

内生的生産習熟効果を考慮した原子力小型モジュール炉の最適運用に関する検討

Consideration of optimal operation of small modular reactors

considering endogenous manufacturing learning effect

*内藤 駿介¹, 小宮山 涼一¹, 藤井 康正¹

¹ 東京大学

気候変動対策等を踏まえ、今後も世界全体で原子力発電の普及が進展していくと考えられる中で、その初期費用の低さや安全性の高さから、小型モジュール炉（SMR）が注目されている。本研究では、SMR の建設においてあらわれる習熟効果を考慮して、世界全体での SMR の普及の可能性を検討した。

キーワード：核燃料サイクル、小型モジュール炉、習熟効果、混合整数計画問題

1. 緒言

本研究では混合線型計画法を用い、核燃料サイクルの総費用の最小化を通じて、経済合理的な原子力発電の運用を決定する。SMR の建設費については、累積導入容量にしたがってコストが低下する習熟効果を考慮する。習熟効果をあらわすために、モデル内では整数変数を使用した。

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される。発電過程では SMR のほか、従来の軽水炉や重水炉に加え、将来的な技術として高速炉、トリウム燃料炉を対象とする。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された。

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、現在価値に換算した値が最小化の対象となる(式 1)。

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

(σ :割引率項, fc_y :固定費, vc_y :可変費, oc_y :O&M 費, y :時点)

習熟効果：SMR の累積導入容量が増加するにつれ、建設費(\$/kW)は逓減する(式 2-4)。

$$\sum_{n=0}^N c_n S_{ny} = \sum_{y=0}^y nkp_{SMR,y0}, \quad \sum_{n=0}^N i_n S_{ny} = \sum_{y=0}^y fcpsmr_{y0} \quad (2)$$

$$i_{2n-1} = i_{2n} \left(n = 1, \dots, \frac{N-1}{2} \right), \quad c_{2n-1} = c_{2n} \left(n = 1, \dots, \frac{N-1}{2} \right) \quad (3)$$

$$S_{2n} + S_{2n+1} = \delta_{2n+1} \left(n = 0, \dots, \frac{N-1}{2} \right), \quad \sum_{n=0}^N S_n = 1 \quad (4)$$

($y0$:初年度, $nkp_{SMR,y}$: y 時点の新規建設量, $fcpsmr_y$: y 時点の建設費, N :格子点の数, (c_n, i_n):習熟曲線上の座標, S_{ny} :ある一組の隣り合う二つの変数の和が1かつ他の変数は0である変数のセット, δ_n :0 または 1)

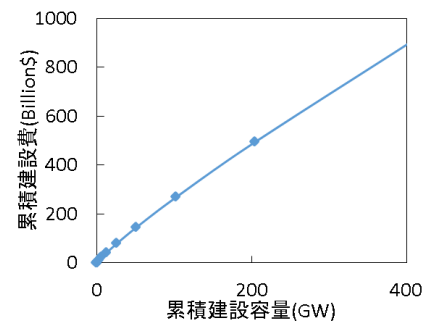


図 1. 習熟曲線 の 概念

3. 結果(例)

右図は、SMR の習熟率を 7%, NOAK 建設費を 9000\$/kW とした場合の、世界の原子力発電設備構成である。軽水炉の建設費は、先行研究[3]を基に期間中 4100\$/kW から 6880\$/kW まで上昇するとした。対象期間の前半に既存の軽水炉(LWR)は改良型軽水炉(ALWR)に置き換えられた。後半では、軽水炉の価格上昇に伴い、軽水炉より建設費が高いにもかかわらず SMR が導入された。十分な需要が存在する場合、SMR は NOAK 価格が高くても導入される可能性があることが示された。

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] MIT Energy Initiative. The future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World. (2018)

*Shunsuke Naito¹, Ryoichi Komiyama¹ and Yasumasa Fujii¹

¹The University of Tokyo.

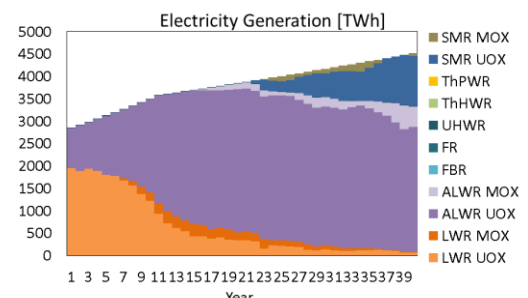


図 2. 原子力発電設備構成推移