

<研究抄録>

原子炉システムにおける核燃料 資源利用効率の分析

電力中央研究所報告 No. 577003

山 地 憲 治

本論文では、原子炉内での核燃料の燃焼及び生産を中心とする原子炉システムの特徴を、核燃料資源の有効利用という観点から分析した。原子炉及び核燃料サイクルの特徴を表わす最小限のパラメータから、原子炉システムの特徴が演繹的に導けるように、論理の展開に注意を払った。

まず、1章では、原子炉内での1gの核分裂性物質の正味の減少によって、いくらのエネルギーを発生させられるかを表わすエネルギー抽出効率 E_r という指標を導入した。増殖炉については、核分裂性物質1gからの抽出エネルギーは無量大となるので、親物質も含めた核燃料1gからいくらのエネルギーを発生させられるか (E_r') を計算し、核燃料物質がすべて核分裂した場合に持つ潜在的なエネルギーの何%を発生させられるのかを表わす潜在的エネルギー抽出効率 E_r'' を導入した。軽水炉、CANDU-PHW, ATR という3つの転換炉について E_r を試算し、1.97~3.58 (MWd/g-fis) という値を得た。また、増殖炉では E_r'' が92~99%に達することがわかった。しかし、これらの値は原子炉内の核反応だけを考慮して計算されており、実際のエネルギー抽出効率の最大限界を与えるものである。

そこで、2章では、原子炉外の核燃料サイクルも含めた原子炉システムでのエネルギー抽出効率 E_s 、潜在エネルギー抽出効率 E_s'' を表わす式を導出した。転換炉系については、1章で使った3つの炉型による7つの炉システムをとりあげて、これらの指標を試算した。その結果、潜在エネルギー抽出効率で0.5~2.0 (%) という値が得られ、炉内のエネルギー抽出効率 E_r とともに、炉外の核燃料サイクルシステム上の仮定、特に濃縮プラントの tails assay の効果、リサイクリングの効果の重要性が定量的に確認された。

増殖炉システムについても N 回のリサイクルをした後はその核分裂性物質を廃棄すると仮定して、1gの核分裂性物質からのエネルギー抽出効率 $E_s(N)$ を導出した。LMFBR の特性を用いての計算結果では、 $E_s(0)$ は、軽水炉なみのエネルギー抽出効率しかなく、分裂性物質からのエネルギー抽出効率が無量大となるといふ、増殖炉の特長を発揮するには、4回以上のリサイクルが必要であることがわかった。このことは、増殖炉システムにおける再処理の特別の重要性を示している。

次に、3章では、原子炉システムが時間的に成長する場合の核燃料資源利用効率を分析し

た。

3.1 では単一の原子炉炉型でシステムを構成する場合について考察した。まず転換炉システムの場合は、原子炉寿命を考えた単位出力あたりの天然ウラン要求量 L が適切な指標となるので、これを2章で求めたエネルギー抽出効率から導出した。2章で分析した7つの転換炉システムに加えて、更に4つのシステムについての値を得て、相互比較を行なった。これら11の転換炉システムの単位出力あたりの天然ウラン要求量には、相対値にして0.25~1.20のパラツキがあることがわかった。しかし、いずれにしても無限のエネルギー源を保証できるシステムではないので、無限のエネルギー源への開発余裕を与えるものと解すべきであろう。

次に増殖炉システムについては、システムを新設するためのインベントリー量と倍増時間が重要な指標であることを示し、直線的に拡大する原子炉システムについて、増殖炉システムの自立点を求め、その時までに必要な外部への核分裂性物質要求量 Q を求めた。またこの場合の核分裂性物質を天然ウランで供給すると仮定して単位出力あたりの天然ウラン要求量を導出し、転換炉と比較して、はるかに少なく済むことを示した。

3.2 ではいくつかの原子炉炉型を組み合わせで直線的に拡大する原子炉システムを構成する場合を考察した。

まず、インベントリーは大きい倍増時間は小さいという増殖炉と、逆に倍増時間は大きいインベントリーは小さいという増殖炉の2つをうまく組み合わせることによって、各々単独でシステムを構成する場合よりもシステム外への分裂性物質要求量を小さくできることを、最大値原理を適用して示した。この場合の最適解

は、まずインベントリーの大きい増殖炉を建て、システムの分裂性物質生産性を大きくしておき、ある切り換え点以降はインベントリーの小さい増殖炉でシステムを拡大していくという、いわゆる bang-bang 制御となることがわかった。LMFBR と MSBR の組み合わせで、具体的な数値を設定して計算してみると、最適化により、システム外への分裂性物質要求量を50%以上減少させられることがわかった。

次に、増殖炉システム成長時の分裂性物質要求を、先行する転換炉で供給する場合を考察し、増殖炉との組み合わせの良い転換炉の選択問題を分析した。増殖炉としてはプルトニウム燃料の LMFBR を考え、プルトニウムの、拡大する原子炉システム内での生産と消費の様子(=プルトニウム・ダイナミクス)を中心に分析をすすめた。1章、2章の理論から、転換炉のプルトニウム生産性を求め、LMFBR を自立させるに必要な転換炉容量を求め、システム全体としての天然ウラン要求量 L^* を導出した。その結果、軽水炉、CANDU-PHW、ATR (Pu 生産型)のうちでは、CANDU-PHW が、LMFBR と最も良く適合することが示された。

最後に、転換炉から増殖炉へと推移するシステムにおいて、転換炉によるプルトニウム生産およびプルトニウム・リサイクルのタイミングの問題を考察した。

転換炉によるプルトニウム生産の良いタイミングを知るために、増殖炉導入後、プルトニウムの不足した時点で、転換炉を増設してプルトニウムを生産する場合と、増殖炉の導入を遅らせて自立に必要なプルトニウムが生産できるまで転換炉規模を拡大させる場合とを比較した。LWR→LMFBR システムについて具体的な数値を計算した。その結果、プルトニウムが不足

した時点で転換炉を増設する場合の方が、トータルの転換炉システムの容量が僅かであるが少なくなくて済み、更に、増殖炉導入時期が早い程、少なくなくて済むことがわかった。転換炉システムの容量が小さい程、必要な天然ウランがその分だけ少なくなくて済む。しかし、その減少量は最も大きい場合でも3%弱と小さいものである。したがって、プルトニウム不足によって新設量が制約される程早目に増殖炉を導入してもその資源利用効率上の利益は極く僅かなものであることがわかった。

転換炉へのプルトニウム・リサイクルの規模とタイミングについては、増殖炉の導入を阻害しない場合は、どの時点で、いくらリサイクルしてもそのまま資源節約になることは明らかなので、リサイクルによるプルトニウム減少により増殖炉の導入阻害が生じる場合について、リサイクルによる天然ウランの節約量と、増殖炉の導入阻害の結果建設される転換炉への天然ウラン必要量とを比較した。LWR→LMFBR系について計算した結果、リサイクルによる天然ウラン所要量の損益比は、リサイクル量にも、

LMFBRの導入時期にも依らず一定であり、リサイクルによる直接的な節約量は、増設分に必要な量の数分の1にしかならないことが示された。すなわち、核燃料資源の有効利用の立場からは、増殖炉の導入を阻害するようなプルトニウム・リサイクルは行なうべきでないことが確認された。

従来の原子炉システムの資源論的分析は、エネルギーシステムの一部門としてマクロの物量収支だけが問題とされたり、一つの炉型の評価であったり、或いは炉型戦略問題にみられるように線形計画法など数学的手法の開発に主眼がおかれたりしており、原子炉システムそのものの分析が少なかったように思う。本論文では、はじめにも述べたように、炉内の燃焼特性と燃料サイクルの特性からの演繹的な論理展開に特に注意を払い、炉システムの特性と、資源問題の観点との対応関係を明らかにしようと努めた。

(やまじ けんじ)
技術経済研究部