成を行うことがよいだろう。あわせて、専門家からの講演を1回目と2回目との間に挟んで自分のももとの感覚と現在の定量的なデータとのギャップを掴むことができるようにすると面白い。実質的な成果を求めるのであれば初回よりも2回目を、学術的成果を求めるのであれば2回目よりも初回の評価時間を多く確保しておく必要があると見られる。あるいは、実質的成果を重視するのであれば、今回のように評価→熟議→評価とするのではなく、最初から少人数で熟議しながら評価という形に簡略化すべく、ワークショップの後半部分は次のようにしてもよい。

14:30～16:30 熟議しながらパフォーマンス評価

いずれにせよ、今回のワークショップの運営を通じて学んだことは、たとえ専門家であっても、現在の数字に引っ張られない程度に数字に対する感覚を磨く時間がある程度必要だろうということである。そこで、現在のエネルギーガバナンスについていくつかの講演を受け、多様な実データを目にすることは将来のワークショップには不可欠であろう。様々な専門家からの多角的な見解を消化し、自分の中でそれを統合することで、パフォーマンス評価のランキングや各オプションの上限制約における妥当性の意識を持った数字設定ができると期待される。

5. 結論

本調査研究は日本のエネルギーオプションのベストミックスの合意的なあり方を考えるため、多様な参加者による多基準多様性マッピングの実践と、参加者間の熟議を通じたそれぞれの見解の変化を追っ

た。結論としては、熟議による見解の変化は大きなものではなく、部分的な修正に留まることが分かった。また、それにも関わるが、ベストミックスのあり方、オプションのシェアは分析手法に用いる上限（下限）制約の値設定が大きく作用するため、パフォーマンス評価におけるオプションや評価項目設定のみを中心的に議論しても有効ではないことが明らかとなった。

エネルギー政策に向けた含意としては、前回の調査研究に引き続いて LNG の特徴が乏しく、多様性最適ポートフォリオでこのオプションが消失したり現れてこない事例があることから、専門家から一般市民まで他のオプションに対する LNG の比較優位が示せないということが確認された。また、オプションの選択軸としては、化石燃料や原子力といった従来型のエネルギーか、新エネルギーかといった第一軸のほか、設備投資など LCA として総合的な観点から見た環境配慮型か否かといった第二軸を持って評価しうる可能性がある。この第二軸の強調で、単純化されがちなエネルギーオプションの議論に奥行きが出ることを期待される。

今回のワークショップのようにエネルギー種別にオプションを設定するだけでも有効だが、よりベストミックスの議論を展開させるためには、同一エネルギーでもその資源の輸入元など由来ごとに細分化することも必要であろう。こうしたオプションを細分化して考える機会を増やすとともに、経済性や環境負荷だけでなく指標の充実も促進されるよう、この分析手法を積極的に広めていくことが今後の課題である。

謝辞

本調査研究は財団法人東電記念科学技術研究所の平成 20 年度研究助成（電気・エネルギー一般研究）による成果の一部である。本研究にあたり、重要な助言を頂いたサセックス大学 SPRU のアンドリュー・スターリング教授および東京大学公共政策大学院の鈴木達治郎客員教授、また、ワークショップに参加頂き、本稿について有益なコメントを下された 6 名の方々にお礼申し上げる。

参考文献

Stirling, A. 1997. "Multi-criteria mapping: mitigating the problems of environmental valuation", pp. 186-210 in J. Foster (ed.) *Valuing Nature?: Ethics, Economics and the Environment*. London: Routledge.

Stirling, A. 2007. "A general framework for analyzing diversity in science, technology and society", *Journal of the Royal Society Interface* 4(15): 707-19.

Yoshizawa, G., Stirling, A. and Suzuki, T. 2008. *Electricity System Diversity in the UK and Japan: A Multicriteria Diversity Analysis*. GrasPP/SEPP Discussion Paper, GraSPP-DP-E-08-004 and SEPP-DP-E-08-003, November 2008 (SPRU Electronic Working Paper Series SEWP176, February 2009).

電気事業連合「モデル試算による各電源の発電コスト比較」、2004 年。

http://www.meti.go.jp/policy/electricpower_partiallyliberalization/costdiscuss/siryoku/4.pdf

電力中央研究所『ライフサイクル CO₂ 排出量による発電技術の評価-最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響-』、電力中央研究所報告 Y99009、2000 年。

http://criepi.denken.or.jp/jp/kenkikaku/cgi-bin/report_download.cgi?download_name=Y99009&report_cde=Y99009

