技術報告

33. 原子炉最適設計点の探索

燃料費, 重水費最小化のケーススタディ

須田 信英*, 小江 清*

(1971年 9月3日 受理)

(1972年 4月18日 再受理)

*Optimum Seeking Methods Applied to Nuclear Reactor Design
Case Study of Minimizing Fuel and Heavy Water Costs*

By Nobuhide SUDA and Kiyoshi OGO

In designing the nuclear reactors there are some independent variables the values of which can be selected by the designer. The power generation cost, for example, depends upon the values of these design parameters and, hence, optimization has to be carried out to find out the value of the parameters for which the cost is minimum. This type of problem has been solved by the designers relying on their engineering judgement. Recent developments in systems engineering would appear to afford a more sophisticated approach to the problem.

In this paper, optimization methods are applied to a problem of this kind; the heavy water moderated, boiling light water cooled reactor has been selected as an example. The cost is too complicated to be described in a closed form and, therefore, analytical methods of optimization are difficult to use. Two typical direct search methods, namely the pattern search method and the simplex method, are applied. Both methods have proved to give reasonably good results. But the cost factor in this problem is multi-modal, and hence sometimes only a local optimum is obtained instead of the global, and a point very close to the optimum is easily discovered, but much computation is required to ascertain that this point is close to, at least a local, optimum.

From the above results it is concluded that these methods are useful for optimizing the reactor design in the stage of "parametric survey", and that if we can develop effective ways to find the global optimum and to ascertain that a point is close to the optimum, then these methods can become even more useful.

KEYWORDS: nuclear reactor design, power generation cost, optimization heavy water moderator, HWLWR type reactor, nuclear fuels, cost, planning

I. は し が き

重水減速沸騰軽水冷却炉の発電コストは、設計によってあまり左右されない分(例えば建物の費用)は別にし、設計によって変動する分だけを考えることにすると、燃料費, 重水費, (燃料被覆用)ジルカロイ費とな

る。ジルカロイ費は絶対値も小さく、また設計によって変動する度合いも小さいので、ここでは無視して燃料

* 大阪大学基礎工学部制御工学科(Faculty of Eng. Sci., Osaka Univ.)

† 現在, 石川島播磨重工業(株)(Ishikawajima-Harima Heavy Ind. Co., Ltd.)

費と重水費とに注目する。

燃料費は、燃焼度および燃料保有量によって異なる。重水費は重水の保有量に依存する。ところで、燃焼度や保有量は炉心を設計するとき、ある程度自由に選べる変数、クラスタ間隔(L , cm), 燃料ペレット径(df , cm), 濃縮度(e), 1 クラスタ内燃料棒本数(N)によって決ってくる。

そこで、重水炉を設計するに当っては、 L, df, e, N を上手に選んで「燃料費+重水費」を最小にする、という最適問題が生じる。従来は、こういう問題に対しては、 L, df, e のとり得る範囲を適当個数に分割して L, df, e, N 空間に網の目(格子(grid))を作る。そうして各格子点の設計計算を行なってコストを算出して比較することで、最適点を探索する方法がしばしばとられている。しかし、こういう問題に最適化技法を適用すれば、探索をより効果的に行うことができるのではないと思われる。

重水減速沸騰軽水冷却炉と限らず原子炉プラントの設計には、多かれ少なかれ最適設計点の探索が含まれているはずで、この種の問題への最適化技法の適用可能性、有効性、問題点などを調べることは有意義なので、上述重水減速沸騰軽水冷却炉の問題を例にとって2, 3の考察を行なった。したがって、本報の主目的は重水減速沸騰軽水冷却炉の最適設計点をみつけること自体にあるのではなく、そういう問題に最適化技法がどの程度役立つかを調べることに方にある。

Ⅰ. 問題の特色

ここで取り扱う最適問題の評価関数は「コスト=燃料費+重水費」である。パラメータ L, df, e, N の値のある組合せを指定すると、設計計算を行なって燃焼度($B, \text{MWD/t}$), 燃料保有量(M_F, t), 重水保有量(M_{D_0}, t)が求められる。コストは、 B, M_F, M_{D_0} から一定の方式(付録)で算出する。

こういうわけでパラメータ x に対し、評価関数 $J(x)$ の値を知ることができる。しかし、途中で複雑な設計計算が入っているために、 $J(x)$ は、 x の多項式とか三角関数とかの簡単な式で表わされない。したがって、 $J(x)$ の x についての勾配[$\text{grad } J(x)$]を求めることもできず、評価関数の微係数を用いる最適探索法、例えば最大傾斜法などはこの場合使いにくい。微係数を用いない方法が適当である。

各変数については、設計上適当と思われる値には限界があり、探索中にあまり変なところへ行ってしまうと、制限条件を第1表のようにつけておいた。

第1表 変数の値の取りうる範囲

$22\text{cm} \leq L \leq 28\text{cm}$
$1.1\text{cm} \leq df \leq 1.7\text{cm}$
$0.0714 \leq e \leq 0.016$
$N: 19, 28, 31, 37 \text{ のいずれか}$

さらに、4つのパラメータのうち、 N は整数解であることを要求される。特にこの問題では、クラスタを作る必要上許される N の値は、19, 28, 31, 37の4種類に限定されている。一般に整数解を要求されると、それだけ拘束がふえたことになり、最適問題はむずかしくなる。

Ⅲ. 適用した最適化技法

前章に述べたように、微係数を用いない方法が適当なので、ここではパターン・サーチ法(PS法)^{(2)~(4)}, Nelder and Mead のシンプレックス法(SX法)^{(5)*}に2, 3の修正を加えて用いた。

第1に、これらの方法は変数 x のとり得る範囲に制限のない問題を対象に作られたものである。いまの場合、第1表のような制限条件があり、これを考慮しなければならない。

PS法の場合は、制限条件が変数 x_i について、 $a_i \leq x_i \leq b_i$ という形のものばかりであることを考慮し、探索点が許容範囲外に出たら境界上の点を採用するという方法を用いた。

SX法の場合は、制限条件をペナルティ関数の形で組み込んだ。すなわち、許容範囲の外の点に対して、人為的に大きなコストを対応させたのである。実際に探索をさせてみると、これだけでは境界上の最適でない点で止まってしまうことがあるので、SX法による探索が境界上の点で止まったら、そこで探索を打ち切らず、PS法に切り換えてさらに探索をつづけてみるという工夫もした。この点については後にもう少し詳しく述べる。

整数解の問題については、分枝限定法⁽⁶⁾等の適用についても検討したが、この問題にはあまり便利でないこと、かつ、この問題では、 N の値は4種類しかないので、これを考慮して、 N の4つの値に対し、それぞれ最適点を別々に求めるというやり方を取った。したがって、実際には、 L, df, e の3次元空間で最適点をさがしているわけである。

*線形計画法のシンプレックス法とは全く別物である。

上述の2つの方法のどちらを用いるにしても、最適値探索が行われている途中の全体の計算の流れは、第1図のようになる。第1図で上のブロックが、PS法またはSX法のアルゴリズムに相当する。それに対して下のブロックは、パラメータの値が与えられて設計計算してコストを算出する部分である。以下の例題では、初めにも述べたように設計自体が目的ではないので、そのつど設計計算をやるのは省略し、すでに、 L, df, e 空間の多数の格子点で、 $B, M_F, M_{D,0}$ の値が計算されていたので、それをもとに各格子点でのコストを計算しておき、それ以外の点では格子点の値の内外挿によってコストを求める便法を用いた。

第1図 計算の流れ

IV. 探索とその結果

PS法では、探索を開始する出発点と、探索幅の初期値を与える必要がある。初期点は適当に与え、最適点はこの辺にありそうだという見当をつけて、その近くに選ぶということはしなかった。初期探索幅は、変数の許容変化範囲から適当に定めた。

SX法では(3次元の探索だから)初めに4個の点を与える必要がある。また、SX法では、反射係数 α 、縮小係数 β 、拡大係数 γ も与える必要がある。ここでは、 $\alpha=1, \beta=0.5, \gamma=1$ とした。これは、著者らがいろいろの関数でテストして比較的成绩のよかった値である。探索は相当数行なったが、そのうちの代表例を第2, 3表に示す。同じ手法でも探索の出発点によって、到達する点があることがある。そのような場合、それぞれの代表例を①, ②で区別して示した。いずれも新しくコストの少ない点が見つかった場合を示

し、表中の数字は

コスト J (計算回数)

(L, df, e)

という配列である。大体計算回数20回きざみにコストの改善の度合を示すが、20回目というのが探索途中である場合には、20回目の前後で新しくコストの改善された点が発見された場合を示してある。そのため計算回数が不揃いになっている。

なお、本報の主目的からは少しそれるが、これらの結果と、すでに行われた種々の重水炉設計との比較も興味があると思われるので、少し検討してみる。

1. $N=19$

CANDU-BLWのデータ⁽⁹⁾($L=27.305, df=1.8478, e=0.0071$)と、ここで得られた探索結果とは大部異なる。その理由は、CANDUでは天然ウランの使用を前提としているが、この探索では、濃縮ウランの使用を許している。濃縮ウランの使用により格子間隔のきりつめが可能になり、重水費の節約ができることを示していると考えられよう。

2. $N=28$

ATRのデータ⁽⁹⁾($L=24.0, df=1.48, e=0.015$)は、SX法の①の結果に近い。ATRのデータは1つの局所的最適点にあるといえよう。PS法やSX法②の結果と食い違うのは、例えば燃料交換機の配置上の制約等から格子間隔をあまり小さくすることは困難があり、ATRの場合、PS法やSX法②の $L=22\text{cm}$ というのは、小さすぎると考えられるのが1つの理由である。

3. $N=37$

SGHWRのデータ⁽⁹⁾($L=26.1, df=1.448, e=0.022$ ただし、0.016に変更する予定もある)は、PS法、SX法②の結果に近い。SX法①の方がコストは小さいが、この点が採用されなかった1つの理由は、2. ($N=28$)と同様 L が小さすぎるといえる点があると思われる。

以上要約すると、従来行われた諸設計は確かに局所的最適点にある。ここで用いた探索法でも、そのような最適点が発見できる。探索法によると、一見従来の設計よりもよいと思われる点も見出されるが、それが設計に採用されなかったのは、他の拘束条件(天然ウランの使用、 L の値)が考慮されたためと思われる。このような問題の設定に当っては、実際の設計に当てて考慮される拘束条件をもれなく組み入れることが、案外むずかしい、等々のことがいえるであろう。

第2表 PS法による探索例

計算回数	N=19	N=28	N=31	N=37①	N=37②
出発点	1.1317 (24.0, 1.70, 0.012)	2.1262 (22.0, 1.70, 0.010)	1.4377099 (26.0, 1.1, 0.010)	1.3154054 (22.0, 1.1, 0.010)	1.0389976 (22.0, 1.1, 0.014)
20	1.1197 (26) (22.9, 1.70, 0.0119) 1.1130 (33) (22.8, 1.70, 0.0116)	1.0626 (23) (23.0, 1.40, 0.014)	1.0964 (23) (25.0, 1.50, 0.014)	0.99801 (22) (27.0, 1.55, 0.016)	0.99073 (24) (22.0, 1.20, 0.016)
40		1.0613 (48) (22.1, 1.39, 0.014)	1.0962 (42) (24.9, 1.50, 0.014)	0.99739 (40) (26.9, 1.54, 0.016)	0.98968 (43) (22.1, 1.20, 0.016)
60	1.1128 (58) (22.84, 1.70, 0.01154)	1.0609 (54) (22.2, 1.36, 0.014)	1.0959 (56) (24.6, 1.48, 0.014)	0.99673 (65) (22.6, 1.528, 0.016) 0.99673 (72) (26.6, 1.526, 0.016)	0.98814(65) (22.43, 1.212, 0.016) 0.98812(72) (22.46, 1.214, 0.016)
80	1.1128 (77) (22.836, 1.70, 0.01154)	1.0608 (79) (22.16, 1.366, 0.014)	1.0959 (81) (24.58, 1.48, 0.014)	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
最終	1.1128(203) (22.836, 1.70, 0.011538)	1.0608(189) (22.173, 1.3688, 0.014)	1.0959(201) (24.580, 1.4798, 0.014)	0.99673(215) (26.604, 1.5256, 0.016)	0.98812(215) (22.472, 1.2155, 0.016)

V. 探索経過の検討

まず、PS法とSX法の収束点を対比してみると、 $N=19$ と31とでは、ほとんど一致している。 $N=28$ では、PSの結果とSXの②が大体一致し、 $N=37$ では、PSの①とSXの①、PSの②とSXの②とがそれぞれ大体一致している。しかし、 $N=28$ でSXの①はPSおよびSX②とは大部異なる点へ収束し、 $N=37$ でも①の組と②の組では収束点はかなり異っている。そこで、これらの収束点の近傍での評価関数の形状をもう少し詳しく調べてみた。その結果の1例として、 $N=31$ の場合の等コスト線を、第2図(a)~(c)に示す。明らかに収束点(24.58, 1.48, 0.014)は少なくとも局所的最適点である。このような等コスト線を描いて調べると、第2, 3表の収束点はいずれも極小点のすぐ近くにある。このことからこの問題の評価関数は $N=28, 37$ の場合には、顕著な多峰性を示すことがわかる。ここに示す探索結果も局所的最適点に落ち込んでしまった場合がかなりある。(N=28 SX①, N=37 PS①, SX①)大体同じ点から探索を開始しているのに、PSとSXとで落ち着く先が違うことがあるのは、PSとSXのアルゴリズムの違いにより探索の経路が違って来るからである。そのことは、簡単な2次元関数

の例についてのテストでも見られたことである。同じ方法でも出発点を変えると落ち着く先が異なる。実際にこういう探索法を適用するには、いくつかの出発点をランダムに選んで探索をくり返し、大局的最適点を見つける努力をしなければならない。これは多峰性の問題では避けられないことで、PS法やSX法だけの欠点ではない。 $N=37$ の場合について、いろいろの出発点について、どちらの局所的最適点に到達するかを調べてみた結果を第4表に示す。

さて、 $N=31$, SX②であるがこの場合、最終的に到達した(23.4, 1.39, 0.014)という点は第2図(c)からもわかるように、局所的最適点ですらない。このような点で探索がとまってしまった理由を調べてみると、 $e=0.014$ の境界面に達した時、たまたま単体の4つの頂点が同一直線上にならんでしまい、その直線と直交する方向にコストの改善される点があるにもかかわらず、局所的最適点と誤認して止まってしまったらしい。前にも述べたように、このような場合PS法に切り換えて探索をつづけることが考えられる。上の例で、(23.4, 1.39, 0.014)でPS法に切り換えてみると、 $e=0.014$ の境界面にそって動き最適点(24.58, 1.48, 0.014)へ到達した。

$J(x)$ の計算回数と、コストの値の関係を $N=28$ に

第3表 SX法による探索例

計算回数	N=19	N=28①	N=28②	N=31①
出発点	1.1317(4) {24.0 1.70 0.012 25.0 1.70 0.012 24.0 1.60 0.012 24.0 1.70 0.011}	1.6977(4) {22.0 1.70 0.01 23.0 1.70 0.01 22.0 1.60 0.01 22.0 1.70 0.011}	1.1240(4) {22.0 1.70 0.014 23.0 1.70 0.014 22.0 1.60 0.014 22.0 1.70 0.013}	1.6296(4) {22.0 1.70 0.01 25.0 1.70 0.01 22.0 1.60 0.01 22.0 1.70 0.013}
20	1.1135(21) (22.134, 1.6495, 0.011478)	1.0733(20) (25.654, 1.5327, 0.013735)	1.0649(19) (22.713, 1.3731, 0.013583)	1.1070(20) (25.80, 1.6455, 0.013954) 1.0964(25) (24.462, 1.4671, 0.013939)
40	1.1126(43) (22.847, 1.6996, 0.011548)	1.0642(45) (24.515, 1.5421, 0.013954)	1.0609(43) (22.139, 1.3737, 0.013999)	
60	.	1.0640(63) (24.580, 1.5466, 0.013984) 1.0639(71) (24.786, 1.5607, 0.013999)	1.0608(58) (22.139, 1.3676, 0.013995)	
80	.	.	.	1.0959(68) (24.594, 1.4747, 0.013999)
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
最終	1.1126(105) {22.814 1.70 0.011536 22.815 1.70 0.011536 22.814 1.70 0.011537 22.812 1.70 0.011535}	1.0639(203) {24.690 1.5537 0.014 " " " " " " " " "}	1.0608(169) {22.173 1.3687 0.014 " " " " " " " " "}	1.0959(378) {24.58 1.4798 0.014 " " " " " " " " "}

計算回数	N=31②	N=37①	N=37②
出発点	1.9665(4) {22.0 1.70 0.01 23.0 1.70 0.01 22.0 1.60 0.01 22.0 1.70 0.011}	0.99847(4) {28.0 1.50 0.016 27.0 1.50 0.016 28.0 1.40 0.016 28.0 1.50 0.015}	1.1987(4) {22.0 1.10 0.01 23.0 1.10 0.01 22.0 1.20 0.01 22.0 1.10 0.011}
20	1.1441(22) (22.779, 1.5331, 0.0139)	0.99714(20) (26.484, 1.4975, 0.015994)	0.99739(20) (23.430, 1.2360, 0.015873)
40	1.0983(42) (23.449, 1.3747, 0.0140)	0.99705(39) (26.51, 1.4986, 0.015999)	0.98915(49) (22.673, 1.2474, 0.015997)
60	1.0979(64) (23.381, 1.3918, 0.0140) .	0.99698(65) (26.592, 1.5016, 0.016)	0.98899(60) (22.625, 1.2458, 0.016)
80	.	0.99696(99) (26.640, 1.5043, 0.016)	0.98843(85) (22.541, 1.2236, 0.015989)
.	.	.	.
.	.	.	.
最終	1.0979(326) {23.392465, 1.3895695, 0.0140 23.392488, 1.3895640, 0.0140 23.392458, 1.3895711, 0.0140 23.392465, 1.3895694, 0.0140}	0.99676(398) {26.600, 1.5251, 0.016 " " " " " " " " "}	0.98810(384) {22.474 1.2157 0.016 " " " " " " " " "}

ついて第3図に示した。一般に、 N の値や方法によっても違うが、10数回から20回くらいの計算で、かなり最適点の近くまで達している。そのことは、第2、3表にもあらわれている。1例として、 $N=28$, SX②に

ついて計算回数100のときの、4頂点の重心を最適点とみなすことにし、コストおよび変数の値が最適値の $\pm 5\%$, $\pm 1\%$ 以内にそれ以後ずっととどまるような最小の計算回数を求めてみると、第5表のようになる。

(a) $e=0.013$ (b) $e=0.0135$ (c) $e=0.014$ 第2図 $N=31$ の場合の等コスト線第4表 出発点による収束点の相違の例
($N=37$ の場合)

(22.47, 1.216, 0.016) へ収束したもの		(26.6, 1.526, 0.016) へ収束したもの	
PS	(22.0, 1.1, 0.014) (24.0, 1.3, 0.016)	PS	(25.0, 1.3, 0.014) (28.0, 1.7, 0.012) (22.0, 1.1, 0.010)
SX	$\begin{pmatrix} 22.0 & 1.1 & 0.010 \\ 23.0 & 1.1 & 0.010 \\ 22.0 & 1.2 & 0.010 \\ 22.0 & 1.1 & 0.011 \end{pmatrix}$	SX	$\begin{pmatrix} 28.0 & 1.5 & 0.016 \\ 27.0 & 1.5 & 0.016 \\ 28.0 & 1.4 & 0.016 \\ 28.0 & 1.5 & 0.015 \end{pmatrix}$

第5表 収束状況の1例

	$\pm 5\%$	$\pm 1\%$
J	13回	20回
L	11回	39回
df	3回	63回
e	20回	37回

これらのデータはもちろん1例にすぎないから、これだけから一般論はできないが、全体的な傾向として最適点の近傍へ達するのは割合速い、そこが最適点であることを確かめるために計算回数が多くなってしまいうという現象がみられる。

ここで用いた方法が最初に述べた格子点での値を比較するやり方にくらべてどの程度有利になるかを、一般的にいうことはむずかしい。たとえば最適点を L については1 cm, df は0.1 cm, e は0.001の精度で求めたいとする。そのため第1表の範囲に細かい網の目を作ると1つの N に対して約500点の計算が必要になる。一方SX法 $N=19$ では6回, $N=28$ ②では11回というように少ない回数で上記の精度内に入る点が見つかっている。その後これが最適点に近いのを確かめる計算回数は少なくとも20~30回必要である。それを考慮して、一方格子点での比較も初めに粗い網の目を作り最適点がありそうな部分だけ細かく調べるなどして計算回数を減らせるとしても、必要な計算回数を比較すると数分の1程度ですむこと、探索が自動的に行われることがここで用いた方法の利点といえよう。

Ⅶ. まとめ

原子炉最適設計点の探索への最適化技法の適用について、重水減速沸騰軽水冷却炉の場合を例にとって検討してみた。問題の性質からいって解析的手法や勾配法は使えないので、評価関数の値のみを用いる直接探

第3図 計算回数とコストとの関係の1例

索法を使うことにし、パターンサーチ法およびシンプレックス法の2つを採用した。

探索結果はまず妥当なものであり、従来の設計と違う場合にはそれ相当の理由もあることがわかった。

方法の比較については、シンプレックス法は制限条件の処理の点で問題があり、その点では、パターンサーチ法に劣るが、その他の点では著しい差はなく、両方法ともまずまず適用可能である。ただ大局的最適値を求めるために、有効な方法と最適点に近づいたことをなるべく早く検出し、以後の「仕上げ」を能率よくやる方法を開発し、PS法なりSX法に組み込むことが望ましいということになろう。前者については、ここでも用いたランダムにいくつかの出発点を選んで探索をくり返す方法のほかに、探索途中でランダムに探索点を変更することも考えられる。後者については、ここで用いた方法は、新しい点のコストが従来の点より改善されたかどうかのみ着目している。単に改善されたかどうかだけでなく、どの程度改善されたかという量的な評価も加えると、最適点への接近を検知できるかもしれない。これらは現在まだ思いつきの段階であり、なお検討を要する。

なお、本報では用いなかったが、シンプレックス法を変形して、制限条件付きの問題も取り扱えるようにしたコンプレックス法⁽²⁾もある。これを用いれば上述のシンプレックス法の弱点は解消すると思われる。た

だし、計算量はシンプレックス法より多少増す。またパターンサーチ法、シンプレックス法以外にも類似の手法として、回転座標法⁽²⁾やその変形⁽³⁾、Powellの方法⁽³⁾などもあり、これらもこの種の問題に適用可能であると思われる。

本報で用いた手法は、本来発見論的なものであり、理論というべきものはない。その性格上、ここで述べたことは1つのケーススタディとみなされるべきで、結果に普遍性があるとは限らない。しかし、それにしても今後この種の問題に最適化技法を適用しようとする際、計算回数のおよその見当をつけたり、どのような点に注意すればよいかを知るのに役立つと思われる。

この研究に際しては、日本原子力研究所 安川 茂氏にデータを提供していただき、また従来の設計例との比較その他いろいろ有益なコメントをいただいた。そのご好意に心からお礼申し上げる。

—参考文献—

- (1) 須田信英, 小江 清: 昭44炉物理・炉工学科会予稿集, C15, (1969).
- (2) WILDE, D.J.: "Optimum Seeking Methods", p.145~151 (1964), Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- (3) KOWALIK, J., et al.: "Methods for Unconstrained Optimization Problems," p.21~22

(1968), Elsevier.

- (4) BOX, M.J., *et al.*: "Nonlinear Optimisation Techniques", p. 25~26 (1969), Oliver 2 Boyd.
- (5) 文献(3) p.24~27; 文献(4) p.22~24.
- (6) LAWLER, E.L., *et al.*: *Operations Res.*, **14**, 699~719 (1966).
- (7) 安川茂: 私信.
- (8) TOWNES, B.M., *et al.*: Calculation of reactivity coefficients for a BLW lattice cell, *AECL-2649*, (1966).
- (9) 島 史朗: 新型転換炉の第1次設計, 原子力工業, **14**(10), 33~40 (1968).
- (10) CARTWRIGHT, H.: The design of the steam generating heavy water reactor, *Symp. on Heavy Water Power Reactors*, *SM-99164*, (1967), IAEA.
- (11) McLEOD, N.B., *et al.*: The effect of fuel and poison management on nuclear power systems, *NYO-9715*, MITNE-10, (1961).

〔付 録〕 評価関数の計算方法⁽¹¹⁾

$$J = C_{\text{fuel}} + C_{D,0}$$

$$C_{\text{fuel}} = \frac{10^3}{14 \times \eta} \cdot \frac{CF}{B} \text{ (mill/kWh)}$$

$$CF = CF_1 + CF_2 + CF_3 + CF_4 + CF_5 + CF_6 \text{ (\$/kg)}$$

 CF_1 = 燃料費 (\\$/kg)

$$\begin{cases} 20.8 (e=0.0714), & 47.7 (e=0.010) \\ 66.1 (e=0.012), & 85.4 (e=0.014) \\ 105.3 (e=0.016) \end{cases}$$

 CF_2 = 成型費 (\\$/kg) 60 CF_3 = 輸送費 (\\$/kg) 20 CF_4 = 再処理費 (\\$/kg) 13.9 CF_5 = Pu 料金 (\\$/kg) -30

$$CF_6 = \left\{ t \text{ (燃料の炉外滞在時間, yr)} + \frac{B \cdot M_F}{P \cdot L_f \cdot 365} \cdot \frac{1}{2} \right\} \cdot CF_1 \cdot \gamma$$

 L_f : 負荷率 0.8, γ : 金利 0.065 t : 1.5 yr η : 熱効率 0.31~0.32 B : 燃焼度 (MWD/t) P : 熱出力 1,500 (MWt)

$$C_{D,0} = \frac{M_{D,0} \cdot C_p \cdot \epsilon \cdot 10^3}{P_e \times 365 \text{ (day/yr)} \times 24 \text{ (hr/day)} \times L_f} \text{ (mill/kWh)}$$

 C_p = 重水費 45.2 (\\$/kg (D_2O)) ϵ = 金利 0.092 (年当り) 20年間償還
5% 残存価値 P_e = 電気出力 500 MWe

☆ 国際会議のご案内 ☆

○ 核爆発の平和利用パネル ○

○ 1972年11月27日~12月1日 (於 ウィーン)

○ 討議議題

- (1) Introductory session
- (2) Phenomenology of nuclear explosions, contained and cratering
- (3) Applications
- (4) Scientific applications
- (5) Future IAEA activities
- (6) Conclusions and recommendations

○ 科学技術における核データ利用 ○
シンポジウム

論文募集

IAEA のこのシンポジウムでは, 論文提出者および

参加希望者を募集している。

○ 1973年3月12~16日 (於 パリ)

○ 討議議題

- (1) Nuclear data for fission reactors
- (2) Nuclear data for activation analysis
- (3) Status of compilations and evaluation of nuclear structure and reaction data
- (4) Nuclear data in applications of radioisotopes
- (5) Nuclear data for safeguards
- (6) Nuclear data for thermonuclear fusion reactors
- (7) Nuclear data for space and accelerator shielding
- (8) Nuclear data for astrophysics
- (9) Summary panel

○ 論文アブストラクト (英文9部, 和文3部) 9月16日

○ 本論文 (英文4部) 1973年1月2日

○ 参加申込 (所定書式で) " 2月3日

問合せ・申込先は原子力局国際協力課へ。

(Tel. 03-581-5271)