

社会的選好を考慮した最適電源構成の算出法の開発

福田, 研二
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

藤本, 登
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

片山, 善順
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

饒, 燕飛
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

<https://doi.org/10.15017/17458>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 20 (1), pp.19-24, 1998-06-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン :
権利関係 :

社会的選好を考慮した最適電源構成 の算出法の開発

福田 研二*・藤本 登*
片山 善順**・饒 燕飛***

(平成10年2月27日 受理)

A method of constructing best-mixed power generation systems reflecting public preference

Kenji FUKUDA, Noboru FUJIMOTO,
Yoshinori KATAYAMA, Yan F. RAO

A method has been developed to reflect the public opinion on the construction of best-mixed power generation systems using the evaluation method based on questionnaire. Eight power generation systems, ie, oil thermal, coal thermal, LNG thermal, hydroelectric, solar, LWR, HTGR, and FBR are evaluated by fixed figures in following five factors: economy, usage, security, environment, and social acceptance. The introduction ratio of power generation system on each questionnaire is evaluated. The shadow price on each factor are calculated by using the dual problem from the linear programming method and the benefit/cost ratio on each power generation system is obtained.

1. 緒 言

CO₂ 排出量の抑制やエネルギーセキュリティの観点から、電源としての原子力の導入が推進されているが、一方では地域住民の反対により新規発電所の建設は困難な状況にある。この状態を社会的に分析するために、アンケート調査による電力消費者の心理分析や、環境、エネルギー安全保障（セキュリティ）と経済性（コスト）間のトレードオフの評価、あるいはそれらを考慮にいれたベストミックスの研究が行われている^{1)~4)}。しかし、電源に対する社会的選好は上記以外に利便性や社会的受容性（リスクへの不安など）を含め大別して5つの価値=評価項目（コスト、利便性、セキュリティ、環境および社会的受容性）に基づいて決定されており、これらを考慮に入れて社会的選好を評価しこれに適合する最適電源構成（ベストミックス）を構築する必要がある。従って、本研究では線形計画法を用い、アンケートから得られた上記5評価項目で表される社会的選好に適合させた8種類の電源（石油、石炭、天然ガス、水力、太陽光、軽水炉、高温ガス炉、高速増殖炉）の最適構成を求める手法を開発した。

2. 線形計画法による最適電源構成の算出法

2.1 基 礎 式

社会的選好を考慮した最適電源構成算出法の原理は次の通りである。原田らの公衆意見の評価手法を用いてアンケート調査⁵⁾により算出された5評価項目の重み w_i に適合する電源の組み合わせ（導入率 c_j ）を式(1)~(4)で定式化し求めた。

$$z = \sum_j \sigma_j c_j \quad (1)$$

$$w_i - \Delta w_i \leq p_i \leq w_i + \Delta w_i \quad (2)$$

$$\sum_j c_j = 1$$
$$p_i \equiv \frac{\sum_j S_{ij} c_j}{\sum_j \sigma_j c_j} \quad (3)$$

$$\sigma_j \equiv \sum_i S_{ij} \quad (4)$$

ここで S_{ij} は評価項目 i についての電源 j の相対評価値であり、これが大きいほど高い評価が与えられるものとした。従って、 σ_j は電源 j の平均的评价値になっている。また $c_j \geq 0$ で1に規格化している。

結局、式(2)は電源の組み合わせから得られる評価項目 i の重視度がアンケート回答者が与えるそれと適合するという条件であり、それを満たしながら全評価

*工学部応用原子核工学教室

**工学部応用原子核工学科

***工学部応用原子核工学教室（現在 三菱重工業(株)高砂研究所）

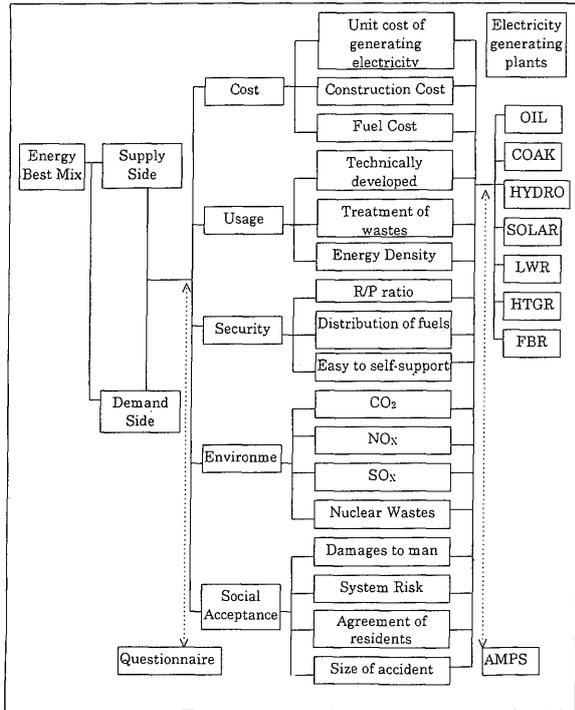


Fig. 1 Flow chart of analysis

項目の評価総和値 z が最大化する条件 (式(1)) とから最適電源の組み合わせが求められるものとしている。また, w_i に完全に適合する電源構成 c_j ($w_i = p_i$) を常に求めることは不可能であり, w_i に Δw_i の幅を持たせ, これは最小になるようにした。 z は評価値の総和値に対する満足度, Δw_i は評価値の相対値に対する満足度とでもいうものであり, z は大きいほどまた Δw_i は小さいほど満足度が高い。なお, ここでは便宜上 Δw_i は評価項目について同じ値 ($\Delta w_i = \Delta w$) をとるものとした。 Fig. 1 にここで提案する手法の概略図を示す。

2.2. S_{ij} テーブルの作成

S_{ij} には, 数値的データ(6)~(15)があるもの(コスト等)はそれを用い, 数値的データがないもの(利便性など)や相互に比較ができないもの(温暖化と酸性雨の重要度など)については AHP を併用して評価した。すなわち, 各電源について各評価項目を構成する細目のデータは変換を施した後, いったん細目 k ごとに10段階に評価した。例えば評価項目「環境」を構成する細目として CO₂, SO_x, NO_x, 放射性廃棄物を選定したが, それぞれの基礎データ値はその対数を取り, いったん10段階評価になおし表中の P_e を得, さらにこの場合は(コストも同様)その逆数をとってそれを規格化し電源 j の評価値 S_{4j} を得た。これらの相互の重みや, 細目そのものが数値化できないもの(資源分散, 燃料備蓄, 利用地域合意, 技術完成度, 廃棄物対策)は AHP 法⁽⁶⁾ (Analytical Hierarchy Process :

階層分析法)により著者らが算出した。 S_{ij} の数値は値が大きいほど優れているという形で統一し, $\sum_j S_{ij} = 1$ になるように規格化している。なおいくつかの細目の基礎データ(可採年数, 人的被害, システムリスク, エネルギー密度, 環境各データ)は, それを対数変換した値を用いたのは, 例えば光の輝度や音の感

Table 1 Evaluation of each power generation plant for five factors

	Unit cost of generating electricity ⁽⁶⁾ (P_{c1j})	Construction cost ⁽⁶⁾ (P_{c2j})	Fuel cost ⁽⁶⁾ (P_{c3j})	S^D_{1j}
Weight (P_{c0j})	0.9	0.05	0.05	
OIL	2.75	2.97	8.8	0.127
COA	2.5	3.59	8	0.137
LNG	2.5	3.13	10	0.134
HYD	3.25	10	0	0.114
SOL	10	7.03	0	0.042
LWR	2.25	4.84	3.6	0.159
HTGR	2.5	4.84	3.6	0.146
FBR	2.5	7.19	2.4	0.142

	Energy density ⁽⁷⁾ (P_{u1j})	Technically developed ⁽⁸⁾ (P_{u2j})	Treatment of wastes ⁽⁹⁾ (P_{u3j})	S^D_{2j}
Weight (P_{u0j})	0.41	0.33	0.26	
OIL	6.36	8.11	7.33	0.156
COA	6.25	5.3	3.49	0.113
LNG	6.43	6.63	10	0.161
HYD	5.58	10	9.17	0.173
SOL	0.69	2.85	4.77	0.053
LWR	9.63	4.69	1.58	0.128
HTGR	10	1.58	1.58	0.109
FBR	10	1.04	1.58	0.105

	R/P ratio ⁽⁹⁾ (P_{s1j})	Distribution of fuels ⁽¹⁰⁾ (P_{s2j})	Easy to self-support ⁽¹¹⁾ (P_{s3j})	S^D_{3j}
Weight (P_{s0j})	0.08	0.3	0.62	
OIL	2.99	1.02	1.62	0.041
COA	5.57	2.59	1.62	0.058
LNG	3.27	2.5	1.02	0.043
HYD	10	10	8.8	0.242
SOL	10	10	8.8	0.242
LWR	3.52	2.5	3.93	0.091
HTGR	3.52	2.5	3.93	0.091
FBR	7.99	1.54	10	0.191

	CO ₂ ⁽¹²⁾ (P_{e1j})	SO _x ⁽¹²⁾ (P_{e2j})	NO _x ⁽¹²⁾ (P_{e3j})	Nuclear wastes ⁽¹²⁾ (P_{e4j})	S^D_{4j}
Weight (P_{e0j})	0.42	0.23	0.12	0.23	
OIL	9.51	5.23	10	0	0.072
COA	10	10	10	0	0.06
LNG	9.32	0	7.16	0	0.097
HYD	3.77	0	0	0	0.292
SOL	7.59	0	0	0	0.145
LWR	4.43	0	0	10	0.111
HTGR	4.43	0	0	10	0.111
FBR	4.43	0	0	10	0.111

	Damages to man ⁽¹⁴⁾ (P_{a1j})	System risk ⁽¹⁵⁾ (P_{a2j})	Agreement of residents (P_{a3j})	Size of accident (P_{a4j})	S^D_{5j}
Weight (P_{a0j})	0.13	0.36	0.31	0.2	
OIL	3.4	2.93	4.55	4.41	0.106
COA	2.88	2.6	3.01	5.25	0.092
LNG	10	10	4.11	3.03	0.19
HYD	5	5.25	2.96	2.1	0.103
SOL	4.35	3.91	10	10	0.198
LWR	5.89	6.77	1.19	1.04	0.108
HTGR	5.89	6.77	1.19	1.04	0.108
FBR	5.89	6.77	0.68	0.8	0.1

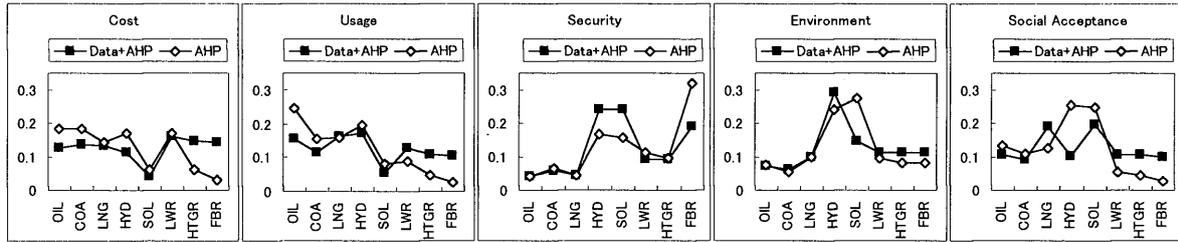


Fig. 2 Comparison between S_{ij} with AHP method and S_{ij} in Table 1

覚が対数で相対評価されるが、これが社会現象に対しても成り立つとの仮定に基づいている。Table 1 に S_{ij} テーブルを示す。

さて、Fig. 2 に各細目をデータにより与え求められた S_{ij} を、別に AHP 法によって求めたそれと比較した。両者は比較的によい一致を示しているといえる。元来、各評価項目はそれぞれ数値的に比較できない多くの細目を含み、それを統合して各電源についてその評価値を S_{ij} として数値的に与えることは極めて困難である。しかし、現実社会や経済活動においては、各人は暗黙に比較できないものを比較し、また無意識にデータを利用し AHP 等も行つて評価を総合的に判断しているので、両者の一致はむしろ不思議ではないであろう。なお、いくつかの定量的不一致は、各細目をデータに頼る S_{ij} では考慮されない細目（例えば、環境の細目としての景観や植生、騒音など）が残ること、一方、AHP 法による S_{ij} では現在の世論の影響を受けたり、知識レベルや立場の影響を受けることに起因すると考えられる。結局、最終的にはこの二つの S_{ij} を算術平均して解析に使用した。

2.3. コスト負担、外部コスト

コスト最小の場合のコスト負担は式(5)より算出できる。

$$C_m = \sum_j C_{cj} c_{j0} \quad (5)$$

ここで、 c_{j0} はコスト最大重視の場合に得られる電源導入率、また C_{cj} は S_{cj} をコストに換算した値を意味している。 Δw が最小の時、コスト最小となる電源構成は石炭火力が0.78、LWR が0.22であった。これは、(1)式のみで表される線形計画法では、 S_{cj} が最大の電源 j (石炭火力) が100%選択されるが、コスト最小のアンケートの回答を与えても多少他の評価項目にもポイントが与えられるために(2)式からこのような結果になったのである。(当然 Δw を十分大きくすると石炭火力が100%選択されることになる。)さらに、アンケートから得られる選好 w_i に適合する電源構成 c_j を実現した場合のコストがコスト最小の場合のそれに比してどれほど大きくなるかは $\sum_j C_{cj} c_{j0} / C_m$

により評価される。

ところで、 $C_i = \sum_j C_{cj} c_j$ ($i \neq c$) はコスト以外の評価項目(外部効果) i のコスト換算値になっている。換言すれば、アンケートの回答において、環境やセキュリティ等の外部効果を重視することによって真のコストに加算される外部効果 i のコストを C_i から求めることができる。

2.4. 双対問題

式(1)の双対問題は次式で与えられる。

$$u = y_0 \quad (6)$$

$$\sum_i T_{ij}^+ y_i^+ + y_0 \geq \sigma_j \quad (7)$$

$$T_{ij}^+ \equiv S_{ij} - w_i^+ \sigma_j \quad (8)$$

$$T_{ij}^- \equiv w_i^- \sigma_j - S_{ij} \quad (9)$$

$$w_i^\pm \equiv w_i \pm \Delta w_i \quad (10)$$

y_i^\pm はそれぞれ上限(プラス符号)、下限(マイナス符号)制約値に対する潜在価値(Shadow price)、また y_0 は式(2)第二式に対する潜在価値で、いずれも正またはゼロの値をとる。また、式(7)の左辺と右辺の比から費用便益比 $(B/C)_j$ が求められる。

潜在価値は制約条件を1単位変化させた時の制約値の限界価値を意味する。すなわち、式(2)において上限、あるいは下限制約条件を緩め、 Δw_i を単位量だけ大きくすることによって得られる価値の増加分 (Δz) に対応している。(この議論を推し進めれば、一般に容易には求めることができない「外部効果 $i(i \neq c)$ の限界費用」を得ることができる。)

さらに、 $(B/C)_j$ は電源 j を導入したとき、投入した費用に対し得られる便益の比を表し、この値が大きいほど被験者にとってその電源を導入する価値が大きいことを意味している。電源 j が導入されている時は $(B/C)_j$ 値は1であるが、わずかな条件の変化に伴って、容易にこれが次に大きい電源 k と交代する。なお(7)式から $(B/C)_j$ は必ず1以下になることがわかる。

3. 結果と考察

3.1. 各電源の各評価項目の内部化の程度

2.2. で得られた S_{ij} を Fig. 3 に示す. これより, 太陽エネルギー, 原子力を除いて, 各電源について, およそコスト, 利便性および社会的受容性が同様な傾向を示し, 一方, セキュリティと環境がまた類似の傾向を示していることがわかる. これは, まず, 「コスト」, 「利便性」, 「社会的受容性」が導入のために優先され内部化し, 導入が進むにつれてさらにコストダウンが進む好循環を反映しているものと考えられる. 一方, 「環境」, 「セキュリティ」は従来無視されてきており内部化が進んでいないといえる. 原子力についてこの傾向が当てはまらないのは, その社会的受容性が時とともに変化しているためであると考えられる.

3.2. 電源導入率の傾向

試行的に文献(5)で得られた, 70名(学生40, 社会人30)を対象としたアンケート結果から抽出された社会的選好評価結果を Fig. 4 に示す. これは, 5 評価項目に対し与えられた重み w_i に着目しその大きい順に並べたものであり, ある評価項目が平均値0.2よりも大きい値をとるとき, 被験者はこれを相対的に重視していることを示している. 図より, 社会的受容性や環境は相対的に重視され, セキュリティは軽視されていることがわかる.

Fig. 5 にこのアンケート結果に対応する電源導入率

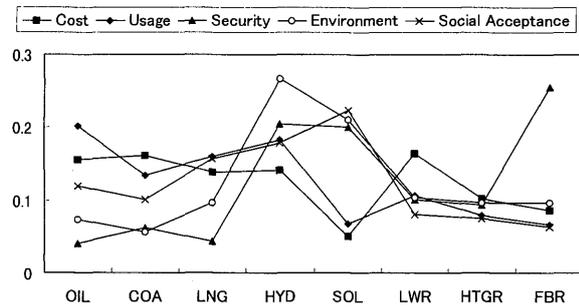


Fig. 3 Characteristics of each power generation system in five factors

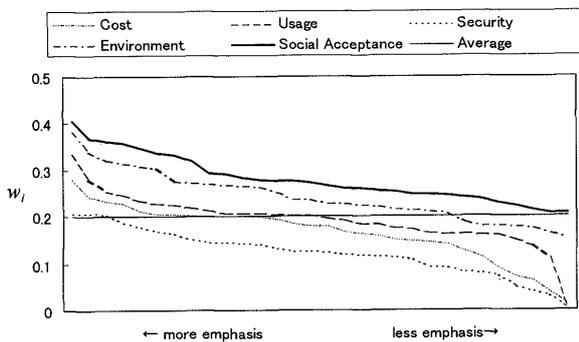


Fig. 4 Rating public opinion by Questionnaire⁽⁵⁾

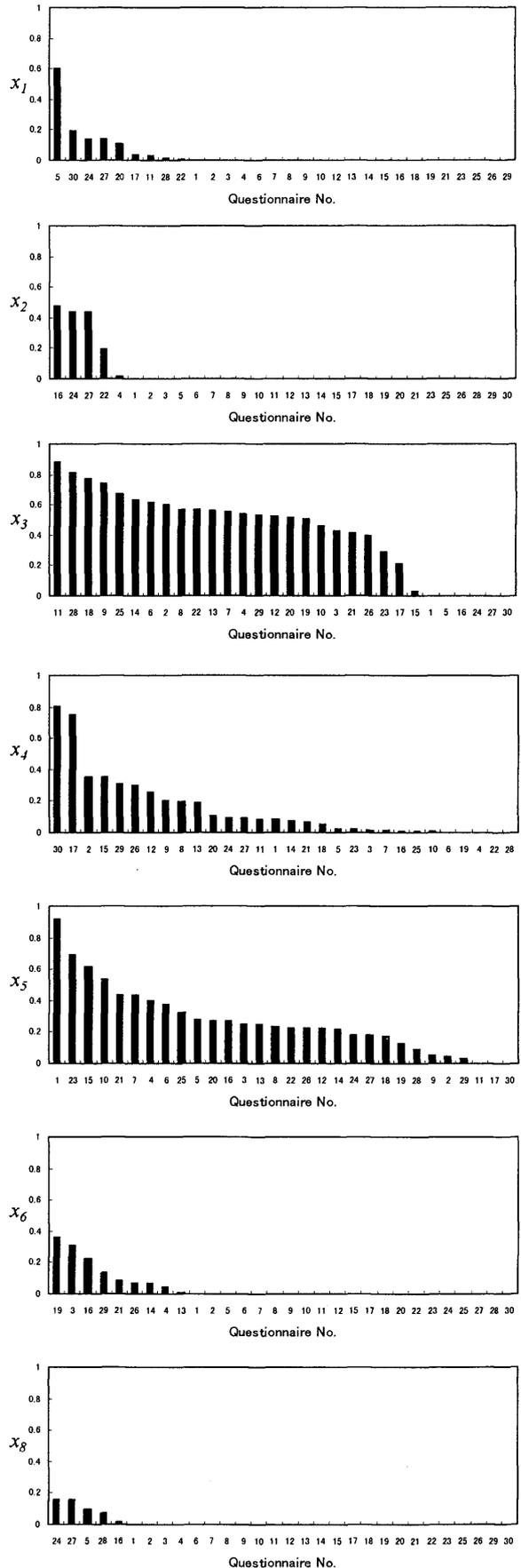


Fig. 5 Introduction ratio on each Questionnaire⁽⁵⁾

c_j を石油火力, 石炭火力, LNG 火力, 水力, 太陽光発電および LWR の導入率の高い順にならべて示す. この結果から, 被験者は LNG 火力, 太陽光発電, 水力の順で好み, 石炭火力, HTGR, FBR の導入はあまり望んでいないことが分かる. これは前述のように, 被験者の多くが「環境」と「社会的受容性」を重視する傾向があるので, このいずれにも評価が高い LNG 火力, 太陽光発電, 水力が選ばれ, いずれかに評価が低い石炭, HTGR, FBR は敬遠される結果になったと考えられる.

3.3. 制約値の潜在価値と電源の費用便益比

z のうち価値 i が占める部分は, 電源構成が (w_i) の時 $z_i = w_i z$ で与えられるが, コスト以外の価値 (利便性, セキュリティ, 環境, 社会的受容性) は外部効果とも言うことができる. 従って社会的選好が反映された電源構成 (ベストミックス) が実現された場合, その分すでに外部効果は内部化されている.

ところで潜在価値 y_i^+ (プラスは上限制約, マイナスは下限制約に対応) は, 式(2)で表されるように, 電源構成 w_i に与えられる制約条件を緩め, すなわち Δw_i を 1 単位大きくすることにより全価値 z が増加する程度を表しており, 全価値 z が増加すれば y_i^+ は正の値をとり, その値が大きいく程 w_i の制約条件を緩める価値がある (それ以外はゼロである). 換言すれば, 潜在価値 y_i^+ は社会的選好 w_i を変化させることにより, コスト以外の価値を含む全価値 z が大きくなる程度を表しており, その内訳 Δz_i は外部効果の限界価値をあらわしている.

Fig. 6 に比較的多く現れるパターンを持つ被験者 8 名分の (a) 電源導入率, (b) 費用便益比, (c) 上限制約値ならびに (d) 下限制約値の潜在価値潜在価値の結果を示している.

Fig. 6 (c), (d) より, 社会的受容性の下限制約値, またセキュリティ, 利便性, 環境の上限制約値の潜在価値が大きいことがわかる. すなわち, これらの制約値を緩めることにより z を大きくすることができる. 換言すれば, ここで選んだ被験者は概して社会的受容性を重視しすぎ, またセキュリティならびに利便性を軽視するがために, 自ら全価値 z が低い値で甘んじている結果になっている. これらの制約値を緩めることで (外部効果を含む) 全価値 z をさらに高めることができることは興味深いことである.

次に, (a), (c), (d) から被験者 5 は社会的受容性を重視し環境およびコストを軽視する結果石油火力, 次に太陽光発電を選択する傾向があることがわかる. また, 社会的受容性は重視するが, セキュリティを軽視する被験者 6 は LNG, ついで太陽光発電を選択する. なお, 被験者 5, 24 はセキュリティは軽視せず,

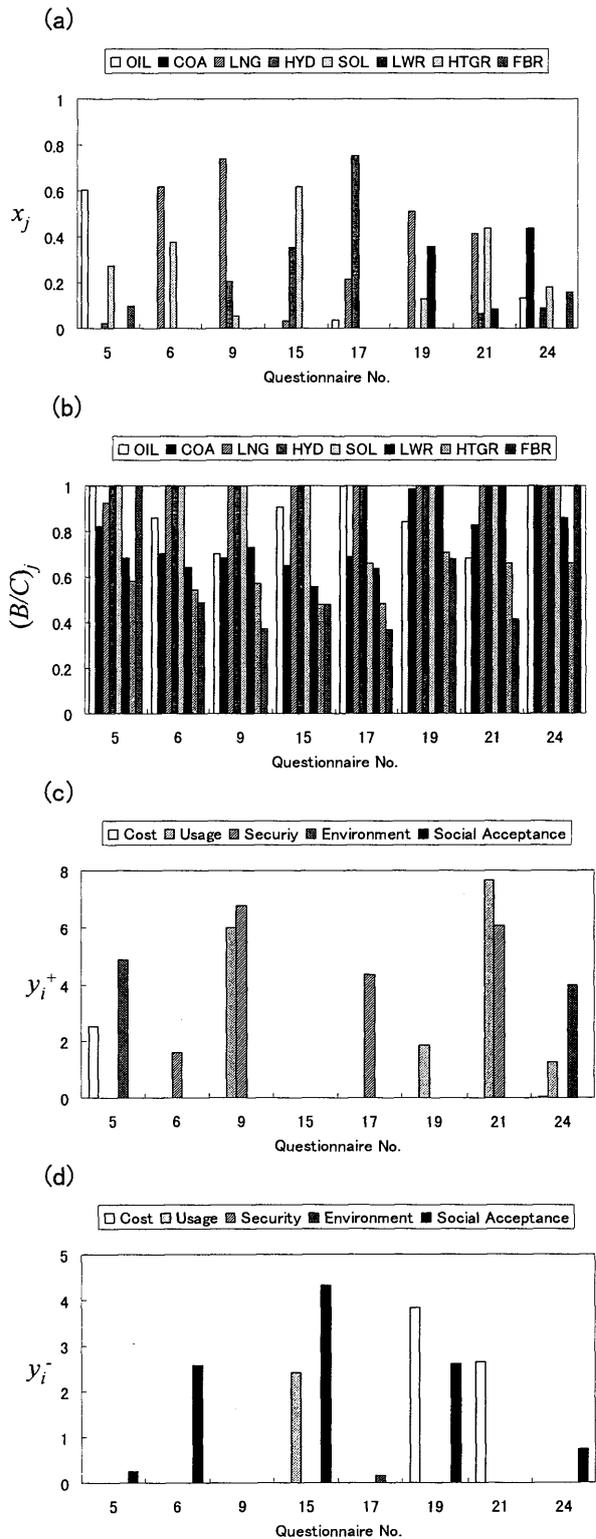


Fig. 6 (a) Introduction ratio, (b) Benefit/cost ratio, (c) shadow price at highest limit, and (d) shadow price at lowest limit on representative testee

社会的受容性は他の被験者よりも寛容であるので, FBR を選択していることは注目される. また, コストを比較的重視する被験者 19, 21 は LWR を多少とも選択している.

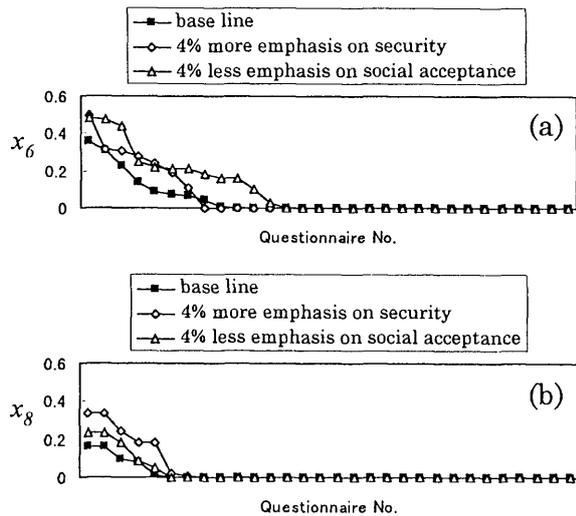


Fig. 7 Change of (a) LWR and (b) FBR introduction ratio when social acceptance point is reduced or (b) security point is increased

さらに、費用便益比 (b) から (この値が1である場合はすでに導入されていることを示している) それぞれの被験者が次善の候補として考えている電源を読みとることができる。

3.4. 原子力の可能性

試行的に行ったアンケートでは社会的受容性を特に重視し、セキュリティを特に軽視する傾向があった。これらはとりわけ原子力に大きな影響を与える結果である。すなわち、原子力は特に社会的受容性に弱く、一方、太陽光や水力とともにセキュリティに強いので、アンケートにおいて社会的受容性のポイントが多少とも小さく、またセキュリティのポイントが多少とも大きく与えられれば原子力が選択される結果になると予想される。このことを Fig. 7 において確かめた。すなわち、社会的受容性あるいはセキュリティに関するアンケート設問の回答のポイントを作為的に20%それぞれ削減あるいは上乘せさせ (同時に他を均等に5%それぞれ上乘せあるいは削減させ) たところ、LWR (Fig. 7(a)) や FBR (Fig. 7(b)) の導入率が上昇した。

4. おわりに

社会における電源の選択は、必ずしもコストばかりではなく、暗黙のうちに何らかの形でいくつかの価値についてその重視度の配分が与えられ、これに適合する形で電源の構成が形成されていくと考えられる。勿

論、電力事業者がかならずしも、例えばセキュリティに関心がなくとも政策的に誘導され、また民衆の圧力で社会的受容性や環境が反映されて、結果的にベストミックスが形成されるであろう。ここでは、諸価値の重視度はアンケートにもとづき決定したが、必ずしも本質的手続きではない。

また、いくつかの定量的には評価しがたい価値の配分 w_i に応じて、異なった特性をもついくつかの選択肢を適合させる本手法は、電源の最適構成を求める本問題以外に多くの応用 (例: 民意に応じて政党の議席を求める、目的に応じて財産やODAを分散させる) が考えられる一般的手法といえそうである。

さらに、目的関数 z にはコスト以外の他の価値 (外部効果) が含まれているので、 z を最大化させる問題ではすでに外部効果のコストが計量されている。また、潜在価値も、外部効果の限界価値が価格表示されている。このように、容易には計量できない外部効果のコストや価格をここでは求めることができている理由は「 S_{ij} テーブルを作成することができる」という大前提に依っている。すなわち、5 評価項目 (= 価値) が相互に同等の重みを持っており、従ってコストと同じ単位で比較できることが本質的な前提である。いずれにせよ、本手法は容易には計量できない外部効果を計量できる可能性を秘めていると思われる。

終わりにあたり、本研究の一部は財住友財団環境研究助成金を受けて行われました。また、研究の初期段階には現日本橋梁(株)原田康弘氏の協力を得ました。ここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 渡部幹他, INSS J., 1, 69(1994).
- 2) 林知己夫他., INSS J., 1, 93(1994).
- 3) 内山洋司他, 電力中央研究所報告, Y91005(1992).
- 4) 安川茂他, 日本原子力学会誌, 33(12), 1131(1991).
- 5) 原田康弘他, 九州大学総理工報告, 18(4), 289(1997).
- 6) 総合エネルギー統計, 457(1991).
- 7) エネルギー・資源, 9(4), 19(1988).
- 8) 内田二郎, エネルギー・資源, 3(2), 16(1982).
- 9) 総合エネルギー統計, 420(1991).
- 10) 総合エネルギー統計, 440(1991).
- 11) EDCM, エネルギー・経済統計要覧, 218(1993).
- 12) エネルギー・資源, 14(2), 10(1993).
- 13) 加納時男, エネルギー・資源, 11(4), 10(1990).
- 14) エネルギー・レビュー, 7, 7(1981).
- 15) エネルギー・資源, 5(3), 84(1984).
- 16) 刀根薫, ゲーム感覚意思決定法, 日科技連, (1986).