

# 原子力発電新技術のライフサイクル分析

## Life cycle analysis of advanced nuclear power generation technologies

キーワード：原子力発電、高速増殖炉、ライフサイクル分析、エネルギー収支、CO<sub>2</sub>原単位

内山 洋司 横山 速一

本研究は、軽水炉と高速増殖炉について燃料の採掘から輸送、精製、それに発電と廃棄物の処理処分に至るすべてのプロセスを対象にライフサイクルにわたるエネルギー投入量とCO<sub>2</sub>排出量を分析し、原子力発電の技術進歩による環境影響に関して次に示す改善効果を明らかにしたものである。

- ① 生産エネルギーと投入エネルギーの比で表わされるエネルギー収支は、軽水炉の場合、ウランの濃縮技術により最も大きな影響を受ける。ワンスルー方式の場合、ガス拡散法ではエネルギー収支は24であるのに対し遠心分離法では82にまで大きくなり、さらに燃焼度を30GWd/tから45GWd/tにまで高めると85に向上する。
- ② プルトニウムをリサイクルするプルサーマル方式のエネルギー収支は、ワンスルー方式と比較した場合、ガス拡散法では27と大きい、遠心分離法になると69と小さい。これは遠心分離法を燃料サイクルに取り入れるシステムでは、プルトニウム利用による濃縮ウランの節約効果よりも再処理などで燃料サイクルを複雑するほうがエネルギーの投入量が多くなるためである。
- ③ エネルギー収支を最も大きくする発電技術は高速増殖炉で、その値は106と火力や自然エネルギーを含めた発電方式の中で最も優れている。
- ④ 軽水炉のCO<sub>2</sub>原単位は、ウラン濃縮をガス拡散法から遠心分離法にすることで半分以上にまで低減できる。高速増殖炉は、CO<sub>2</sub>原単位をさらに小さくする効果がある。

1. はじめに
2. 原子力発電新技術
3. ライフサイクル分析
3. 1 エネルギー収支

3. 2 CO<sub>2</sub>排出量
4. おわりに
- 参考文献

## 1. はじめに

大量の化石燃料消費は、酸性雨による森林被害やCO<sub>2</sub>による地球温暖化の原因となっている。原子力発電はライフサイクルにわたるCO<sub>2</sub>排出量が最も小さく<sup>1)</sup>、温暖化への影響が最も小さい発電方式として注目されている。

現在、我が国の原子力発電では軽水炉の使用済み燃料を再処理してプルトニウムを取り出し、それを燃料として再利用するプルサーマル技術の実用化に向けて準備が進められている。濃縮ウランにしても、海外のガス拡散プラントで製造されたものだけでなく、国内で遠心分離法に

より生産されたものも少しずつ使われ始めている。またプルトニウムを高速増殖炉でリサイクル利用していくことはウラン資源の有効活用の観点から重要と考えられ研究開発が進められている。こういった新技術が、原子力発電のエネルギー収支とCO<sub>2</sub>排出量にどのような影響を与えるかを調べることは興味あることである。

本研究は、我々が開発したライフサイクル分析手法<sup>1),2),3)</sup>を用いて、上に述べた原子力発電の新技術が、ライフサイクルにわたるエネルギー収支とCO<sub>2</sub>排出量の改善にどの程度まで寄与す

るかを明らかにしたものである。

## 2. 原子力発電技術

軽水炉の放射性廃棄物の発生量と燃料サイクル費の低減および運転サイクルの長期化を図るため、燃焼度<sup>1</sup>を高める技術開発が進められている。既に現在までに取り出し平均燃焼度 39.5GWd/t の燃料が実用化しており、新たに 45GWd/t の燃料について実用化の準備が進んでいる。将来は、60GWd/t の高燃焼度の導入も計画されているが、本研究ではデータが入手できた 30GWd/t と 45GWd/t の燃焼度についてエネルギー収支と CO<sub>2</sub> 原単位を計算し比較した。

使用済燃料は再処理しない場合、そのまま地下深部の地層に直接処分することになる。このいわゆるワンス・スルー方式では、主に天然ウランの中に 0.7%しか存在しないウラン 235のみを利用することになる。その場合、ウランの資源量は可採年数で 40 年程度<sup>4)</sup>に過ぎない。

軽水炉では、燃焼した燃料中に燃え残りのウラン 235 とウラン 238 が転換して生成したプルトニウムが 2%弱ほど残っている。これらの核分裂性物質を再処理によって回収すれば、天然ウランの 99.3%を占めるウラン 238 をプルトニウムに換えて有効に利用できることになる。このプルスーマル方式よりウラン 238 をもっと効率的に利用する方法に高速増殖炉がある。もしその実用化が図れるとウラン資源の 60%がエネルギー源として利用できることになるといわれている。

表 1 に本研究でエネルギー収支と CO<sub>2</sub> 排出量の分析に取上げた原子力発電の新技術の検討プロセスを示す。検討した軽水炉は発電出力

1,000MW の沸騰水型軽水炉 (BWR) で、燃焼度 30GWd/t の炉特性は文献 1 の値を、燃焼度 45GWd/t の炉特性は文献 5 の値を採用した。

表 1 原子力新技術の分類

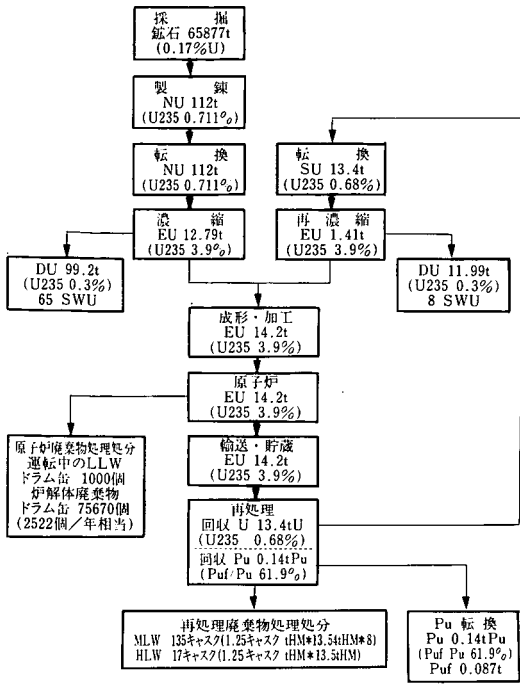
(発電出力：100 万 kW)

		設備利 用率[%]	燃焼度 [GWd/t]	燃料サイ クル	ウラン 濃縮法
軽 水 炉	在来型	75	30	ワンス・スルー	ガス拡散
	A	75	30	ワンス・スルー	遠心分離
	B	88	45	ワンス・スルー	遠心分離
	C	75	30	プルスーマル	ガス拡散
	D	75	30	プルスーマル	遠心分離
	E	88	45	プルスーマル	遠心分離
高速増殖炉		90	70	プルスーマル	なし

プルスーマルは、ウラン新燃料を炉心の 2/3 に、MOX (ウランプルトニウム混合酸化物) 燃料を炉心の 1/3 にウランを装荷する図 1 に示す方式を対象とした。プルトニウムは、使用済ウラン燃料の再処理で回収したものを使用し、MOX 燃料から回収されたものは使用しないものとした。

高速増殖炉は MOX 燃料を用いるループ型炉で、炉特性データと燃料サイクル諸量は文献 5 の値を引用した (図 2)。燃料の平均燃焼度は 70GWd/t、平衡装荷燃料を 11.75t/y (炉心：6.02、ブランケット：5.73)、年間設備利用率を 90% とした。炉心には、炉心燃料から回収されるプルトニウム 0.972t にブランケット燃料から回収されるプルトニウム 0.293t の一部 0.180t を混合して得られる調整プルトニウム 1.152t を燃料に加工して供給するものと仮定した。

<sup>1</sup> 燃焼度：単位重量の核燃料の燃焼によって取り出される熱出力をいう。原子炉の熱出力を Q [GW]、核燃料の炉内滞在時間を D [day]、核燃料の装荷量を M [ton] としたとき燃焼度 B [GWd/ton] は  $B=QD/M$  で表される。



NU: 天然ウラン EU: 濃縮ウラン DU: 減損ウラン  
 Puf: 核分裂性プルトニウム

(1) ウラン新燃料 (2/3 炉心)

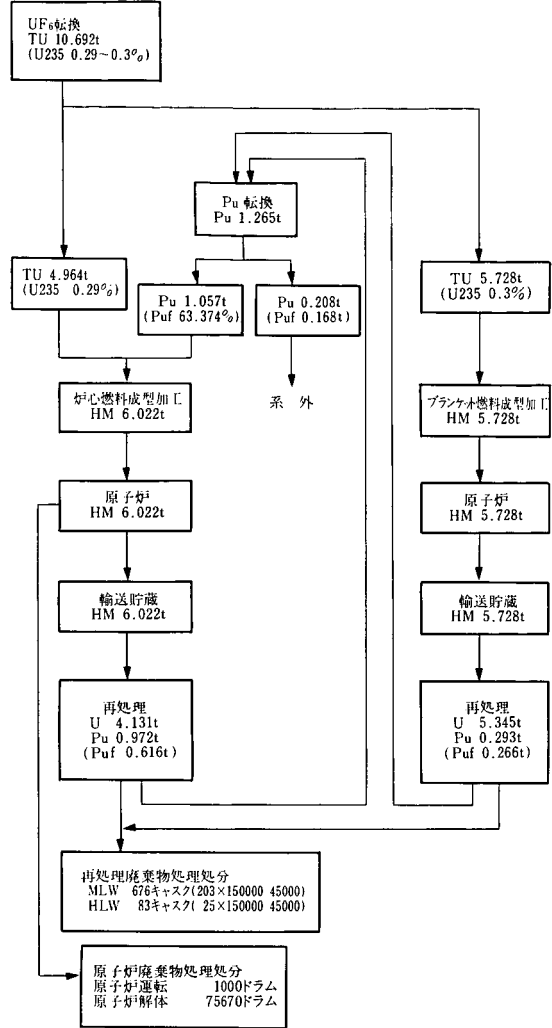
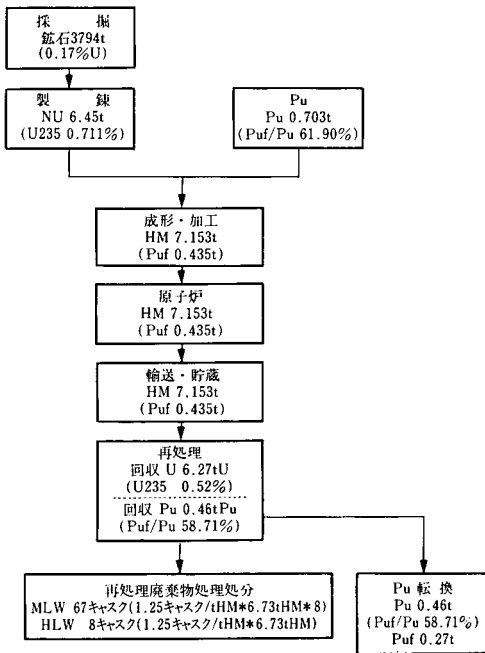


図2 高速増殖炉の燃料サイクル諸量



HM: 金属ウラン MLW: 中レベル放射性廃棄物  
 HLW: 高レベル放射性廃棄物

(2) MOX 燃料 (1/3 炉心)

図1 プルサーマルの燃料サイクル諸量

高速増殖炉の廃炉は、軽水炉と同様に考えた。軽水炉の場合、建設に要する資材量 107.6 万トン（鉄：9.2 万トン、コンクリート：98.4 万トン）から、廃炉時に 54 万トンの廃棄物が発生する<sup>1)</sup>。そのうち比放射能が $10^{-6} \mu Ci/g$  以上の放射性廃棄物は 3.24 万トン（鉄：0.35 万トン、コンクリート：2.89 万トン）になり、それをキャスクに閉じ込めたときのドラム缶数は 75,670 本になる<sup>1)</sup>。高速増殖炉を運転するときに発生する放射性廃棄物量は、低レベル廃棄物については軽水炉のドラム缶数 1,000 本/年に等しいと仮定し、中・高レベル廃棄物のドラム缶数については 759 本/年とした。

### 3. ライフサイクル分析

#### 3.1 エネルギー収支

ある発電方式が電気エネルギーの生産手段になるためには、設備の建設や運転に要するエネルギー（投入エネルギー）が発電で生産するエネルギー（生産エネルギー）より小さいことが必要である。この投入エネルギーと生産エネルギーを比較する方法をエネルギー収支分析と呼んでいる。

発電方式のエネルギー収支分析は、1975年に英国のP.F. Chapmanが原子力発電について分析した事例<sup>6)</sup>が最初で、それ以降、1980年代初期までに数多くの分析事例が報告されている<sup>7),8),9),10),11)</sup>。その後、研究は一時的に途絶えたが1990年代に入って発電方式の温暖化影響が問題になると、再び研究が行われるようになった。

エネルギー収支は、プラントの寿命期間における生産エネルギーを投入エネルギーで割った値（エネルギー収支比）である。最新データにより異なる発電方式について求めた結果によると、その値は水力発電が50と最も大きく、原子力、石油火力、石炭火力がそれぞれ24、21、17と続いており、希薄なエネルギーを利用する太陽光発電や波力発電は10以下の値である<sup>1)</sup>。

エネルギー収支比が大きいプラントは、基本的にはエネルギー密度の高いエネルギーを利用する発電方式である。それらは少ない投入エネルギー（燃料を除く）で、大量の電気を生産できるものである。水力発電は雨や雪を利用して貯えた水の位置エネルギーを、地熱は地下のマグマ熱を利用している。火力発電は、エネルギー密度が高い化石燃料を、軽水炉は天然ウランに0.7%含まれる核分裂性物質であるウラン235を利用している。

原子力発電の投入エネルギーに占める割合が最も多いのはウラン濃縮の運転エネルギーで、

ガス拡散法の場合、その値は全投入エネルギーの81%にも達している<sup>2)</sup>。したがってウラン濃縮技術を運転エネルギーの消費が少ない遠心分離法に置き換えれば、エネルギー収支が大幅に改善すると期待できる。また軽水炉の高燃焼度技術や高速増殖炉も燃料所要量が少なく燃料サイクルの負担を軽減することから、エネルギー収支を向上する可能性がある。

図3は、こういった原子力発電の新技術によるエネルギー収支の改善効果について分析した結果を取りまとめたものである。分析によるとウラン濃縮のエネルギー消費を35%にまで削減する遠心分離法の採用は、ワンス・スルー方式の場合、エネルギー収支比を24から82にまで改善することがわかった。さらに燃焼度を高めることで、エネルギー収支比は85になる。

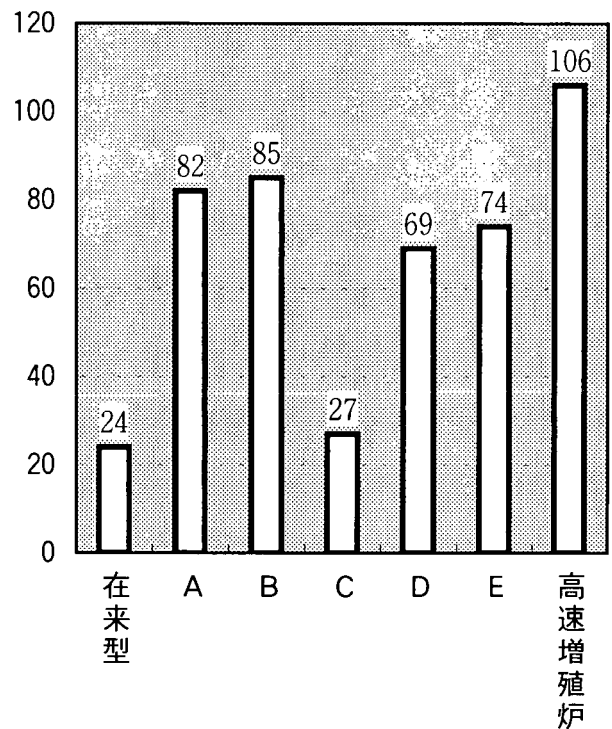


図3 原子力新技術のエネルギー収支比

プルサーマル方式の場合、エネルギー収支比を改善するかどうかはウラン濃縮技術によって異なる。ウラン濃縮技術を従来のガス拡散法にした場合、プルサーマル方式のエネルギー収支比は 27 とワンス・スルー方式の 24 よりも大きくなるが、遠心分離法では 69 とワンス・スルー方式の 82 よりも小さくなる。これは、濃縮技術の進歩に伴って、プルサーマル方式の濃縮エネルギー節約効果が小さくなり、再処理など燃料サイクルが複雑になるために余分に消費するエネルギー量を相殺できなくなるからである。濃縮に遠心分離法を用いた燃料サイクルで、プルサーマル方式のエネルギー収支比をワンス・スルー方式よりも優れたものにするためには、MOX 燃料の比率をもっと高めるか、さもなければ再処理のエネルギー消費を低減する新しい技術開発が必要になる。そういった技術進歩が達成されなければ、プルサーマル方式はウラン資源の有効利用が図れることがあっても、エネルギー収支比を改善することにはならない。

高速増殖炉は、ウランの濃縮プロセスを要しない他に、軽水炉に比べて炉内の燃料装荷量が少ないなど燃料サイクルへの負担を小さくする特徴を有している。これはエネルギー収支を向上する効果があり、今回の分析でその値は 106 と大幅に高まることになった。この値は、これまで検討してきた各種発電方式のエネルギー収支比の中で最も大きな値であり、高速増殖炉が電力の生産効率の点で最も優れたプラントであることを示している。

### 3.2 CO<sub>2</sub> 排出量

エネルギー収支分析は、燃料の採掘から搬入、発電、廃棄物の処理処分に至るすべてのプロセスについて“ゆりかごから墓場まで”のライフサイクルについて投入エネルギーを調べる手法であるため、それらの種類と量から CO<sub>2</sub> 排出量を求めることができる。

発電方式の CO<sub>2</sub> 排出量は、各プロセスの建設と運用のために消費した資材およびエネルギーの種類と量をライフサイクルにおいて求めれば計算できる。ライフサイクルでの CO<sub>2</sub> 排出量には、各プロセスの建設と運用から発生する CO<sub>2</sub> の他に、発電時の化石燃料から発生する CO<sub>2</sub> 量、燃料採掘時に漏洩するメタンガスを CO<sub>2</sub> 量に換算した値、粗天然ガス中の CO<sub>2</sub> 量、セメント製造時の CO<sub>2</sub> 量が含まれる。発電容量が異なる発電方式の CO<sub>2</sub> 排出量は、ライフサイクルに発生する CO<sub>2</sub> 排出量を、その間に発電した発電量(送電端)で割って得られる kWh の値、いわゆる CO<sub>2</sub> 原単位を求めることで比較できる。

原子力発電は、発電時に燃料から CO<sub>2</sub> を排出しない分、温暖化影響が小さく、その値は LNG 火力の 1/30 である<sup>1)</sup>。原子力発電は、燃料サイクルが複雑で、それぞれのプラント建設に多くの資材とエネルギーが必要になり、間接的に CO<sub>2</sub> を排出している。しかしそれらを耐用期間で平均し、かつ発電所 1 基分相当にして CO<sub>2</sub> 排出量を求めると、その値はライフサイクルにわたる排出量の 5% 程度である。原子力発電の CO<sub>2</sub> 排出量の大半は運用時で、特にウラン濃縮時の排出量が極めて大きい。

本研究では、3.1 のエネルギー収支分析をもとに、原子力発電の新技术について CO<sub>2</sub> 原単位を求めた。図 4 はその計算結果で、検討した新技术は、エネルギー収支を改善するだけでなく、ライフサイクルにわたる CO<sub>2</sub> 排出量も削減することがわかる。すなわち CO<sub>2</sub> 原単位は、プルサーマルにより 5.3g-C/kWh、それにウランの濃縮を遠心分離法に転換することで 2.78g-C/kWh、さらに燃焼度を向上することで 2.5g-C/kWh にまで小さくなる。また、高速増殖炉になると、CO<sub>2</sub> 原単位は 2.2g-C/kWh と発電方式の中で最も小さな値になることがわかる。

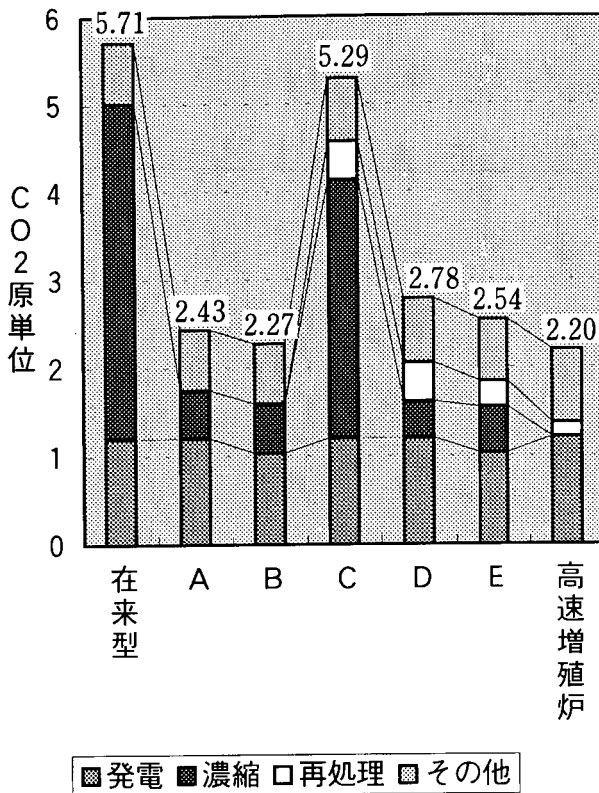


図4 原子力発電の新技術によるCO<sub>2</sub>排出量

#### 4. おわりに

今回のライフサイクル分析により、わが国で導入が計画されている原子力発電の新技術は、基本的にはエネルギー収支を向上し、CO<sub>2</sub>排出量を抑制する技術であることが定量的に明らかになった。しかし、プルサーマルについては、ウラン濃縮技術が遠心分離法に転換されるとエネルギー収支比は悪くなる。この場合、プルサーマルのエネルギー収支比をワンス・スルー並に向上するには、MOX燃料の比率増加や高効率の再処理技術といった新たな技術開発が必要になる。

高速増殖炉は、ウラン濃縮過程を必要とせず、燃料の単位質量あたりの発生エネルギーを大きくする利点がある。その特長は、今回の分析により得られたエネルギー収支比が最も大きくかつCO<sub>2</sub>原単位が最も小さいという結果からもわかる。もし安全性と経済性が確保でき、さらに立地が受け入れられるならば、高速増殖炉は地球温暖化への影響が最も小さい電源として大きな役割を果たすことになる。

#### 【参考文献】

- [1] 内山洋司(1995),「発電プラントのライフサイクル分析」,電力中央研究所報告 Y94009。
- [2] 内山洋司、山本博巳(1991),「発電プラントのエネルギー収支分析」,電力中央研究所報告 Y90015。
- [3] 内山洋司、山本博巳(1991),「発電プラントの温暖化影響分析」,電力中央研究所報告(Y91005)。
- [4] OECD-NEA and IAEA(1995),”URANIUM: Resources, Production and Demand”
- [5] 米田文重(1994),「我が国における FBR 導入のシナリオ」,原子力工業、40 巻,9 号。
- [6] P.F. Chapman and L. Brookes(1975),”Energy Analysis of Nuclear Power”, Energy Policy, Vol.3, No.4
- [7] U.S. Energy R&D Administration(1976), ”Net Energy Analysis of Nuclear Power Production in a National Plan for Energy Research Development & Demonstration”
- [8] Oak Ridge Associated Universities/Institute for Energy Analysis(1977),”The Energy Embodied inGoods”,Oak Ridge.
- [9] R.A. Herendeen and R.L. Plant(1981),”Energy Analysis of Four Geothermal Technologies”, Energy, Vol.6.
- [10] 政策科学研究所報告書(1977), 「エネルギー利用構造とエネルギー収支に関する調査」 茅陽一編(1980), 「エネルギー・アナリシス」 電力新報社

( うちやま ようじ  
電力中央研究所 経済社会研究所  
よこやま はやいち  
電力中央研究所 柏江研究所 )