

AHP を中核とした FBR サイクルシステム 候補概念選定手法の開発

篠田 佳彦

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構と日本原子力発電株式会社は、理想的な FBR (Fast Breeder Reactor: 高速増殖炉) サイクルシステム (以下, FBR システム) の追求を目指し「FBR サイクルシステムの実用化戦略調査研究」(以下, 実用化研究) を 1999 年から遂行している[1]。2000 年度までに実施したフェーズ 1 では, FBR システムの候補概念について幅広く調査, 検討した。2001 年度から 5 年間の予定で進行しているフェーズ 2 では, 2, 3 の実用化概念の選定を目指している。そのため, 1999 年から定量的な比較評価手法を開発している。

ここでは, 候補概念の特徴を明確にする種々の評価項目において, 各候補概念の優劣判断を目的とし, AHP[2]を中核とした定量的比較評価システムの開発について記述する。

2. 候補概念選定システムの構築

2.1 FBR システムの概要

現在, 稼働している原子力発電所は, 軽水炉が主流となっている。軽水炉は, 天然に存在するウランを資源とし, そこに僅かに存在する核分裂しやすい質量数 235 のウラン (存在比 0.72%) の比率を高めたものを燃料としてエネルギーを取り出している。軽水炉では, ウラン資源の極僅かしか利用することができない。ウラン資源もやはり有限といわれており, 軽水炉での利用では, いずれ枯渇してしまうおそれがある。

一方, FBR システムでは, 軽水炉でほとんど利用できない天然ウラン中の質量数 238 のウラン (存在比 99.3%) を原子炉内での核分裂によって生じる中性子で核分裂しやすいプルトニウムに変えることができる。そのため軽水炉から FBR システムに置き換えること

でウラン資源の利用効率が飛躍的に高まる。資源枯渇, 供給断絶などのおそれのない持続的エネルギー源として有効な手段となるが, 軽水炉に比べて高価であることやプルトニウム利用による核拡散のおそれの増加など克服せねばならない課題もある。

FBR システムは, プルトニウムを主燃料とし, エネルギーを発生しつつ, 消費した以上のプルトニウムを作り出すことのできる FBR とそこから生じる使用済燃料を化学処理し, 再度使える核物質と廃棄物に分離する再処理工場および分離された核物質を燃料に加工する燃料加工工場の三つの異なる施設で構成される(図 1)。それぞれの施設で様々な方式(技術の選択肢)が存在し, 実用化に向けてどの方式を候補概念として選定すべきかが重要な問題となっていた。

2.2 評価項目の設定

実用化研究における開発目標と関連させて FBR システムの総合的な性能を判断するために図 2 のように評価項目を設定した。

安全性の確保は, 必要不可欠な要求である。経済競争力は, FBR システムの円滑導入において重要な要求となる。FBR システムの特徴から, その他重要な目標として, 資源の有効利用, 環境影響の低減, 核拡散抵抗性の強化を目指し, 評価項目とした。さらに候補概念間の研究段階の違いを考慮して技術的実現性を

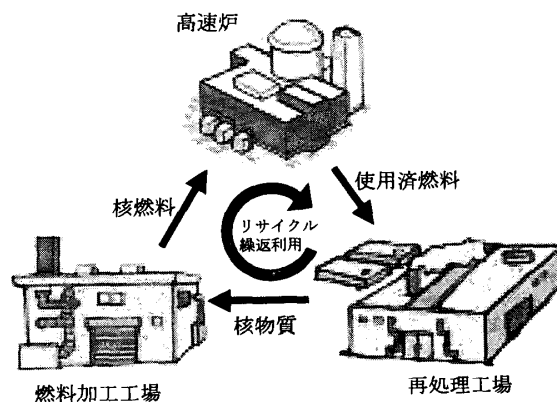


図 1 FBR サイクルシステム

しのだ よしひこ

核燃料サイクル開発機構

〒 311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

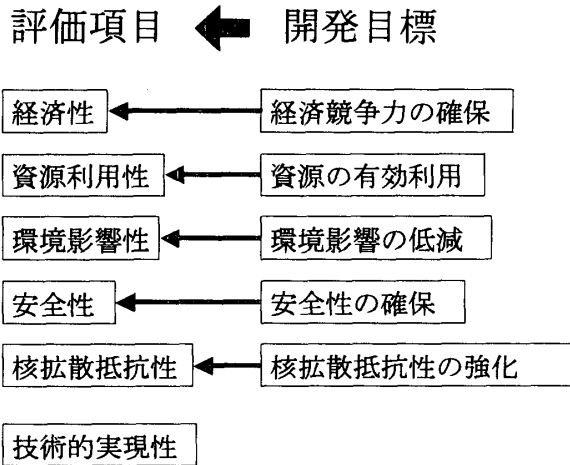


図2 開発目標と評価項目

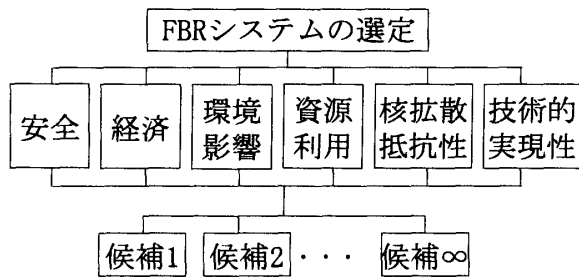


図3 階層構造

加えた六つの評価項目を設定した。図3に階層構造を示す。

2.3 評価手順

実用化研究では、幅広い技術の選択肢を考慮して、実際にFBRシステムを組み、概念設計を実施したうえで候補技術の方式や仕様（性能）を評価していく。そのため、多くの評価項目においては、計量可能な値を設計情報から提示することができる。さらに、技術の選択肢は多種に及び、候補概念数は、多く存在する。同一の方式を用いた候補概念でも異なる性能をもくろんで設計したものを別候補概念とすれば、代換案は無数になる。そこで、AHPを適用するにあたり、以下の対応をした。

2.4 代換案の評点の考え方

代換案数が膨大かつ不定であることおよび計量値を重視することから、原則として評価項目における代換案の評点は、計量値による直接評価を採用する。そこで、評価項目において、特徴を分析することで下位の評価項目を設定し、計量値で評価できるようにさらに深い階層構造を構築していく。そして、様々な評価項目における代替案の評価では、計量値を用いて評価するために図4に示す価値関数を適用し、0から1の範

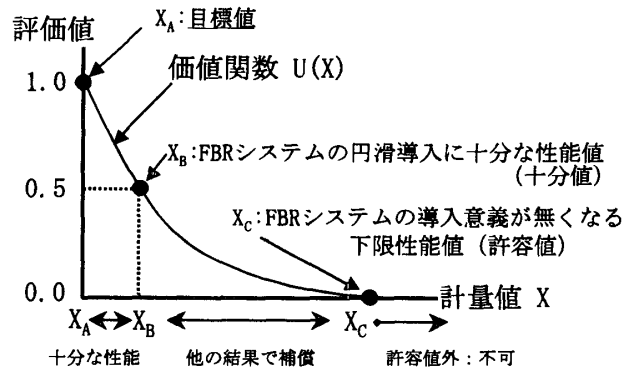


図4 計量値と価値関数

圍の評価値を得る。

各評価項目ごとの価値関数では、関連する開発目標値と整合をとり、目標値に達していれば、評価値を1、円滑導入に十分な性能値を十分値とし、その評価値を0.5、さらに導入意義がなくなる下限性能値を許容値とし、評価値0とする。ここでは、他の特性がいかに優れていても許容値を下回るものは評価対象外とすることにした。これらの点を目標に対する達成度、満足度を示す基準とし、価値関数を設定するための評価水準点とした。価値関数型として

$$V(x) = a - be^{-cx} \quad (1)$$

を採用し、上記、3評価水準点から係数 a, b, c を算出した。これより、代換案としての候補概念において、その評価項目に対する計量値をもって、機械的に各評価項目での評点を求めることができる。

2.5 評価項目の価値関数設定

(1) 経済性

FBRシステムの経済性は、発電原価を計量値として評価できる。発電原価は、概念設計に基づき、建設の減価償却を考慮して施設建設費、運転維持費、燃料費などから算出する。

目標値：下記、十分値で採用した将来LWRの減価償却が終了した段階での発電原価予想値より3円/kWhと設定した。

十分値：FBRシステムの置き換わり対象である日本国内での将来の軽水炉による発電原価予想値を参考に4円/kWhとした。FBRシステムの発電原価が置き換わり対象の軽水炉より安価となれば、経済競争力の確保の観点から軽水炉は順次置き換えられ、FBRシステムの導入は円滑に進展する。

許容値：自然エネルギーのなかで最も安価なものと予想される風力発電の将来予測値より11~13円/kWh程度とした。将来、より環境影響を重視する

社会を想定し、自然エネルギー源のなかでも経済性と環境影響のバランスが取れていると考えられる風力発電をFBRシステムの競合相手と考えた。これらの設定より、図5に示す価値関数を得た。

(2) 資源利用性

ウラン資源の節約と活用を軽水炉と比較することでFBRシステムの資源利用性を評価できる。評価項目としての資源利用性は、図6に示すように節約性と活用性の下位基準を持ち、それぞれ計量化できる。これら下位基準の資源利用性に対する重み（影響度）は、別途判断する。

軽水炉をFBRシステムで置き換えることでウラン資源の節約を図ることができる。軽水炉からFBRシステムに置き換えるためには、プルトニウムの生成と利用のバランスが重要であり、FBRの増殖性能や発電量あたりに必要なプルトニウム量などの特性の違いにより、候補概念ごとに異なった置き換わり性能を示す。ここでは、可能性のある将来予測シナリオを想定し、原子力発電の発電量の時間推移とFBRシステム導入時点を定め、随時FBRサイクルを導入していく。この想定で軽水炉が消費する累積ウラン資源量をもつ

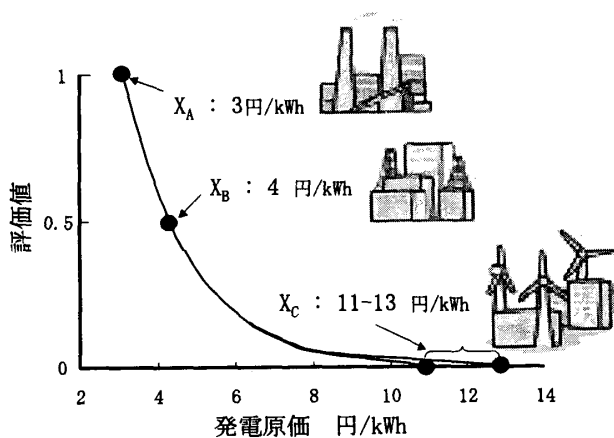


図5 経済性の価値関数

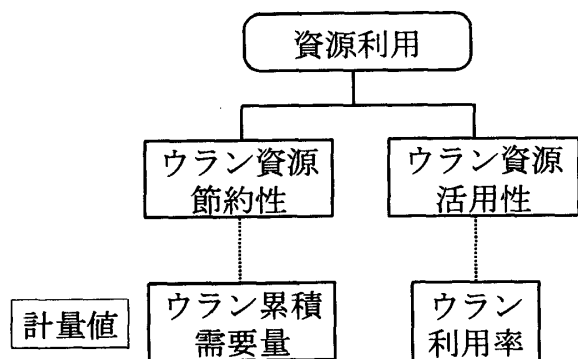


図6 資源利用の下位評価項目

て、節約性の計量値とする。FBRシステムでは、新たなウラン資源を採取することなしに発電し続けることができるので、軽水炉が使用した累積ウラン量が少ないことは、FBRシステムの置き換わり性能が良好であり、資源節約能力が高いことを示している。

ここでは、ウラン資源量と世界と日本の原子力発電の割合から

目標値：日本が確実に確保できる量（予想値）20万トン

ウランの既知資源量の5%に相当

十分値：日本が十分に確保できる量（予想値）40（あるいは80）万トン

ウランの既知資源量の10%（究極資源量の5%）に相当

許容値：日本が確保できる限度量（予想値）160万トン

ウランの究極資源量の10%に相当

と設定した。十分値については、ウランの既知資源量の10%と究極資源量の5%の二つの見解が残っている。天然ウランの資源量は、文献[3]を用いた。また、文献[4]などより、世界と日本の原子力発電の割合は、現在約10%、将来は5%と予測した。

活用性とは、FBRシステムのウラン利用の能力を評価するものでウラン利用効率で計量される。ウラン利用効率は、繰り返しサイクルする場合に廃棄側に移行する核物質質量や燃焼度で決まる。ここでは、想定した累積電力量をウランの核分裂で生じるエネルギーで賄う場合に必要ウラン量と既知資源の比で比較することとした。数百年から千年にわたり、世界の人口や消費エネルギーなどの想定から累積電力量、すなわち分裂するウラン量を求め、

目標値：事実上の無限資源、想定した高電力使用条件で1000年間分の電力を賄う能力

ウラン利用率100%

十分値：想定した中電力使用条件で500年間分の電力を賄う能力

ウラン利用率30%

許容値：想定した低電力使用条件（現状条件）で300年間分の電力を賄う能力

ウラン利用率7%

と設定した。

(3) 環境影響性

FBRシステムの環境影響では、放射性廃棄物に関する部分の評価する。サイクル施設（原子炉、再処理

工場、燃料加工工場)からの廃棄物による直接的な被ばく影響は、施設操業時の気体および液体廃棄物により、発生廃棄物の一部が周辺に放出されるもの(希釈放出)、および施設操業時に発生した廃棄物のほとんどは固化処理され、地層中に埋設処分し、合理的に想定される範囲で長期間後に徐々に生活圏に影響を及ぼすもの(埋設処分)に分けることができる[5]。ここでは、固化処理された廃棄物において、発生量と内在する放射能による潜在的な危険性尺度(放射性毒性という)を廃棄物と処分する施設(廃棄物処分場)の管理の観点から追加する。これらの計量値は、すべて単位電力発生量あたりに正規化する。図7に階層化した評価項目を示す。これら下位基準の環境影響性に対する重み(影響度)は、別途判断する。表1に設定した評価水準点の一例を示す。放射性廃棄物発生量に関する評価水準点では、廃棄物処分場収容容量と累積発電量予測から低減度を規定することができる。ただし、経済性、資源利用性のように今回採用した評価水準の設定に対する考え方をそのまま適用しえないこともあり、仮設定に留めている。

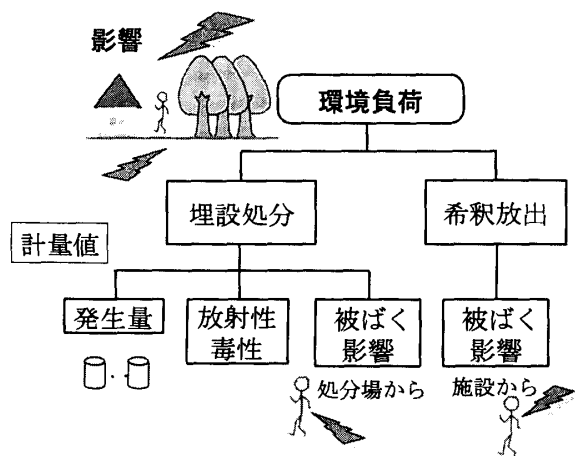


図7 環境影響の下位評価項目

表1 環境影響の評価水準値の一例

		目標値	十分値	許容値
埋設処分	発生量 ^{*1)}	1/100	1/10	1
	放射性毒性 ^{*1)}	1/1000000	1/1000	1
	被ばく影響	検討中		
希釈放出	被ばく影響 ^{*2)}	0.001	0.005	0.05

*1) 基準システムからの低減度

*2) サイクル施設からの被ばく線量率 mSv/Yr 1GWeあたり

(4) 安全性

安全性については、必要不可欠な要件とし、合否判定型の判断のみ行い、他の評価項目とのトレードオフ評価を行わないこととした。

(5) 核拡散抵抗性

FBRシステムで利用するウランやプルトニウムを転用(平和利用目的以外に使用すること)する、あるいは転用されることを困難にすることは重要な要件であり、国際的な制度により不正操作の防止対策を取ることによってこうした核拡散抵抗性を確保している。また、転用時間や、転用に要する人、物、資金および転用の失敗確率の増加を図るような技術的対策を加えることで転用を難しくすることができる。評価項目を分析し、階層化しても概念設計の段階では計量化できない項目が残っており、代替案間の対評価などによる相対的な比較を併用することになる。

対評価による評点と価値関数による評点の整合については、その評価項目での最高評点値で他の代替案の評価値を正規化することなどで対応する。あるいは、相対的な価値判断基準を規定することでも対応できる。計量可能な評価項目での価値関数設定に採用した考え方を拡張し、図8に示すように水準となる代替案(システム)を設定し、それを元に相対的な段階評価を実施する[6]。可能であれば、判断の目安を設定し、新たに追加した代替案の評価を簡素化することも試みる。

(6) 技術的実現性

技術的実現性は、候補概念選定において重要な観点であり、開発投資、期間や開発リスクなどから評価できるが、開発リスクなど現時点では計量できないものがあり、現時点では評価を見送った。今後、定性的な相対比較を実施するか、開発投資などの計量値の不確定性幅を技術的実現性の尺度とするなどの考えを検討する。

(計量不能な) 評価項目毎に設定、評価

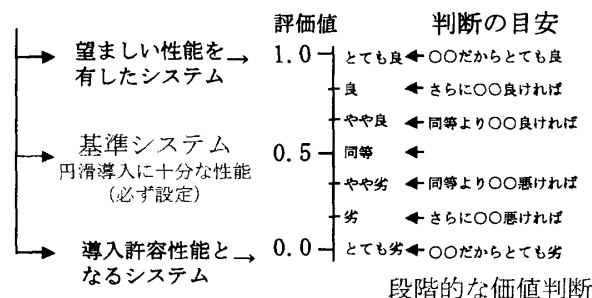


図8 計量不能な評価項目での評価

3. フェーズ1 設計例による予備評価

実用化研究のフェーズ1では、数種の典型的な候補概念について経済性、資源利用性、環境影響性の観点から試評価を実施した。試評価の主目的は、ここで構築した評価システムの適用可能性を確認することにある。ここでは、16ケースの候補概念について経済性、資源利用性、環境影響性の三つの評価項目において各計量値を算出し、評価項目ごとの評点を求めた。詳細は、文献[7]を参照していただきたい。現段階では、資源利用と環境影響の下位の評価項目間の重みは同一と仮定した。経済、資源利用、環境影響のレベルの評価項目間の重みはまだ設定に至っていない。また、核拡散抵抗性と技術的実現性については、フェーズ1の段階では評価を見送った。

図9は、経済性の価値関数上に評価結果をプロットしたものである。

資源利用、環境影響においても同様に設計情報から必要な計量値を算出し、評価値を得た。図10に三つ

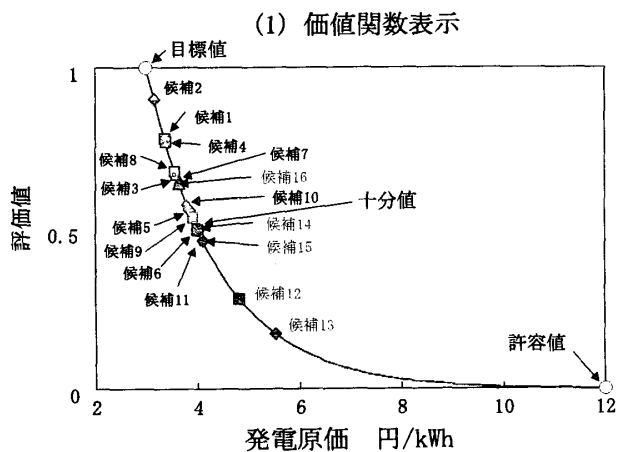


図9 経済性の評価結果

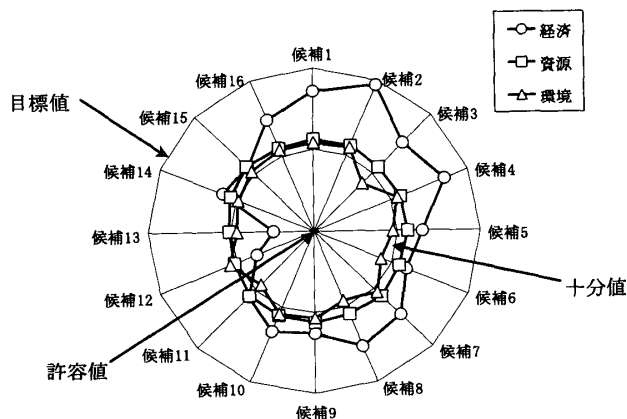


図10 評価結果の分布

の評価項目ごとの評価結果の分布を示す。経済性の観点での評価値は大きく分布しているが、他の評価項目での評価値の分布は小さくなった。資源、環境面の性能を左右する特性について設計時に制約を与えたために両観点での性能はほぼ同一となり、結果的に経済性が候補案の優劣を左右するものとなった。

4. 今後の展開

これまで技術的側面からFBRシステムを評価してきた。今後は、社会のニーズ、要請に対応し、社会が望むべきものとした観点からの評価の実施についても検討していく。すなわち、「社会的受容性」の評価項目からも判断を試みる。これは、図4に示す価値関数が社会、市民の要望などを把握して設定することで判断可能である。

一方、市民の科学技術に対する受容判断に直接結びつくものは、客観的なリスクに対し、心理的要因を考慮した主観的なリスク判断、認知に委ねられることが知られている。同じ大きさのリスクでも自発性、制御可能性、可逆性、公平性、利益、信頼、精通度、科学的な不確かさ、破滅的事態の可能性（潜在性）などの因子の影響（リスク認知の評価項目となる）で捉え方が異なることが示唆されている[8]。ここでは、科学的なリスクに対し、リスク認知に影響を及ぼす因子の影響度を一対評価などを用いて収集し、個人差を有したリスク認知に対する影響度の定量化を試みる。市民の科学技術に対する受容判断を個人差のある有益感（受益）と不安感（損失）の比較と捉えることで「社会的受容性」を明示的に評価することもできる。例えば、代替案*j*の受益の絶対値($B_j^0 = K_B B_j$)、科学的リスクの絶対値($R_j^0 = K_R R_j$)が、代替案間で不変の係数(K_B, K_R)とそれぞれの評価値 $0 < B_j, R_j \leq 1$ の積で表せるものとする。この評価値は、価値関数や一対評価などで算出し、相対的な大小関係を示す数値（比尺度）と捉える。リスク認知に対する増減度(I_j^0)は、リスク認知に影響する因子を評価基準とし、評価基準*k*の影響度を w_k 、代替案*j*のリスクに対する評価基準*k*の評価値を P_{kj} とすれば、 $I_j^0 = \sum_{k=1}^n w_k P_{kj}$ と表現できる。

認知リスクとベネフィットの比は、

$$r_j = \frac{B_j^0}{R_j^0} = \frac{K_B}{K_R} \frac{B_j}{R_j I_j^0} \quad (2)$$

となる。このとき、社会的受容性の観点から代替案*j*と*i*の相対的優劣評価を

$$\frac{r_j}{r_i} = \frac{B_j}{B_i} \frac{R_i}{R_j} \frac{I_i}{I_j} \quad (3)$$

で表せ、算出が難しい係数 (K_B, K_R) を消去できる。従来のリスク・ベネフィット分析を拡張した概念に相当し、社会的受容性の優劣を示す指数と考えることができる。

同時に経済性、環境影響性などの評価項目間の重みを社会、市民の考え、ニーズから判断し、評価結果に反映させていかねばならない。そのための有効な方策の検討も実施していく。

5. おわりに

実用化研究のフェーズ1において、種々のFBRシステム候補概念を対象とし、AHPを中核とした特性評価システムを開発した。特に評価対象が多数存在すること、評価対象の設計研究から定量的な値が示され、評価に定量値を効果的に用いることなどについて、価値関数を採用することで対応を図った。構築した評価システムを用いて、フェーズ1の段階で設計された種々の候補概念を実際に本評価システムに適用し、システム性能を確認した。改良、修正を重ねていくことで本システムで候補概念の特徴を定量評価するのに十分な基本性能を有しているものと判断した。

今後、2, 3の実用化概念選定を目指したフェーズ2における本評価への適用を目指し、精緻化を図るとともに評価結果に対する社会的容認の程度を高めること

に努める。

評価項目間の重みの決定、およびそのために必要となる項目の整理や新しい評価項目として「社会的受容性」の取り込み方(階層構造の形)の検討を行い、評価システムの完成度を上げることを目指していく。

参考文献

- [1] H. Noda et al., Feasibility Study on Commercialized FR Cycle Systems in Japan-The Results in the First Phase and Future Plans of the Study, Global 2001, Paris, (2001).
- [2] T.L. Saaty, The Analytic Hierarchy Process, Expert Choice Inc, (1996).
- [3] OECD/NEA, IAEA, Uranium'99, (1999).
- [4] IIASA/WEC, Global Energy Perspectives, (1998).
- [5] P. Crouail et al., Evaluation of the Impact and Inter-Generation Risk Transfers Related to Release and Disposal of Radioactive Waste from the Nuclear Fuel Cycle: A Methodological Exercise, IRPA-10, (2001).
- [6] 木下栄蔵編著, AHPの理論と実際, 日科技連, (2000).
- [7] Y. Shinoda et al., Development of characteristic evaluation method on FR cycle system, ICAPP, (2002).
- [8] 日本リスク研究学会編, リスク学辞典, TBSブリタニカ, (2000).