

より良い高速増殖炉サイクル実現に向けた OR 手法の活用

塩谷 洋樹

現在、新型の原子力発電システムである高速増殖炉（FBR）サイクルの実用化を目指したプロジェクト（FaCTプロジェクト）が開始された。要素技術開発と試験による技術実証に並行して、FBR サイクルシステムの総合評価手法開発も進行中であり、シナリオ・スタディ、DCF 法、AHP、リアルオプション、サプライチェーン・マネジメント等が活用されている。FBR サイクル実用化には、長期間にわたって多くの関係者による大規模な開発が必要であり、評価手法開発にあたっては、原子力システムのモデル化や知識マネジメントが有益となるが、さらなる OR の活用が期待されている。

キーワード：原子力、FBR サイクル、総合評価手法、知識マネジメント

1. はじめに

“Science of Better” というフレーズがある。このフレーズが OR の目的を表現しているのならば、筆者等もより良い原子力システムを実現するための総合評価手法開発に取り組んでおり、それらの手法を OR の眼から俯瞰的に見直したい。

2. FaCT プロジェクト紹介

2.1 FaCT プロジェクト開始まで

わが国では、原子力開発の草創期から高速増殖炉（Fast Breeder Reactor: FBR）の実用化を目指した研究開発を進めてきた。図 1 に FBR の実用化に向けての研究開発計画を示す。1977 年には高速実験炉

「常陽」、1994 年には「高速増殖原型炉もんじゅ」がそれぞれ臨界に達し、電気事業者においてはもんじゅに続く段階である実証炉の検討を進めていた。

しかし、1995 年のもんじゅナトリウム漏洩以降、FBR の開発全体を検討し直す機運が高まり、高速増殖炉懇談会が開催された。その結果を受けて、1999 年より FBR サイクルの実用化戦略調査研究（FS）が開始された。FS では、数多くの FBR サイクル概念が提案されて検討が進められたが、2001 年までのフェーズ I で、技術的に成立するいくつかの代表的な概念に絞られ、2001 年から 2005 年までのフェーズ II では、その中からナトリウム冷却高速増殖炉に先進湿式再処理法と簡素化ペレット燃料製造法を組み合わせた FBR サイクルを主概念として選定し、重点的に研究開発を進めていくこととなった[1]。

現在、FBR サイクル実用化を目指す取組みは、FBR サイクルの実用化研究開発プロジェクト（FaCT プロジェクト）と呼ばれ、前述の主概念を中心とした FBR サイクルの実用化に向け、国際協力なども活用して積極的な研究開発を進めている。特に原子炉である FBR については、2007 年 4 月に高速増殖炉開発のエンジニアリングなどを行う中核企業が選定され、さらに同年 7 月には高速増殖炉開発のエンジニアリングと研究開発を実施する新会社も設立されて、実証炉の基本的な設計を進める段階に入った。

FaCT プロジェクトでは、主概念を中心とした要素技術開発と試験による技術実証等により FBR サイクル実用化への道筋を付けることが重要課題となるため、

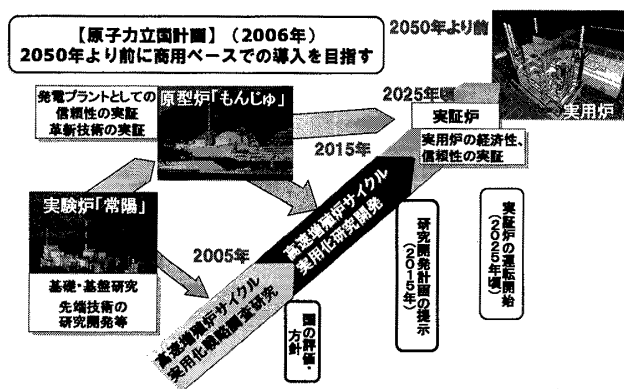


図 1 FBR の実用化に向けた研究開発計画

しおたに ひろき
日本原子力研究開発機構
〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

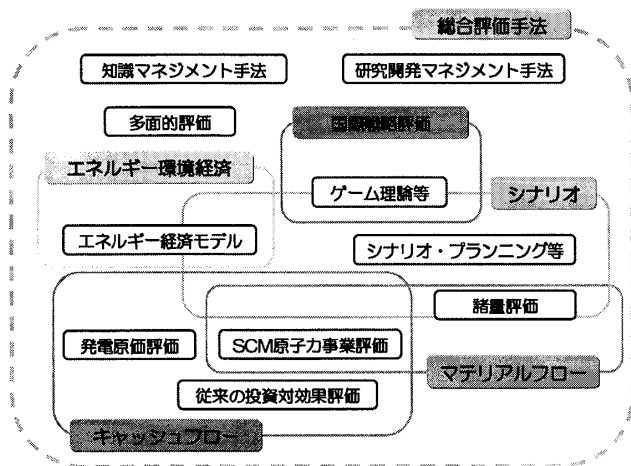


図2 原子力システム総合評価手法概観

現状の原子力事業を踏まえたFBRサイクルへの移行方策や国際協力の活用方法の検討も重視される。

2.2 原子力システムの総合評価手法の概観

筆者が所属している部署は、FBRサイクルを中心とする原子力システムを総合的に評価することに取り組んでいる[2]~[4]。図2は、全くの試案ながら開発している総合評価手法の分類を行ったものである。

ある原子炉で発電する際に生じるキャッシュフロー、発電の原価計算を行う経済性評価手法、原子力システムの核物質のフローに着目し、導入シナリオ策定に活用する諸量評価手法については、長期にわたって開発が続けられてきた。さらに、長期のキャッシュフローに着目し、研究開発費と比較する投資対効果評価手法と多様な評価視点からFBRサイクルを評価する多面的評価手法はFSと軌を一にして開発を行ってきた。また、シナリオ・プランニング等は、様々な局面・評価で用いられてきた。

最近も、キャッシュフローとマテリアルフローを融合した評価を行うサプライチェーン事業評価手法、世界経済全体の動きを踏まえた評価を行うエネルギー経済モデル(による投資対効果評価)、評価手法全般の知的基盤を整備する評価知識マネジメント、多様な不確実性を管理していく研究開発マネジメント手法に着手するなど、旺盛な手法努力が払われている。

以下では、あくまで筆者の私見に基づき、評価手法ごとに対応するORの手法を示して、内容を紹介する。

3. 実用化戦略調査研究(FS)以来の評価手法

3.1 導入シナリオ評価

FSでは、FBR導入シナリオとして、定性的なシナ

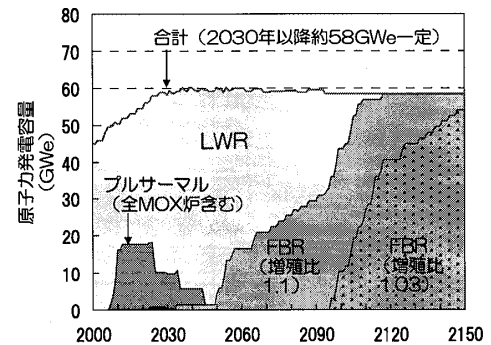


図3 FBRの導入シナリオイメージ

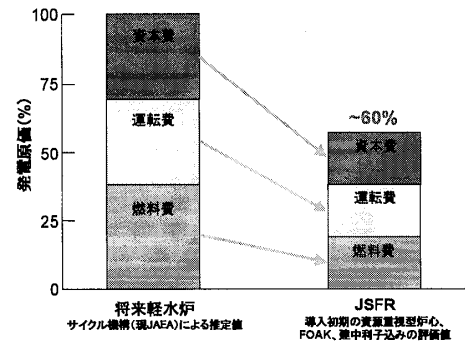


図4 経済性評価の結果例

リオの策定と定量的な諸量評価を実施した。具体的には、まず、FBRが導入される条件(資源、経済性、環境負荷低減等)の要因を分析し、将来の社会における社会事情を組合せて導入へのシナリオの骨組みを策定した。ここでは要因分析図(QCの手法)[5]が用いられた。次いで、それらのシナリオを踏まえ、原子炉と再処理や濃縮といった周辺のサイクル施設における核燃料量等を算出できる諸量評価手法を用いてFBRの導入計画を立案した。その際には、FBRの燃料となるプルトニウム(Pu)が再処理によって適切に供給されることを確認して、軽水炉からどの程度のペースでFBRに置換できるのか計算することを主眼とし、併せて天然ウラン(U)の需要量や廃棄物中に移行するアクチニド(U, Pu等を含む元素のグループのこと)量も算出し、それらはFSの設計における参照条件として活用された。なお、精度や目的に応じていくつかの諸量手法が開発され、それぞれ原子炉内でのアクチニド燃焼、放射性核種の崩壊、再処理における元素の分離、核燃料製造時のPu量(Pu富化度)の調整を模擬する機能等に特色が見られる。

図3に示す諸量評価の結果例からは、増殖比として1.1~1.2程度のFBRを導入初期(2050年~)に建設すれば、軽水炉の寿命終了の際に漏れなくFBRで

置換するシナリオを構築できることがわかる。

3.2 経済性評価

FSでは、設計研究の結果に基づき、実用化にあたって大きな課題であるFBRサイクルシステムの経済性評価も行われた。経済性の評価では、1基の原子力発電所が発電する際、原子炉を含む核燃料サイクル全体の費用を対象とする。このとき、DCF (Discounted Cash Flow: 割引キャッシュフロー) 法を用いた。DCF法では、現在価値に換算した費用をある現在価値換算の基準年に積み上げ、並行して発電所の耐用年期間中に発電した電力の価値も現在価値に換算して基準年に積上げる。この両者から単位発電量当たりの費用を算出する。上記の手法は、現在価値に換算した費用と電力量を耐用年で平均することから、耐用年平均現在価値換算法とも呼ばれ、標準的な手法となっている。

原子力発電の経済性(発電原価)は、資本費、運転費、燃料費の3項目に分類される。

資本費に関しては、炉の建設で要する費用を積み上げ、建設期間中の利子額を加え、廃止措置に必要な費用も加算する。運転費については、人件費や修繕費、消耗品費などに税を加えて算出する。燃料費は、核燃料サイクルに関する費用である。天然ウラン購入から転換、ウラン濃縮、燃料加工までのフロントエンドといわれる段階と使用済燃料輸送から再処理、廃棄物処理・輸送・処分といったバックエンドといわれる段階の両方についてそのキャッシュフローを炉に装荷される時期を基準年として積算する。

これまでに得られた評価結果からは、FBRサイクルによる発電は、将来の軽水炉サイクルによる発電と比較しても競争力があると考えられる(図4参照)。

3.3 投資対効果評価

高速増殖炉懇談会や特殊法人改革において、投資対効果評価の重要性がクローズアップされた。FSでは、

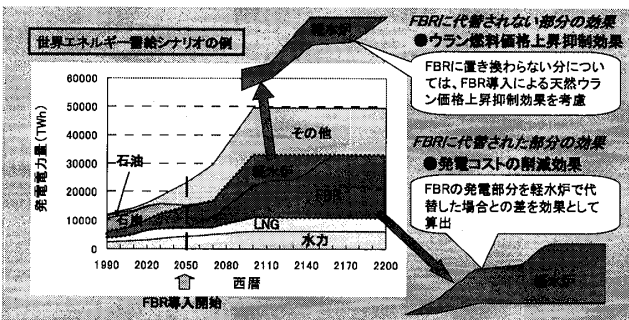


図5 従来のFBRサイクル投資対効果評価手法

プロジェクト評価の基本的な手法である費用便益分析を用いてFBRサイクルの研究開発費とその成果であるFBRサイクルの導入効果を金銭的に評価し、両者を比較することによりFBRサイクル研究開発の投資対効果を検討した。

投資対効果の評価にあたっては、あらかじめ原子力発電の発電原価の時系列変化を算出し、それを用いて経済的効果を積算した(図5参照)。そこで、投資対効果評価は、経済性評価との結びつきが強く、後述するSCM事業評価手法と類似した手法である。

これまでの評価からは、発電原価が安く天然ウランを利用する必要のないFBRを導入することにより、発電原価の低減効果と天然ウラン利用の節約効果が生じて直接的な経済効果が得られること、加えて、天然ウランの輸入量削減による効果も期待でき、実用化までの研究開発費用を投資しても十分な効果を得られる見込みを得ている。

3.4 多面的評価

FSでは、多くのFBRサイクル候補概念の中から重点的に研究開発する概念を選択する必要があった。そこで、FSの開発目標に照らして経済性、環境負荷低減性、資源有効利用性、核拡散抵抗性といった多くの評価視点から総合的な評価を行う多面的評価手法を開発した。多面的評価では、各評価視点の評価にあたっては、さらに下位の評価項目を選定したが、これらを合算するために、多属性効用分析[6]の考え方を活用した。また、主に評価視点の結果を合成する際の評価視点の重み付けに、階層分析法(AHP: Analytic Hierarchy Process)を活用した[7]。なお、下位の評価項目は、主に専門家による判断で重み付けした。

一例として、環境負荷低減性の評価視点では、下位の指標として、廃棄物発生量、放射性毒性、および被ばく影響からなる評価構造を作成した。廃棄物発生量、放射性毒性、および実効線量率の重み付けは同等とし、体積換算した廃棄物発生量と廃棄物処分場の面積に換算した廃棄物発生量では、面積換算した廃棄物発生量の方が環境負荷の観点から重要であると考えて、2倍

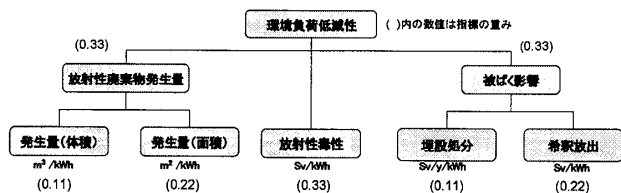


図6 多面的評価での評価構造(環境負荷低減)

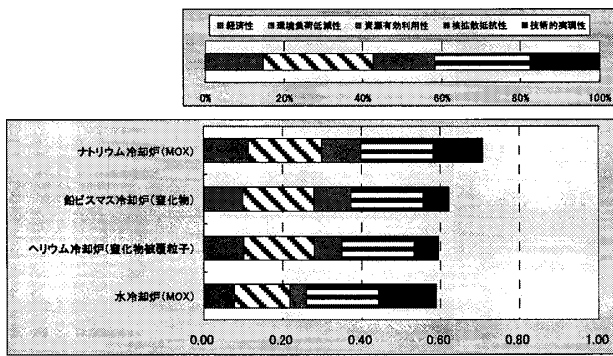


図7 多面的評価の結果 (FBRのタイプ別)

の重みとした。さらに被ばく影響に関しては、現時点で影響が発生する希釈放出の方が埋設処分よりも重要であると考えて、希釈放出する放射性廃棄物による被ばく影響の重みを埋設処分する放射性廃棄物による被ばく影響の重みに対して2倍とした(図6参照)。

評価にあたっては、評価手法作成側と候補概念設計研究側との共同作業により最下位指標の評価用関数を定め、上記の評価構造にしたがって評価結果を合算して各評価視点について効用値を算出した。

多面的評価では、異なる評価視点で評価した各効用値を合算する際の重み付けが大きな問題であった。FSでは、集団AHPを活用し、インターネットを用いたアンケート等の結果から、各ステークホルダー(一般の市民、電力会社、有識者)の重視する評価視点の重みを設定した。

これにより、複数のFBRサイクル候補概念を定量的に評価可能となった。図7に示す多面的評価の結果からは、ナトリウム冷却炉サイクルが最も有望であることが示された。

4. 開発中の評価手法

4.1 エネルギー経済モデルによる評価

従来の投資対効果評価などで評価される効果は、GDPや経済厚生とは直結せず、波及的な経済影響も計測できなかった。そこで、新たにFBRサイクル導入時の経済的影響を適切に分析するため、応用一般均衡モデルを活用したエネルギー経済モデルを開発中である(図8参照)。このとき、FBR導入の効果はGDPや経済厚生の向上として算定できる。

ただ、従来の一般均衡モデルは、2つの均衡状態を比較する静学モデルであること、電力産業は一まとまりとして扱われ、電源構成の変化を記述できるモデルとなっていないことから、新規の発電技術である

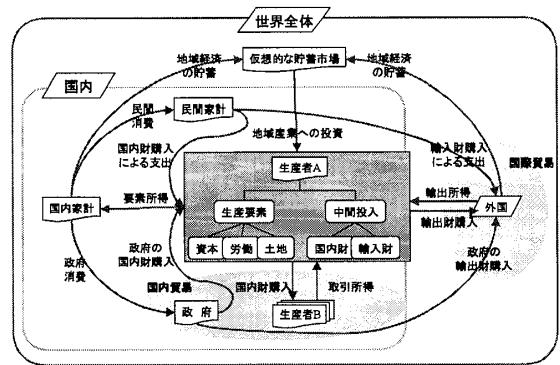


図8 エネルギー経済モデルの例

FBRサイクルの導入による経済的影響を評価することは難しかった[8]。この課題を克服するため、投資に対する資本収益率を踏まえた投資行動や資本蓄積の時間変化を考慮可能なようにモデルを動学化するとともに、FBRサイクルを含むエネルギー分野の主要技術特性を明確に扱う技術バンドル(市場における技術の選択肢)を取り入れ、さらに動学的な制約条件を考慮できるようなモデルを構築した。上記の改良により、電力部門の詳細化を実施し、FBR導入の経済的価値を算出可能となった。

このモデルを用いた試算結果から、安価なFBRサイクルシステムが実現し導入された場合、エネルギー利用における非電力から電力へのシフトが加速され、従来の投資対効果評価結果よりも大きな導入効果もたらされる可能性があることがわかった。

今後は、FBRサイクル導入の社会的・経済的価値は超長期的な(100年~200年)視点で検討する必要があるため、その間に起こりうるエネルギー資源分野の産業構造の変化(水素燃料の導入など)や次世代原子力システムと競合する技術(CO₂回収付き石炭火力、新エネルギー、革新的な省エネ技術)の進展シナリオを反映した上で、次世代原子力システムの社会的価値等を評価する予定である。

4.2 サプライチェーン原子力事業評価

将来の原子力事業に関しては、FBRサイクルへの移行を見据えて多くのオプションが共存しており、研究開発対象は頻繁に変化する。

また、施設の特性に関する不確実性として、建設コストに係る不確実性、操業時のトラブルや社会的事件に起因する不確実性、および経済性向上を目指した技術と廃棄物の低減や資源の有効利用を目指した技術による特性の違いによる不確実性等が考えられる。これらを見据えた検討を進めるには、不確実性の要因が原

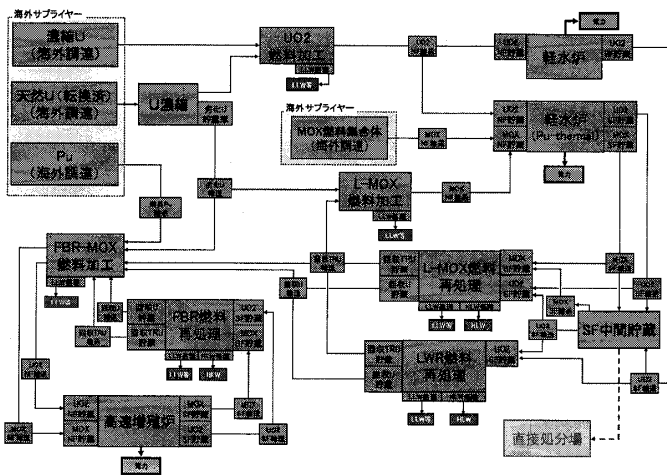


図9 原子力事業のサプライチェーン（処分を除く）

子力事業システムの様々な特性に及ぼす影響を適切に評価せねばならない。

そこで、核燃料サイクルを含む原子力サプライチェーンをモデル化し、原子力事業者におけるサプライチェーンマネジメント（SCM）を支援する手法（SCM原子力事業評価手法）を開発している[9]。この手法は、今後100~200年程度の期間にわが国で操業する多くの施設における核物質や廃棄物中の1000以上の核種組成、使用済燃料等の発生量等を踏まえたキャッシュフローを算出可能である。さらに貯蔵施設や輸送もモデル化し、ある不確実性が他施設に及ぼす経済影響の評価や、一定の収益を確保した上で、原材料や部品の調達、施設の場所や種類の選択、貯蔵庫の規模や輸送手段の選択に関する検討も可能となる。

4.3 国際戦略評価手法

近年の大型プロジェクトの例に漏れず、FBRサイクルの開発に関する国際協力プロジェクトが多く進められており、共同開発等も視野に入れた検討が行われている。FBRサイクル開発国にとって国際協力の主要な目的は、以下の2点に集約される[10]。

- ① FBR開発の効率化（既存施設等の有効活用による開発費の低減、研究開発困難な技術開発の分担）
- ② 国際標準化への寄与（国際市場から除外されるリスク軽減等）

国際協力の戦略を検討・評価する数理的な手法として、複数の参加者による合理的な交渉や提携のあり方を検討するゲーム理論や複雑系評価手法が考えられるが、FBR開発の効率化に関してゲーム理論を用いて検討する場合、様々な費用分担方法の考え方があり

[11]、さらに提携国の獲得利得を考慮した提携・費用分担分析を行うことが考えられる。国際標準化に関しては、わが国の技術が国際市場から除外されるリスクが軽減されることによって他国への原子力プラントの輸出増大が想定される。そのためには、世界各地における次世代原子力システムの導入量を把握しておき、国際標準化分析の基礎データとする必要がある。

4.4 研究開発マネジメント手法

FBRサイクルの研究開発は、長期間にわたる大規模なもので、大きな不確実性を有する。現在、主概念の絞込みを終え、実証・実用施設の建設と導入に向けて経済性向上等を目的とする研究開発を進めて革新技術の成立性や開発リスクに関する知見を集積し、開発費用をマネジメントするフェーズであると整理できる。

DDP計画法[12]は、新技術の実用化にあたって、達成目標と開発リスク（開発成否への見通しの不確実性と実現の困難さを含む）を仮説リストとして整備しておき、研究開発の進展に応じて開発リスクの変化をマイルストーンごとに把握して、不確実性を効率的に減少させる。不確実性の軽減を明示的に考慮できること、収益性に着目したマネジメントを行うことに特徴がある。これらの特徴は、先に述べたFBRサイクル実用化研究開発の現在の研究開発フェーズと整合しており、マネジメント手法として有望な面がある。

理論的な面では、リアルオプションの考え方を研究開発計画の効率化に活用している点が興味深い。これは儉約志向と言い換えられるが、その主目的は、費用を極力抑えつつできるだけ多くの事柄を学習することである。FBRサイクル研究開発において、まず、机上検討、小型の実験プラントから始め、段階的にプラント規模を大きくしながら技術性能やコストなどを評価して、最終的に実用プラントを実現するプロセスなどは、リアルオプションの有効利用による儉約志向と見なすことができる。なお、国際協力の有効活用を図ることも儉約志向に含まれる。

FBRサイクルの実用化には、現実からの乖離を避けながら理論的な視点も踏まえて、有効に研究開発資源を利用していくことが望ましい。

5. 評価関連知識のマネジメントに向けて

5.1 評価手法のモデル化の普遍性と特殊性

FBRサイクルの研究開発の進捗に応じて、評価手法のバリエーションも増加し、個々の手法も次第に高度化、大規模化してきて扱うデータの種類や量も増え

ている。そこで、評価者には、原子力技術と評価手法の双方に関する多くの知見が必要となってきた。さらに、評価結果と意思決定の因果関係といった背景情報の散逸を防ぐ必要も生じてきた。こうした状況を踏まえ、評価手法とデータ、評価結果に関するモデルや情報を保存し、マネジメントする意義が増してきた。

筆者は、原子力研究開発や事業のモデルや評価手法も、他分野のものと普遍的な特徴を有するべきと考えている。もし、何か特殊な点があるのならば、それは原子力固有の特徴に焦点を当てた場合だけであろう。

例えば、放射性物質の崩壊や核分裂といった現象の評価には独特の手法を用いる。しかし、FBRの研究開発であっても、通常のプロジェクトと同様にキャッシュフローに注目した費用便益分析を行えばよいはずである。また、原子力事業のSCMも一般産業のSCMと考え方の基盤は同じだろう。

他方で、投資対効果評価（効果の評価）とSCM原子力事業評価は、両者共に時系列のキャッシュフローをベースにした評価と考えられるが、投資対効果評価では、わが国平均の耐用年平均発電原価を年ごとに計上するのに対し、SCM原子力事業評価では、各施設の物流に直接対応した詳細費用を年ごとに計上するという違いがある。これは、SCM原子力事業評価では、ビジネスモデル分析や施設戦略検討も視野に入れているためである。ビジネスモデル分析等では、バリューチェーンを想定して収益を得るプロセスを検討し、SCMによる事業全体の効率化が志向されるが、そのことが、キャッシュフローをより詳細にモデル化するという手法上の相違となって現れてくる。

従来、手法開発に携わってきて、評価における普遍性と特殊性への筆者の意識は高くなかったかもしれない。しかし、よりよい評価手法を作成するためには、評価目的に照らし、原子力システムをどう構造化、抽象化すべきかを意識して評価モデルを検討を行うべきと自戒している。

5.2 評価関連知識のマネジメント

わが国で本格的な原子力開発がスタートして半世紀が経過した。その間技術開発を支えた原子力技術者が現役を退く例も多くなり、他の工業技術と同様に技術の継承が重要な課題となってきた。

FBRサイクル開発では、原子炉、燃料サイクル施設、廃棄物処理処分技術や検査・測定・分析技術の開発といった広範な技術を扱うこと、実用化までに建設できる施設数が非常に少ない超大型技術特有の問題を

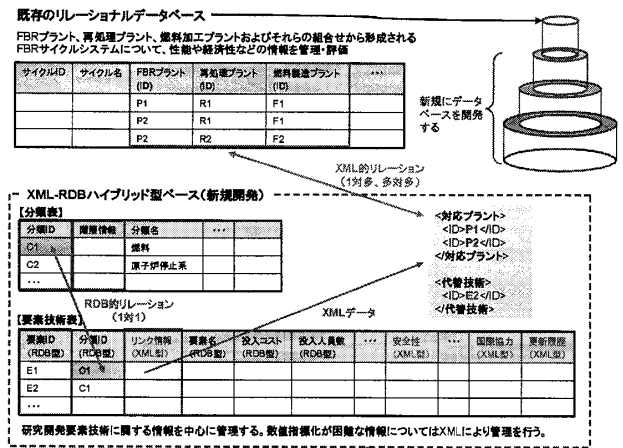


図10 評価知識基盤となるデータベース例

有するといった技術・知識の共有化を阻む要因がある。さらに2050年頃の本格導入まで40年程度の期間をかけて基幹電源として実用化を目指すため、その間に開発担当者も変わる上に、実用化が近づくにつれてますます多くの関係者が関わるであろうこと、国際的な開発の進展も予想されること等から、関連技術・知識の共有化や継承がとりわけ重要になると予想される。

こうした技術・知識の共有化や継承問題に対して、知識の構造化を通じた知識マネジメントは有力な処方箋であるとされており、原子力分野においても各所で知識マネジメントを推進する動きが出てきている。原子力システムの総合評価についても、研究開発の戦略的な意思決定を支援する情報を提供することや設計研究の基盤となる情報を提供することも多いため、小さい分野ながらもその例外ではない。これまで関連情報を収集・蓄積する努力が払われてきており、部分的なデータベースは作成されてきたものの、いかなる前提条件や入力データを用い、どのような手法によって評価を行ったのか、さらに評価結果が、どんな議論や考察を経て戦略的な意思決定に反映されたのかといった点についても、可能な限り明確化し、包括的にデータ・情報・知識として管理しておくべきである。

今後は、国際的に広く利用されている統一モデリング言語：Unified Modeling Language (UML) や拡張可能マークアップ言語：eXtensible Markup Language (XML) を活用して、評価モデルや研究開発関連情報を明確化して諸外国を含む多様な関係者への伝達を容易にすること、効果的に知識・モデルを共有・マネジメントするためのデータベース化・Web化に向けたインフラを構築することが、さらに重要となるだろう[13]。

6. おわりに (OR の活用)

筆者は、これまでORの手法を活用することを意識して業務に取り組んできたわけではなかった。しかし、参考のためにOR学会機関誌のバックナンバーを見直してみると、ORが従来思ってきたよりもずっと日々の業務に身近なことを実感した。筆者達がFBRサイクルの実用化に向けて開発中の評価手法について、対応するORの手法やその位置づけも確認でき、ORの知見を総合評価に活用できるという期待感も持った。

理論的仮説だった新規技術を、安価で社会から信頼され、受容される実用の技術とすることを目的として、必要な理論研究、実験や機器試験を行って公共財としての知識を蓄えることが、国家的な研究開発の意味ならば、研究者・技術者も研究開発から産出される知識に対して真摯に向き合う必要がある。筆者達が取り組んでいる原子力システムの総合評価や他の研究開発に関しても、原子力システムをどの観点からモデル化し、どのようなデータを用いていかなる手法で評価するかについて、自覚なマネジメントが重要となる。そのために、“Science of Better”の学問であるORで開発されてきた多様な手法を学び、より良い高速炉サイクルシステムの実現に向けて活用していきたい。

本報告には、旧電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、独立行政法人日本原子力研究開発機構が実施した平成18年度「不確実性を考慮した原子力システム研究開発評価法に関する研究」の成果が含まれています。

参考文献

[1] 独立行政法人日本原子力研究開発機構 日本原子力発

電株式会社：“高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズII最終報告書,” 2006.

[2] 篠田佳彦他：“総合評価技術検討書—実用化戦略調査研究 (フェーズI) 成果報告—, JNC TN 9400 2001-061,” 2001.

[3] 塩谷洋樹他：“高速炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズII中間報告—総合評価技術検討書—, JNC TN 9400 2004-052, 2004.

[4] 独立行政法人日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門 FBRサイクル統括ユニット エネルギー評価グループ：“高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズII技術検討書—(3)総合評価—,” JAEA-Research 2006-044, 2006.

[5] 甲斐章人：“グラフで生産効率を上げる本,” 経林書房, 1982.

[6] R. L. Keeney and H. Raiffa: “Decisions with Multiple Objectives, Preferences and Value Tradeoffs,” Cambridge University Press, 1993. (First Published by John Wiley & Sons, 1976.)

[7] 木下栄蔵他：“AHPの理論と実際,” 日科技連出版, 2000.

[8] B. V. Dimaranan, Global Trade, Assistance, and Production: “The GTAP 6 Data Base, Center for Global Trade Analysis,” Purdue University, 2006.

[9] 久保幹雄：“実務家のためのサプライ・チェーン最適化入門,” 朝倉書店, 2004.

[10] 科学技術・学術審議会 原子力分野の研究開発に関する委員会：“高速増殖炉サイクルの研究開発方針について,” 2006.

[11] 鈴木光男：“新ゲーム理論,” 勁草書房, 1994.

[12] リタ・マグレイス, イアン・マクミラン著, 大江建監訳, 社内起業研究会訳：“アントレプレナーの戦略思考技術,” ダイヤモンド社, 2002.

[13] 大澤幸生：“知識マネジメント,” オーム社, 2003.