

核燃料サイクルを考慮した世界の原子力利用最適化モデルの開発

Development of a Model to Optimize Global Use of Nuclear Energy Considering Nuclear Fuel Cycle

*バートルフー ウンダルマー¹, 堀尾 健太¹, 小宮山 涼一¹, 藤井 康正¹

¹ 東京大学

エネルギー安全保障や気候変動対策等を踏まえると、世界全体では引き続き原子力発電利用が継続すると見られているが、原子力の恩恵を最大限に享受するためには、資源制約や廃棄物処理処分など様々な要素を含めて、適切な利用を考える必要がある。本研究では、経済性や核物質収支等を考慮して、世界規模での原子力利用の最適化を行うモデルを開発した。

キーワード：核燃料サイクル，経済モデル，線形計画

1. 緒言

本研究で開発したモデルは、線形計画法を用い、核燃料サイクルの総費用の最小化を通じて、原子力発電の運用を決定するものである。これにより、経済合理性や資源制約などを考慮した原子力利用の最適化を目指す。なお、本研究の対象期間は100年（1年を1時点として100時点）である。

2. モデルの開発

2-1. 核燃料サイクルの考慮

本モデルにおける核燃料サイクルは、資源採掘、濃縮、燃料製造、発電、使用済燃料（SF）中間貯蔵、SF再処理、SF及び高レベル放射性廃棄物の最終処分から構成する。発電過程では従来の軽水炉や重水炉に加え、将来的な導入が期待されている高速増殖炉、高温ガス炉及びトリウム燃料炉も対象とする。また、燃料組成データは既存の研究[1][2]を基に、自然崩壊による組成変遷を考慮して作成した。

2-2. 定式化

目的関数：全時点における核燃料サイクルの総費用を、割引率を考慮して現在価値に換算した値が最小化の対象となる(式 1)。サイクルの総費用は、固定費(各種原子炉、各種工程設備)と可変費(燃料費、各工程運用費)の総和からなる。

$$\text{Minimize obj} = \sum_y \sigma \times (fc_y + vc_y) \quad (1)$$

(σ 割引率項, fc_y 固定費, vc_y 可変費, y 時点)

制約関数(例)：主な制約条件として、電力需給バランス(式 2)、設備容量制約(式 3)、SF貯蔵制約(施設内・施設外)、核物質の需給バランス(U, Pu)(式 4,5)、ウラン資源量制約等、Pu富化度制約などを考慮した(制約条件式の総数 334, 315 本、対応する変数 1, 603, 988 個)。

$$\sum_p gen_p = Load + X_i \times swu \quad (2)$$

$$gen_{y,p} \leq kp_{y,p} \times URP \times 8.76 \quad (3)$$

(gen 発電量, $Load$ 原子力需要, p 原子炉, X_i swu 当たりの消費電力, kp 容量, URP 稼働率)

$$un_y = \sum_{f,b} uf_{y,f,b} + \sum_d ud_{y,d} \quad (4)$$

$$\rho_n \times un_y = \sum_{f,b} (\rho_{f,b} \times uf_{y,f,b}) + \sum_d \rho_d \times ud_{y,d} \quad (5)$$

(ρ_n 天然ウラン un_y の ^{235}U 濃度, $\rho_{f,b}$ バッチ b 燃料 $uf_{y,f,b}$ の ^{235}U 濃度, ρ_d 劣化ウラン $ud_{y,d}$ の ^{235}U 濃度)

3. 結果(例)

右図は、世界の原子力発電容量の年間増加率を 2.3%、ウラン価格の年間上昇率を 4%に設定したシナリオ ([3]参照)における原子力発電容量構成の計算結果の例である。

対象期間の前半に既存の軽水炉(BWR, PWR)は改良型軽水炉(ABWR, APWR)に置き換えられた。後半では、ウラン価格の上昇により MOX 燃料で発電する高速増殖炉(FBR)の経済的競争力が上がり、発電構成上重要性を持つ結果になった。

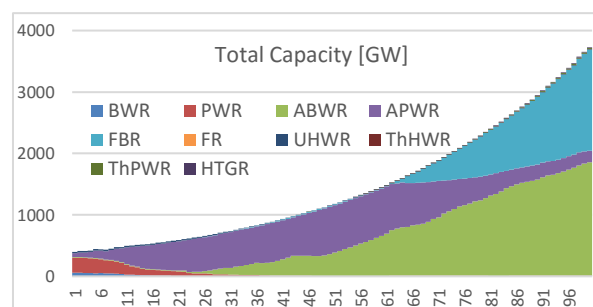


図. 原子力容量構成推移

参考文献

[1]小藤 博英, 小野 清. プルトニウム多重リサイクルによる同位体組成変化の解析. (1997)

[2] IAEA. Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems. (2012)

[3] IEA. World Energy Outlook 2014. (2014)

*Undarmaa Baatarhuu¹, Kenta Horio¹, Ryoichi Komiyama¹ and Yasumasa Fujii¹

¹The University of Tokyo.