

石油の代替エネルギーを EPR から考える

電力中央研究所 天野 治

石油は1次エネルギーの40%を占め、われわれの生活を豊かなものにしてている。ところが、われわれ人類は、石油をこの50年で半分使いつつある。それも取り出しやすい、経済的なものから使っている。残っているものは、取り出すためにエネルギーがかかるものである。得られるエネルギーを取り出すためのエネルギーで除したものがEPR(energy profit ratio, エネルギー収支比)である。EPR=1はエネルギーを得るのと、取り出すためのエネルギーが同じことを意味する。これは、益がない。取り出すためのエネルギーとして、そのためにかかるすべての項目を可能な限り算定する。燃料の採掘、輸送、発電所の建設、運転、補修、廃材、廃棄物処理・処分までを含む。EPRが高いことは、石油の代替として有力な候補となる。

ウラン濃縮に遠心分離法を用いた原子力発電はEPRが高い。従来のガス拡散法はウラン濃縮に莫大なエネルギーが必要となり、入力エネルギーを大幅に増加させるため、EPRは低くなる。EPRを高めるには、出力エネルギーを増加させることも有効な方法である。具体的には、稼働率を向上させること、定格出力を上げることである。

風力発電や太陽光発電のEPRは高くはない。これは、風の強さ、すなわち出力エネルギーが定格の60%以下と低いことと稼働率が低いことによる(風力は風が吹いている間、太陽光は日中のみ)。LNGは気体であり、輸送のために液化するエネルギーを費やすので、石油火力や石炭に比べてEPRは低い。

EPRで考える必要性

「安く豊かな石油時代が終わる」石井吉徳東京大学名誉教授が繰り返し警告を発している。日本の1次エネルギーの40%を占める石油がよいほうから半分使った(オイルピーク)。1次エネルギーの20%を占める天然ガスのピークも近い¹⁾。これらの代替をどうするのか。豊かな石油にサポートされてきたこの便利な生活(車、冷暖房、海外旅行、豊富な製品、食材など)を、大幅に変更しなければならない。寒くて貧しかった昭和40年代に戻る覚悟が必要である。並行して、1次エネルギーの60%を占める石油、天然ガスの代替をどうするか、みんなが自分のこととして、本格的に議論しなければならない。

オイルサンドもオイルシェールもある。まだまだ大丈夫とささやかれる。石井吉徳東大名誉教授は、2つのポイントから資源を量と質の両面から考えることを薦めている。ひとつは、資源としての3要素である。

①濃縮(高密度化)されている。②大量にある。③経済的に利用できる位置にある²⁾。③の例であるが、中国の石炭鉱山ははるか西のほうにあり、東の北京や上海で発電に供するために、そのエネルギーの半分近くを輸送の

ために使う。これではエネルギー効率が悪い。(1)の例であるが、海水中のウランは大量にあるが、海水で薄まって濃縮されていない。海水中のウランを採取・濃縮(高密度化)にするのに、相当量のエネルギーが必要である。量だけではなく、質の面から考えることが大事である。

2つ目は、エネルギーの質を定量的に評価する有力な指標としてEPRを使って考えることである。EPRは、エネルギーの出力/入力比である。EPRはエネルギー資源として筋がいいか悪いかわかる基準となり、さまざまな分野の方々と共通して議論できる指標である。

なお、オイルサンド、オイルシェールは商業化されていないので、経済モデルが構築できず、厳密なEPR評価ができない。筋がよい方法かどうか、商業化するまえに、取り出すための入出力エネルギーモデルとEPRの計算を実施すべきである。

原子力発電はエネルギー密度が高いために、資源の3要素(①濃縮(高密度化)されている、②大量にある、③経済的に利用できる位置にある)を満足する可能性が高い。すなわち、少ない原料から大きなエネルギーを取り出すことができるので、輸送エネルギーが比較的少なくて済む(③の観点)。ウランは鉱石として存在し、高密度化している。ウラン鉱山や鉱脈として大量にまとまっている。以上①、②、③を満足する。

Find out Effective Alternative Candidates for Oil with EPR : Osamu AMANO.

(2006年 5月23日 受理)

EPR の計算

ウラン採掘、輸送や濃縮および発電所建設、運転、廃炉までのライフサイクル全体をEPR評価で確認する。すなわち、建設から運転、廃炉までにかかるエネルギー(入力)とそれまでに取り出せるエネルギー(出力)を求める。原子力発電のEPRは電力中央研究所の研究報告²⁾をベースに現時点の数値を見積ると17.4となる。

EPRは取り出すエネルギー(出力)をそのために必要なエネルギー(入力エネルギー)で除した数値である。出力エネルギーとしては、運転開始から廃炉にいたるまで30年の期間に取り出せる出力の合計値としている。入力エネルギーとしては、建設、運転、廃炉および廃棄物処分のライフサイクル全体を考慮している。建設、廃炉、廃棄物処分のために必要なエネルギーとして、素材製造、輸送、組立ての設備エネルギー、それを補修および発電所を運転する運用エネルギーなどである。

一例として、素材製造について紹介する。素材を作るには、鉄筋、コンクリートなどの素材ごとに必要なエネルギーがある。単位重量あたりの素材のエネルギー原単位であり、第1表のとおりである。

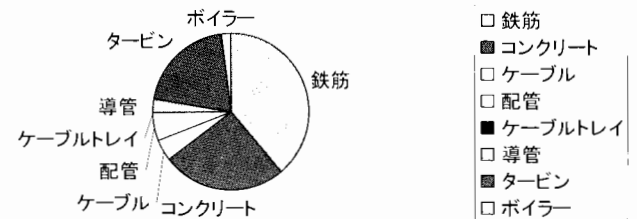
第1表 素材のエネルギー原単位³⁾

	素材のエネルギー原単位(Mcal/t)			
	電力	石油	石炭	合計
鉄鋼	1,125	0	5,000	6,125
銅	3,825	5,900	1,000	10,725
アルミニウム	39,375	11,000	0	50,375
ステンレス鋼	2,250	0	10,000	12,250
セメント	293	460	44	797
コンクリート	44	104	61	209
板ガラス	518	3,200	0	3,718
シリコン	562,500	0	0	562,500

原子力発電所を建設するのに、必要な素材の量は標準的な1GW(100万kW)の発電所では以下のとおりである。また、素材の量に第1表の素材のエネルギー原単位(Mcal/t)を乗じて素材エネルギーを計算で求めることができる。それを第2表の右欄に示す。

鉄筋から原子炉までの主要なもの(全体の70%に相当)の素材エネルギーの内訳を第1図に示すが、鉄筋とコンクリートが65%であり、量的には米国の2倍以上であり、その差異の主な理由は耐震構造によるものである。免震構造など最近の技術を導入することにより、免震ゴムとそれの付属設備が振動を吸収するため、耐震強度要求が緩和され、鉄筋とコンクリートの量を減らすことが可能である。EPRを高める点からも検討すべきである。

軽水炉の運転に必要なウラン量について紹介すると、発電で使うウランは、年間25.4tである。しかし、それには約2,000倍のウラン鉱石が必要である。ウラン鉱石を精錬して、次にフッ化物に転換する。このフッ化物は常温で気体になる。気体になったウランフッ化物(UF₆)を膜分離で濃縮(ガス拡散法)あるいは、遠心機で濃縮(遠心分離法)する。²³⁵Uの割合を5倍程度高めたUF₆を再度UO₂に転換し、粉末状のものを焼き固めて密度を高め、燃料ペレットとして、厚さ1mm程度の被覆管に挿入する。この作業が成型加工である。工程と概略の重量を第2図に示す。



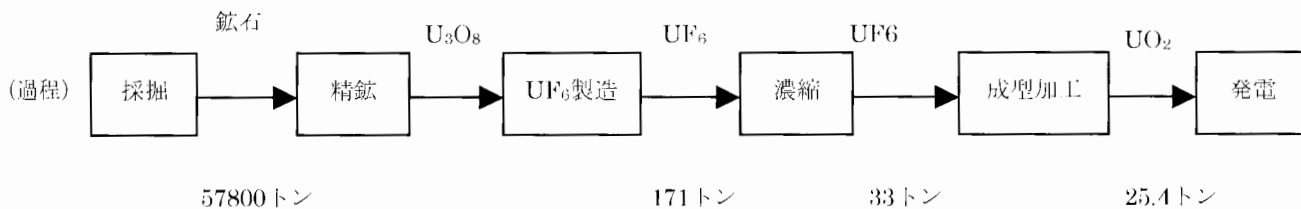
第1図 原子力発電所建設の素材エネルギーの内訳

第2表 原子力発電プラントの素材必要量と素材エネルギー³⁾

	原子力発電プラントの素材必要量(発電出力1GW)			計算 (Mcal)
	鋼鉄 (t)	アルミニウム (t)	コンクリート (t)	
鉄筋	35,850			219,581,250
コンクリート			686,790	143,539,110
ケーブル	177	491		25,818,250
配管	5,170		1,580	31,996,470
ケーブルトレイ	220			1,347,500
導管	2,350			14,393,750
タービンほか	19,080			116,865,000
原子炉	1,730			10,596,250
小計(70%)	64,577	491	688,370	564,137,580
計	92,250	701	983,390	805,872,635

注1) 素材エネルギー量=素材重量×エネルギー原単位

2) 小計(70%)は、鉄筋から原子炉までをリストアップしたもので全体の70%になる意味である。

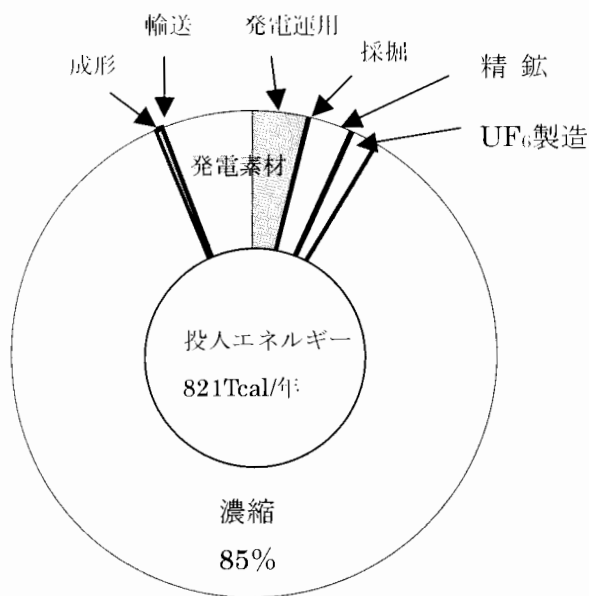


第2図 軽水炉(1GW)1年間運転に必要なウラン量²⁾

原子力発電の EPR は 6 ?

原子力発電では、²³⁸U を天然の0.7から3.5%程度に5倍濃縮する。残りの大半は²³⁵Uであり、²³⁵Uとは、化学的に同一で、重さが若干異なる。(238マイナス235)/238=0.013、すなわち1.3%とわずかな差である。)

²³⁵Uと²³⁸Uのわずかの差を利用して分離するために、ここに多くのエネルギーを費やす。従来は、軍事的に開発された(効率を度外視した)ガス拡散法で、隔膜の分離係数の違いを利用しているが、分離係数が4/1,000と非常に小さいため、隔膜を直列、並列のカスケードに多数組む必要があり、またポンプで圧力をかけるため、消費電力が大きい。第3図に示すように、ガス拡散による濃縮法では、投入エネルギーの85%を占める(このため、ガス拡散を用いた場合の原子力発電のEPRは6.6と低い)。濃縮について大きいのは、発電の素材エネルギー、すなわち、発電所の建設である。その次に発電所の運用(補修)エネルギーと精鉱が続く。



(運用エネルギー)

第3図 ガス拡散法ウラン濃縮による原子力発電の投入エネルギーの内訳³⁾

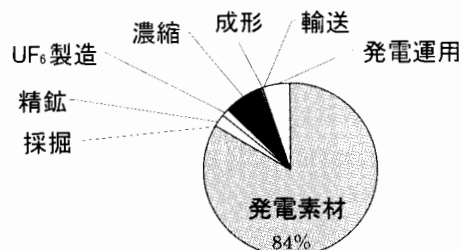
EPR を高める効率の良い濃縮法

ウラン濃縮は、遠心分離による濃縮法に置き換わりつつある。遠心濃縮法では、遠心機の起動時に電力を消費するが、その後は一定速度運転で運転中の摩擦ロスを少なくしており、消費電力はガス拡散法に比べて1/24である。遠心濃縮法を用いた原子力発電の評価では投入エネルギーに占める濃縮の割合は大幅に減少し、発電所の建設にかかわる発電素材エネルギーが84%を占める(第4図に示す)。遠心濃縮法を用いた原子力発電のEPRは28.2である。遠心濃縮法が筋の良い技術であることが理解できる。このようにEPRはエネルギーの筋のよさや、高める方法を検討する指標になる。

遠心濃縮法をベースにして、さらにEPRを高めるには、人力のエネルギーを減らす。人力エネルギーの84%を占める発電素材エネルギーを減らす必要がある。第2図に示したように、そのためには、鉄筋およびコンクリートを減らす必要がある。免震構造の採用を検討するのは、EPRの観点からは筋のよい方法と考える。

さらに、後述するが、出力を増やすのもEPRを高める方法である。稼働率の向上や定格出力を増加する方法で、海外の原子力先進国が採用している。

いま、濃縮は、世界的にガス拡散法と遠心法の生産規模が同じ程度(ガス拡散法22,100 tSWU/年、遠心分離法29,650 tSWU/年で、次第に遠心分離法に置き換わりつつあり、EPRが高まる方向に動いている)であり、現在の原子力発電のEPRは両者の平均と考えると(6.6+28.2)/2=17.4程度となる。



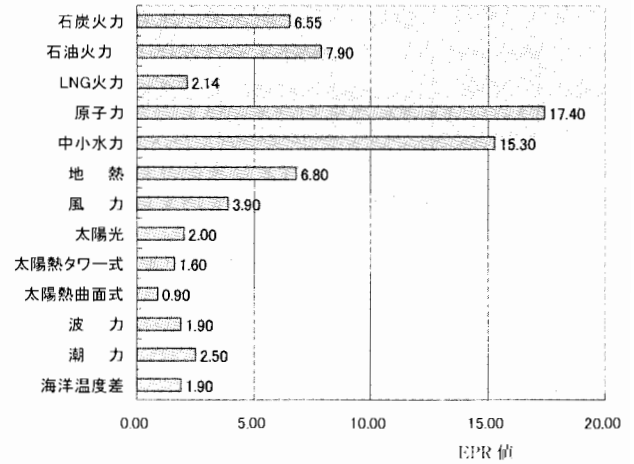
第4図 遠心ウラン濃縮による原子力発電の投入エネルギー量内訳

取り出すエネルギー(電気)

取り出すエネルギーは、出力値に稼働率を乗じ、発電所内で使う分を引いて求める。例えば、出力値1GWで稼働率が75%で所内率が3.4%の場合の取り出すエネルギーは出力1GW×365日×稼働率(75%)×(1-所内率)=264.4GWd。

運転経験、設計技術の進歩などで原子力発電を進化させている国では、稼働率90%を達成し、蒸気発生器やタービンを改良して、定格の120%のエネルギーを取り出している。さらに、ウラン濃縮がエネルギーのかかるガス拡散法から、すべて遠心法に置き換わると仮定すると、原子力発電のEPRは40.6まで高まる。中小水力発電のEPRが15.3と高いのは、燃料が不要だからである。このときの投入エネルギーとしては設備エネルギーが3/4、運用エネルギーが1/4である。次に石油火力発電のEPR 7.90、地熱発電のEPR 6.80、石炭火力発電のEPR 6.55と続く。(第5図)

風力や太陽光のEPRが低いのは、もともと自然エネルギーの密度(定格値自体あるいは定格に対する割合)が低いことと、風力では第6図に示すように、風が吹いて電気を起こす時間、すなわち、稼働率が低いことが理由である。この図は、日本では比較的風の強い北海道での冬(1月)と夏(8月)の例である。冬場は夏に比べて出力は得られるものの、最大でも定格の60%から80%程度であり、稼働率は低い。この波型で示した部分を平均すると、30%程度であり、得られるエネルギーが低いことが



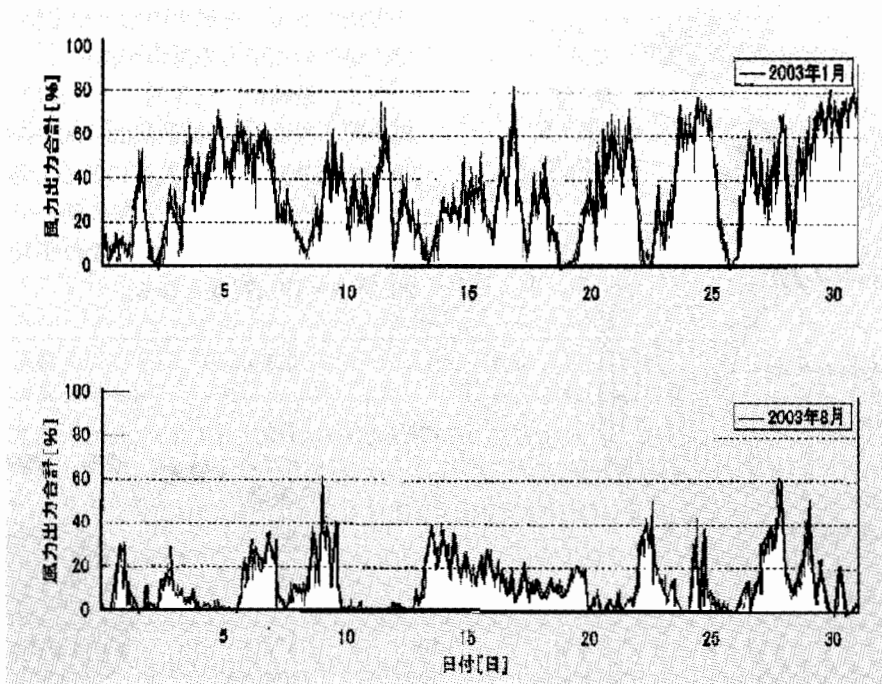
注)原子力では、ガス拡散と遠心を半分ずつにしている。
設備利用率は、石炭、石油、LNG、原子力は75%、
水力45%、風力35%、太陽光15%、太陽熱15%

第5図 電気を得る手段(発電)をEPRで評価

わかる。夏場では平均すると10%以下になる。太陽光発電では、太陽が出ている間だけの発電であり、稼働率は15%程度である。(太陽の出ている間もパソコンなど電気を使いたい)

結論

石油の代替エネルギーとしてさまざまな発電システムをEPRから評価した。原子力発電も、ウラン濃縮に従来のガス拡散法では、EPRは6.6である。エネルギー効



第6図 風力発電の出力(冬と夏、北海道)

(出典 日本原子力文化振興財団「原子力・エネルギー」図面集 2005-2006)

率のよい遠心濃縮法を用いると EPR は 28.2 まで高まる。現在の世界の生産規模はガス拡散法と遠心濃縮法がほぼ半々なので、両者の平均をとり、EPR を 17.4 と評価する。EPR をさらに高める方法として、出力エネルギーを高める方法がある。稼働率を 90% まで向上させること、定格出力を増強させる方法である。もうひとつは、入力エネルギーを下げる方法である。前述のウラン濃縮にエネルギー効率のよい遠心濃縮法を用いることと、免震構造により鉄筋、コンクリートの量を減らし、原子力発電プラントの素材必要量を減らすことである。発電システムのエネルギー効率を上げる検討に EPR は有効な指標になる。

これまで EPR 評価の上で主要な部分を紹介してきたが、ここからは、具体的な EPR の計算および廃棄物処分や廃炉などの EPR への影響について、図、表をベースに補足的に説明する。

(参考 1) 原子力発電の生産エネルギー、投入エネルギーと EPR 評価

設備容量 1 GW の標準的な発電所で 75% の設備利用率で所内率 3.4% の場合の年間の発電電力量は 5,458 Tcal/年となる。一方、投入エネルギーは、発電の素材エネルギーと工場での製造、現地での建設、工場から現地までの輸送の各エネルギーに見積もられる。これはライフあたり 1 回である。第 2 図に示した燃料関係のエネルギーと発電所の運転・補修にかかるエネルギーが運用エネルギーとして見積もられる。運用エネルギーは毎年かかるものである。第 3 表の下欄には、EPR の計算方法と計算結果を示す。耐用年数 30 年で全量ガス拡散法の場合の EPR は 6.6 である。遠心濃縮法の場合の EPR は 28.2 である。わが国が目指す、全量遠心濃縮法で設備利用率 90% の場合の EPR は 33.9 である。米国、スペインなどの原子力先進国が実施している定格出力増強で 120% 出力の場合は、EPR は 40.6 まで上昇する。

(参考 2) 高レベル廃棄物

再処理により、使用済み燃料から核分裂生成物などを主成分とする高レベル廃棄物が発生する。この廃棄物は専用の容器(キャニスタ)およびそれを取り巻く鉄製の容器(オーバーパック)に保管され、処分空洞に安置される。専用の容器、オーバーパックを作る素材製造エネルギーと処分場掘削、容器に入れての輸送エネルギーが必要となる。素材は鉄量として 3,514 t であり、第 2 表に示す原子力発電プラントの鉄筋量の 1/10 以下であり、第 3 表を用いて計算しても EPR は 1% の低下であり、大きな影響を与えない。

(参考 3) 廃炉

原子炉を解体して、放射化したものはドラム缶もしくは専用の容器に保管し、地中に長期保管(処分)される。容器、処分坑道の建設などに鉄量 3,718 t、コンクリート 31,872 t であり、第 2 表の原子力発電プラントの素材と比較して 1/10 以下であり、EPR は 1.5% の低下であり、大きな影響を与えない。

(参考 4) 最近の原子力発電所の入力エネルギー

国内のいくつかの発電所の建設、運転実績から詳細な入力エネルギーが見積もられている。その例を第 7 図に示す。ここでは、廃炉も発生する廃棄物処分も可能な限り、見積もられている。使用済み燃料についても、中間貯蔵をして、陸地処分を実施した場合のエネルギーを見積もっている。しかし、設備エネルギーの総量を第 2 表の鉄量、コンクリート量と比較しても同等であり、EPR は変化がないことがわかる。

(参考 5) 高速増殖炉

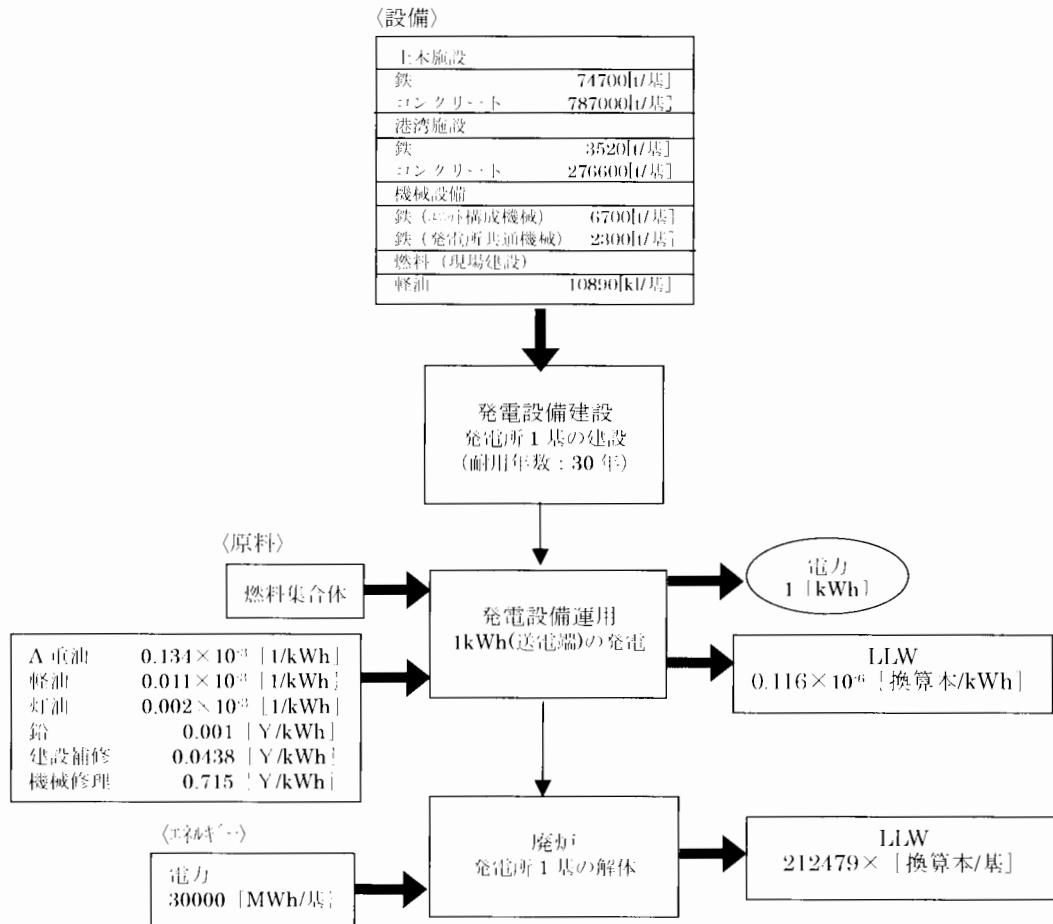
高速増殖炉(FBR)の EPR も高いことが期待される(EPR 37.5)が、それよりもウランピーク対応と考える。FBR では、燃料は不要成分を除去し、有用成分を再利用する。具体的には、 ^{235}U の核分裂した生成物(ごみ)を化学的に分離除去し、プルトニウムと残りの ^{235}U などから燃料を作る。プルトニウムは、 ^{238}U が運転中に中性子を吸収して変化したものであり、このように中性子を吸収することで新たな燃料になる。これが増殖の仕組みである。この増殖により、ウラン燃料は 60 倍有効に使える。放射能毒性が強いプルトニウムの仲間のマイナーアクチナイド(MA)は燃料と一緒にすることで、核分裂させて、放射能毒性を弱めることができる。

(参考 6) 取り出すエネルギー(熱)

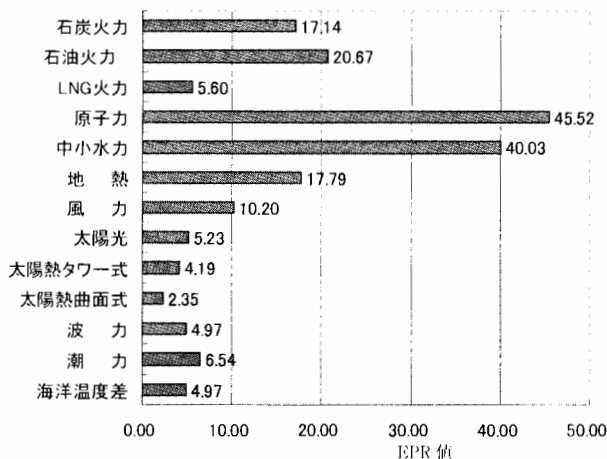
コジェネレーションのように、熱と電気でエネルギーを生産するものもある。取り出すエネルギーを電気に変換せずに、熱エネルギーとして生産エネルギーを評価する。EPR 計算では、熱エネルギーをそのままアウトプットとして求めればよいが、ここでは、第 5 図の出力エネルギーの結果を電気エネルギーから熱エネルギーに逆変換して求める。すなわち $1 \text{ kWh} = 2,250 \text{ kcal}$ を用いる。太陽光は熱で取り出す場合は、水を温めるイメージである。全体的に EPR が向上する。熱で使えるものは熱として利用するのが筋の良い方法であることがわかる(熱から電気に変換するときの変換効率は 30~40% である)。原子力発電所の場合の EPR は 45.5 になる(電気出力では、17.4)。中小水力では、EPR は 39.96 になるが、これは物理的には意味がない(第 8 図)。

第3表 原子力発電の生産エネルギー、投入エネルギーとEPR評価
原子力発電の投入エネルギー量とエネルギー収支

生産エネルギー	設備容量 (1)		MW	1,000				備考	
	設備利用率 (2)		%	75					
	発電電力量(発電端) (3)		GWh/年	6,570					
	所内動力エネルギー量 (4)		GWh/年	486					
	所内率		%	3.4					
	発電電力量(送電端) (5) = (3) - (4)		GWh/年 Tcal/年	6,347 (5,458)					
燃料 (原子燃料)			Tcal/年	(16,866)					
				電力	石炭	石油	天然ガス	計	
設備エネルギー	輸送	素材エネルギー量	Tcal/年 (GWh/年)	—	0.0	—	—	0.0	
		小計 (6)	Tcal/年 (GWh/年)	—	0.0	—	—	0.0	
	発電	素材エネルギー量	Tcal/年 (GWh)	174.7 (77.6)	521.1	110.3	—	806.2	
		製造エネルギー量 建設エネルギー量 輸送エネルギー量	Tcal/年 (GWh)	34.9 (15.5)	104.2	22.1	—	161.2	
		小計 (7)	Tcal/年 (GWh)	209.6 (93.2)	625.4	132.4	—	967.4	
投入エネルギー	運用エネルギー	採掘	Tcal/年 (GWh/年)	—	—	0.6	—	0.6	
		精鈾	Tcal/年 (GWh/年)	6.1 (2.7)	—	—	18.0	24.1	
		UF ₆ 製造	Tcal/年 (GWh/年)	4.7 (2.1)	—	—	8.2	12.9	
		濃縮	Tcal/年 (GWh/年)	697.5 (310.0)	—	—	—	697.5	遠心は1/10
		成形	Tcal/年 (GWh/年)	3.8 (1.7)	—	—	1.0	4.8	
		輸送	Tcal/年 (GWh/年)	—	—	0.3	—	0.3	
		発電	Tcal/年 (GWh/年)	10.5 (4.7)	31.3	6.6	—	48.4	
		小計 (8)	Tcal/年 (GWh/年)	722.6 (321.2)	31.3	7.5	27.1	788.5	161
EPR	耐用年数30年(ガス拡散) (9)		$(5) \times 30 / [(6) \times 30 + (7) + (8) \times 30]$				6.650042238		
	耐用年数40年(ガス拡散)		$(5) \times 40 / [(6) \times 40 + (7) + (8) \times 40]$				6.716009278		
	耐用年数50年(ガス拡散)		$(5) \times 50 / [(6) \times 50 + (7) + (8) \times 50]$				6.756221467		
	耐用年数30年(遠心濃縮 (1/10) (10))		$(5) \times 30 / [(6) \times 30 + (7) + 161 \times 30]$				28.24369545	日本	
	耐用年数30年, 濃縮 (ガス拡散, 遠心半分)		$[(9) + (10)] / 2$				17.44686884		
	耐用年数30年(遠心濃縮, 設備利用率90%)		$(5) \times 30 \times 0.9 / 0.75 / [(6) \times 30 + (7) + 161 \times 30]$				33.89243454	日本計画	
	耐用年数40年(遠心濃縮, 設備利用率90%)		$(5) \times 40 \times 0.9 / 0.75 / [(6) \times 40 + (7) + 161 \times 40]$				35.36787537	日本計画	
	耐用年数30年(遠心濃縮, 設備利用率90%, 定格120% にアップ)		$(5) \times 30 \times 0.9 / 0.75 \times 1.2 / [(6) \times 30 + (7) \times 1.017 + 161 \times 30]$				40.55587439	欧州	



第7図 原子力発電所の入力エネルギー⁶⁾



第8図 出力を熱エネルギーで取り出した場合のEPR値

—参考文献—

- 1) 石井吉徳, “原点を考える—安く豊かな石油時代が終わる”, 日本原子力学会誌, 147[3], 193(2005).
- 2) 石井吉徳, “ピークは[2010より前]に来る! [無駄]をしない, 浪費しない社会を!”, エネルギー, 39[2], 6~10(2006).

- 3) 内山洋司, 山本博巳, 発電プラントのエネルギー収支分析, 研究報告Y90015, 電力中央研究所, (1990).
- 4) 内山洋司, 発電システムのライフサイクル分析, 研究報告Y94009, 電力中央研究所, (1995).
- 5) 内山洋司, 横山速一, “原子力発電技術のライフサイクル分析”, 電力経済研究No.37, 43~48(1996).
- 6) 本藤祐樹, ライフサイクルCO₂排出量による原子力発電技術の評価, 研究報告Y01006, 電力中央研究所, (2001).
- 7) R.Heinberg, *The Party's Over: Oil War, and the Fate of Industrial Societies*, New Societies Publ.(2003), ISBN: 0865714827.

著者紹介

天野 治(あまの・おさむ)



電力中央研究所 首席特別契約研究員, 工学博士。
(専門分野) 燃料サイクル, 規制の合理化, エネルギー収支, フッ化物揮発法。