

# 最適電源構成の説明ツールとしての四面体モデルの提案

## Tetrahedron Model as an Explanatory Tool for an Optimal Power Mix

入江一友  
Kazutomo Irie

This paper presents a tetrahedron model as an explanatory tool for an optimal power mix. Applying a simple cost minimisation method is difficult when determining the optimal power mix for many countries, because it involves a value judgment when weighting each evaluation criteria. For this reason, a tetrahedral model is proposed. In this model, each vertex of the tetrahedron maximises the share of either renewable energy power, coal-fired power, gas-fired power or nuclear power in that country's power mix. The evaluation criteria for optimising the power mix can be added to the model in the form of vectors. The length of the vectors can be adjusted based upon the weighting of each nation's value judgement. Thus, the model can show the boundary of the possible power mix options within a given country and visualise which direction its options may move depending on changes in each evaluation criteria by vector synthesis.

**Keywords** : Optimal Power Mix, Cost Minimization, Value Judgement

### 1. はじめに

アジア太平洋エネルギー研究センター (APERC) は、アジア太平洋経済協力 (APEC) の枠組みの下でエネルギー政策面での協力のために APEC エネルギー需給見通し第 6 版を策定した<sup>1)</sup>。

同第 6 版では現状維持 (BAU) シナリオに加えて、3 種の代替シナリオを提示している。代替シナリオとして、第一に APEC 地域におけるエネルギー集約度を 2035 年までに 2005 年比で 45% 削減するとの目標を達成するための「エネルギー効率改善シナリオ」が考えられた。第二に、APEC 地域における再生可能エネルギーの比率を 2010 年の水準から 2030 年までに倍増させるとの目標を達成することを目指す「再生可能エネルギー増大シナリオ」が検討された。第三には「電源構成代替シナリオ」を検討したが、この最後のシナリオでは、前 2 者のシナリオとは異なり、「APEC 地域を低炭素化する」との一般的な合意を除けば、前提となる明確な目標は存在していない。

APERC では電源構成代替シナリオを設定するための検討を行い、同シナリオは各 APEC 加盟エコノミー (APEC ではメンバ一国・地域を「エコノミー」と呼んでいる) で電源構成を選択することが可能な領域を示すものとする結論に達した。この検討の過程において筆者は、電源構成選択の可能領域を視覚化することができる三角形モデルを提案した。

本稿では、この三角形モデルを紹介するとともに、三角形モデルを四面体モデルに拡張し、電源構成選択の国内合意が得られていない APEC 加盟エコノミーにおいて、最適な電源構成を選択する際の考慮要因を確認し説明するためのツールとして用いる可能性について検討する。

### 2. 検討手法

3 種の代替シナリオを相互に独立して検討するため、APEC 域内における電源構成選択に際しては、電力の総需要と再生可能エネルギー電源のシェアは BAU シナリオに基づくものとし、「エネルギー効率改善シナリオ」に基づく電力総需要や「再生可能エネルギー増大シナリオ」に基づく再生可能エネルギー電源のシェアは採用していない。

再生可能エネルギー電源を除くと、APEC 域内の電源構成における残りの主要な発電源は、石炭火力、天然ガス火力、原子力である（なお、このほかに石油火力も存在するが、減少傾向にあって既にシェアは小さい。東日本大震災後の日本においては、原子力発電所の運転停止に伴う発電量減少を補うため、石油火力のシェアが高まっているが、一時的現象と考えられる。厳密なシェア計算のためには、燃料産出国・輸出国が重複する天然ガスと合算して、天然ガス・石油火力と扱うことも可能であろう）。「電源構成代替シナリオ」では、それぞれの主要発電源が最大化される場合を想定した。

ただし、BAU シナリオの下では、電源構成選択は各エコノミーの現行政策及び電源開発政策の趨勢を考慮した上で費用最小化原理を適用して決定されるので、発電費用 が比較的低く、現行政策下で導入拡大が見込まれる石炭火力が電源選択において既に最大化されている。このため、代替シナリオにおいて石炭火力を最大化する場合としては、超々臨界圧 (Ultra Super Critical: USC), ガス化複合発電 (Integrated Gasification Combined Cycle: IGCC) や炭素回収・貯留 (Carbon Capture and Storage: CCS) などの「クリーンコール」の導入が促進されると仮定した。

また、ガス火力を最大化する場合としては、BAU シナリオの下で新たに開発が見込まれる石炭火力による設備容量の 50% あるいは 100% がガス火力によって代替されると仮定した。

さらに、原子力を最大化する場合としては、各 APEC メンバーにおいて、BAU ケースを超えて原子力発電開発が促進される場合を想定した。

各発電源を最大化する見通し作業を進めるために、Diagram A の三角形モデル (図 1) を提示した。この三角形内の任意の点は、石炭火力・ガス火力・原子力の可能な組合せ例を表している。なお、この三角形の頂点は、石炭火力、ガス火力または原子力が電源構成 (再生可能エネルギー電源を除く) のうち 100% の比率を占めることを意味するものではないことに留意が必要である。

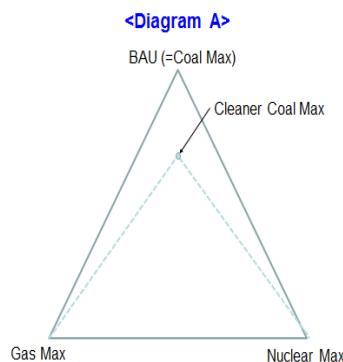


図 1 Diagram A

その後、三角形モデルを Diagram B (図 2) のように見直し、望ましい電源構成選択の 4 つの基準、すなわち、エネルギーの安定供給 (あるいはエネルギー安全保障, Energy Security), 経済効率性 (Economic Efficiency), 環境適合 (Environment) 及び安全性 (Safety) を追記した。「3E + S」と呼ばれるこれらの基準は、2011 年以来、日本の電源構成を検討する過程で参考されてきたものである<sup>2)</sup>。Diagram B は、図中に注記したように、日本を念頭に置いて、原子力発電が既に導入されており、割引率として参照される利子率が低いため、初期の資本費用が大きい原子力発電の経済性が高い一方、石炭、天然ガス、原子力燃料を輸入に依存しているため、輸入燃料の供給が安定的と見込まれている原子力がエネルギーの安定供給上も有利と評価される場合を想定している。マクロ経済情勢やエネルギー資源の賦存状況によって、「3E + S」基準による各電源の評価が大きく異なりうることは言うまでもない。

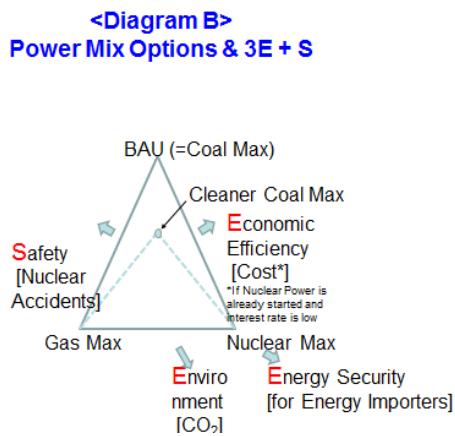


図 2 Diagram B

ここで、各電源の発電費用自体に加えて、安定供給、環境適合及び安全性のための費用をそれぞれ計算し、単純に合算して、発電原価を最小化する電源構成をもって最適な電源構成とみなすことは可能であろう。

例えば、一定の電源構成における発電原価を  $T$  とし、電源構成選択の各基準に関わる費用関数として、安定供給費用関数を  $S$ 、環境費用関数を  $E$ 、狭義の発電費用関数（資本費用、燃料費用及び運転・管理費用を合計したもの）を  $C$ 、原子力発電の事故リスク対応費用を  $N$  とする。再生可能エネルギー電源、石炭火力、ガス火力、原子力の 4 種の電源に 1 から 4 までの番号を振り、それぞれの設備容量及び発電量における構成比率を  $K_1, K_2, K_3, K_4$  及び  $g_1, g_2, g_3, g_4$ （ただし、 $K_1+K_2+K_3+K_4=g_1+g_2+g_3+g_4=1$ ）と表した場合の発電原価  $T$  は以下の式から求めることができ、この式から  $T$  を最小化する  $K_1, K_2, K_3, K_4$  及び  $g_1, g_2, g_3, g_4$  の組合せを導くことができる。

$$T = \sum_{i=1}^4 \{S_i(k_i, g_i) + E_i(k_i, g_i) + C_i(k_i, g_i)\} + N(g_4) \quad (1)$$

$S_i, E_i, C_i, N$  としてどのような関数を設定するかは多くの議論がありうるし、特に  $C_i$  については発電所の新設・既設の別や建設時期が影響するなど設備容量の構成比率のみならず設備年齢構成も勘案する必要があるが、近似的には各関数は発電量の構成比率を主たる変数とすると見てよいであろう。この場合、発電原価は以下のように表せる。

$$T = \sum_{i=1}^4 \{S_i(g_i) + E_i(g_i) + C_i(g_i)\} + N(g_4) \quad (2)$$

ただし、日本における電源構成検討の議論の過程では  $C$  をどのように計算するかが大きな論点であった。さらに、 $S, E, N$  をどのように計算するかについては、方法論すら確立されていない。安定供給費用  $S$  については、一定期間における燃料供給途絶や発電所故障によって生じうる停電がもたらす損失額を見積もることが可能かもしれない。環境費用  $E$  については、同様に一定期間の発電により排出される二酸化炭素や有害物質による環境被害額を見積もることが考えられる。ただし、二酸化炭素排出による地球温暖化が将来もたらしうる被害額をどのように想定するか、その現在価値をどのように求めるか、自国外で発生する被害額を含めるか否か等、議論は尽きないであろう。原子力発電の事故リスク対応費用  $N$  も将来起きるかもしれない原子力発電所事故の発生確率をどう設定するか、発生した場合の被害をどう見積もるか等、原子力事故に対する人類の経験自体が浅いので、合意しうる値を見出すことは困難であろう。

さらに、仮にこれらの費用を見積もることができたとしても、各基準における費用は、各エコノミーにおける価値判断に基づく意思決定において大いに異なりうる、気候変動を最小限に抑えることを最重要視するか、自らの天然資源の活用を最優先にするか、あるいは原子力に対する安全上の懸念に最も重きを置くか、エコノミーによって価値判断は異なりうる。

各国において各基準に対する重みづけを行うことができたとして、各基準の重みを  $w_S, w_E, w_C, w_N$ （ただし、 $w_S+w_E+w_C+w_N=4$ ）とすると、上記の (2) 式を以下のように変換することができる。

$$T = \sum_{i=1}^4 \{w_S S_i(g_i) + w_E E_i(g_i) + w_C C_i(g_i)\} + w_N N(g_4) \quad (3)$$

各基準に対する重みづけに国民的合意を得ることは、各基準における費用を見積もる困難に比べても、さらに困難であろう。現時点において、APEC 加盟エコノミーの全てにおいて重みづけの合意が得られているとはみなしがたい。

このため、APERC では、APEC エネルギー需給見通し第 6 版の電源構成代替シナリオにおいて、最適な電力構成を特定することは避け、その代わりに電源構成選択の尺度として可能な変数を評価し、クリーンコール発電・ガス火力発電・原子力発電の比率をそれぞれ高めた場合にどのような政策的含意が得られるかを検討することとした。

### 3. 検討結果

APERC の電源構成代替シナリオにおけるモデリング手法を参照して、各 APEC 加盟エコノミーは、自らの最適電源構成を追求するために、再生可能エネルギー電源以外の発電源をどのように構成するかについて、自らの選択肢の範囲を知るとともに、どのような評価基準がありうるかを認識することができる。その上で実際にどのような検討を行うかつては、各エコノミーの判断に委ねるしかないであろう。ただし、各エコノミー、あるいは APEC に加盟していない国も含めて各国・各地域が具体的な検討を行うに当たっては、国民あるいは地域住民の合意を得るためにも、より詳細なモデルを用いる必要がある。

単純な費用最小化計算から区別するため、電源構成選択のそれぞれの基準をベクトルの形態で示した Diagram C の三角形

モデル（図3）を示す。Diagram CではDiagram Bと異なり、今後原子力発電を導入する場合や、割引率として参照される利子率が高いため、初期の資本費用が大きい原子力発電の経済性が低くなる場合も想定しており、仮にガス発電と原子力発電の経済性が同様に低く、石炭火力のみが経済効率性に寄与すると仮定して作図している。しかし、ここでも、マクロ経済情勢やエネルギー資源の賦存状況によって、「3E+S」基準による各電源の評価が大きく異なりうることは言うまでもない。

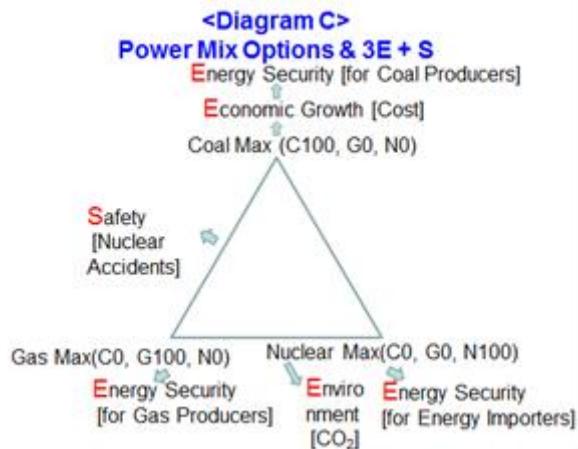


図3 Diagram C

なお、議論を単純化するため、極端な仮定として、三角形の各頂点は石炭火力・ガス火力・原子力がそれぞれ電源構成（再生可能エネルギー電源を除く）で100%の比率を占める場合を表すこととしてある。

このような仮定によって、三角形内的一点が石炭火力・ガス火力・原子力の一定の比率を一義的に示すことが明らかとなる。なぜならば、 $A$ ,  $B$ ,  $C$  の三点を頂点とする三角形の内部の任意の点  $P$  に対し、各頂点から直線を引き、その延長線が対辺と交わる点をそれぞれ  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  とすれば、

$$\frac{PA'}{AA'} + \frac{PB'}{BB'} + \frac{PC'}{CC'} = 1 \quad (4)$$

が常に成り立つからである。

図示すれば、図4の点  $P$  は、石炭火力発電比率が  $PA'/AA'$ 、ガス火力発電比率が  $PB'/BB'$ 、原子力発電比率が  $PC'/CC'$  である場合の電源構成を示すこととなる。

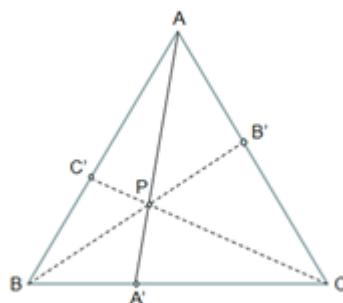


図4 三角形モデル

この三角形モデルを用いて、最適電源構成をベクトル合成の手法によって厳密に数学的に求めることも可能である。しかし、三角形モデルの利点は、むしろ、最適電源構成の数学的決定のために必要な各評価基準における費用見積もりや各評価基準自体の重みづけを厳密に行わざとも済む点に存する。三角形モデルでは、各評価基準を示すベクトルの長さを重みづけと緩やかに関連させておおまかに調整することにより、現時点における電源構成からおおよそどちらの方向に向かうべきかを直感的に把握することが可能となる。

参考までに、この三角形モデルを用いて、日本の事例を示す（日本エネルギー経済研究所の松尾雄司氏の計算及び作図による）。図5で1971年以降の日本の電源構成の変化を示すとともに、図6に経済産業省が2010年及び2015年に試算した2030年時点の見通しを記載した。2010年では原子力発電比率の大幅な増大が目指されていたが、2011年3月の福島第一原子力発電所事故を契機に日本の原子力発電が低迷したため、2015年では2030年に2010年時点での原子力発電比率へ復帰することを目指したことが明瞭に示される。

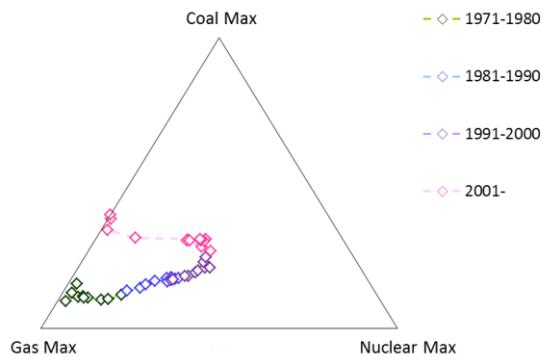


図5 日本の電源構成の経年変化

（図中、「今回試算」は経済産業省が2015年に示した2030年時点の試算を指し、「-1」は再生可能エネルギー22%・原子力22%の場合、「-2」は再生可能エネルギー24%・原子力20%の場合をそれぞれ示す。）

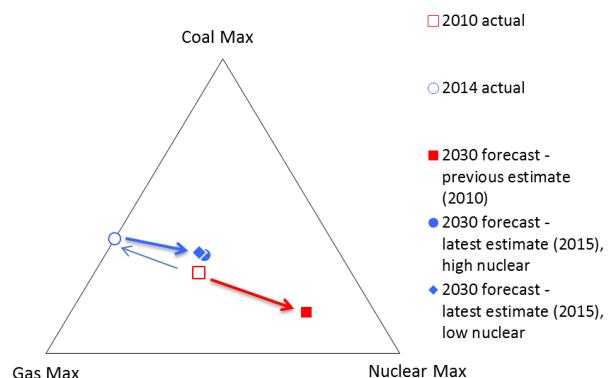


図6 日本の電源構成の目標

さらに、再生可能エネルギー電源を含めて示すためには、Diagram Cの三角形モデルを四面体モデル(Diagram D)（図7）に拡張する必要がある。この四面体の上の頂点は、再生可能エネルギー電源が100%を占める場合を表している。この場合、四面体内の一点が再生可能エネルギー電源・石炭火力・ガス火力・原子力の一定の比率を一義的に示すことは、上述した三角形の場合とまったく同様である。

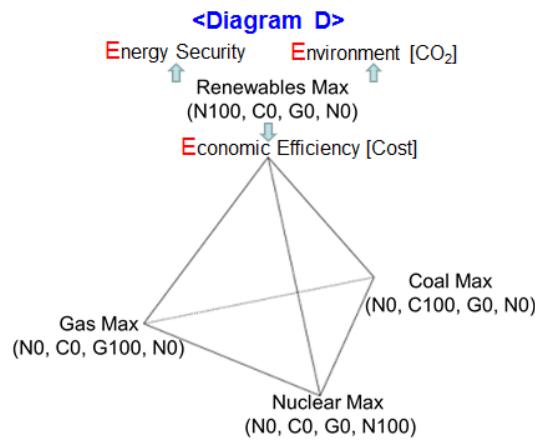


図 7 Diagram D

しかし、三次元となる四面体モデルは直感的把握が困難であり、特にベクトルを追記した場合にはその難点が顕著となる。再生可能エネルギーは、純粋な国産エネルギーであることからエネルギー安全保障上高く評価され、発電過程において二酸化炭素や有害物質をほとんど排出しないことから環境適合性も優れており、ほとんどの国において望ましいエネルギー源であるといつても過言ではないであろう。発電コストが高いという欠点はあるものの、急速な技術開発により改善が期待される。したがって、ほとんどの国においては、まず再生可能エネルギー電源を最大化することを決定することが可能であろう。例えば、最初に再生可能エネルギー電源の比率を 20% と決定すれば、残りの 80% を石炭火力、ガス火力あるいは原子力にどのような比率で分担させるかを問題にすることになる。

このような過程を経れば、幾何学的には、Diagram D の四面体モデルを Diagram C\* の三角形モデルに再び縮減することができる。ここでの三角形の各頂点は、石炭火力、ガス火力または原子力が電源構成のうち 80% の比率となる場合を表すこととなる。Diagram C\* の三角形は Diagram D の四面体モデルを底面と平行な平面で切断した断面であるが、再び二次元平面上で三角形モデルに電源構成選択の基準をベクトルで表示することが可能となる。ここで、各ベクトルの長さは、それぞれの基準に与えた価値の高低を反映するように各国により調整することができる。

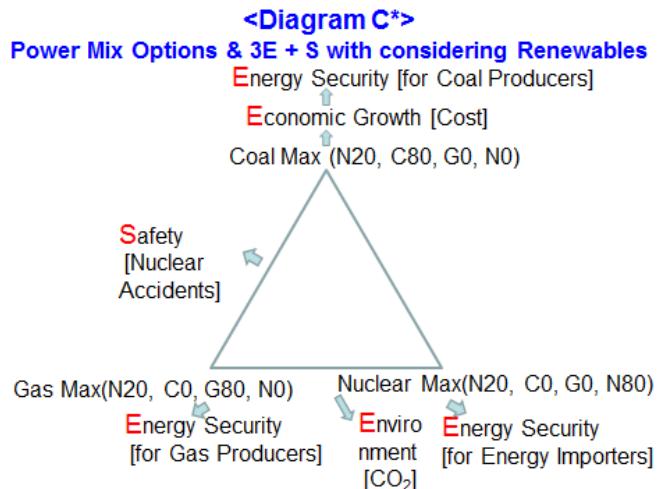


図 8 Diagram C\*

#### 4. まとめ

電源構成選択の国民的合意に達することの困難に直面している国にとって、最適な電源構成選択を説明するためのツールとして、四面体モデルを提示することができた。

紙面等の二次元の媒体では、三次元の四面体モデルを直感的には把握することができるので、二次元の三角形モデルに縮減する必要があるが、立体模型等の三次元の媒体を用いれば、四面体モデルをより直接的に利用することができるであろう。

四面体モデルを将来の APEC エネルギー需給見通しの作業に活用できるかは今後の課題である。

#### 謝辞

本稿執筆に当たっては、一般財団法人日本エネルギー経済研究所の同僚、なかんずく松尾雄司研究主幹、大槻貴司研究員、Naomi Sarah Wynn 研究員から多くの教示と助力を得た。記して感謝したい。

\* 本論文は、2016年2月3日に開催されたエネルギー・資源学会主催の第32回エネルギー・システム・経済・環境コンファレンスにおいて発表した論文に加筆したものである。

#### 参考文献

- 1) Asia Pacific Energy Research Centre (APERC) ; APEC Energy Demand and Supply Outlook 6th Edition, ( 2016).
- 2) 経済産業省；長期エネルギー需給見通し, (2015), [http://www.meti.go.jp/english/press/2015/0716\\_01.html](http://www.meti.go.jp/english/press/2015/0716_01.html).  
(アクセス日 2015. 10. 8)