

保全を考慮した核融合炉原型炉の経済性評価

- Cost assessment of demo fusion reactor with considering maintenance -

東北大学院 橋爪 秀利 Hidetoshi HASHIZUME Member
東北大学院 北郷 和寿 Kazutoshi KITAGOH

The purpose of this study is to perform cost assessment of nuclear fusion reactors in order to draw up commercial plants. A fusion reactor may have a complex configuration to achieve high beta value, which leads to low and instable availability when maintenance is taken into account. Therefore, reactor's availability must be evaluated with considering the influence of the configuration complexity. Furthermore the availability has the strong impact on COE(Cost of Electricity), that is, a fusion reactor with low availability will not be accepted as a commercial plant.

Therefore, we developed a new method to calculate availabilities with random numbers, in which the complexity of reactor's configuration could become considered. In addition, we considered the reduction of superconducting coil's maintenance time by introducing remountable magnet system because the coil maintenance requires quite long time in the present technology. The results show that the availability becomes relatively large if the short maintenance time of coils could be achieved, for example, by remountable magnetic systems.

KeyWords : fusion reactor, commercial plants, beta value, COE, availability, maintenance time, remountable magnetic systems.

1. 緒言

核融合炉は未来の安定した電力を供給するための発電炉として期待されている。現在では国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画が進行中であり、核融合発電炉の実現に向けて着実に進んでいるように考えられる。しかし、依然多くの問題が残されている事も事実である。その一つに建設コストが莫大なものとなる事が挙げられる。この原因の主たる事として、超伝導コイルの使用が考えられる。また、現在考えられている核融

合炉は複雑な形状をしている事も問題として挙げられる。この事は建設時のみならず、メンテナンス時にも困難をもたらし、設備利用率の悪化を導く事になる。一方、核融合炉の経済性評価はいままでに為されているが、複雑な形状を踏まえた経済性評価は為されていない。そこで本研究では核融合炉の形状の複雑性を考慮する事により、経済性に大きく関わる設備利用率の変化を調べる事とした。

2. COEと設備利用率

核融合炉の経済性評価の基準として、COE (発電原価)が挙げられる。これは1kW・hあたりの発電コストを示しており、次式で示される。

$$COE = \frac{C_c F_G + C_F + C_{OM}}{P_e \times h \times F_{av}} \text{ mill/kW}\cdot\text{h} \quad (1)$$

ここで C_c は総資本費を示しており、超伝導コイルや

◆連絡先：橋爪 秀利

〒980-8579 青葉区荒巻字青葉01
東北大学工学部量子エネルギー工学部
電話：022-217-7904

主構造物の建設費が含まれている。次に C_F は年間の燃料サイクル費を示しており、第一壁やブランケット等の定期的に交換が考えられている装置要素の製造費や核融合の燃料となる重水素等の費用が含まれている。 C_{OM} は1年間の運転維持費を示している。また、 F_{CR} は年資本比率と呼ばれており、 C_C と乗算する事で1年間分の資本費を示す項となる。分母における P_e は送電端出力を示しており、プラントの維持のための再循環電力を減算した電気出力を示している。 h は8640時間(h/yr)を示している。最後に F_{av} は設備利用率を示している。このCOEをGeneromak Model⁽¹⁾を用いた計算コードを使用して算出する事とする。このGeneromak Modelでは資本コスト・燃料費・運転維持費等を考慮し発電コストを求めている。本研究では2通りの数値計算をおこない、プラズマの閉じ込め効率を表わしている体積平均ベータ値を変化させたものと、ベータ値を固定して設備利用率を変化させたもので行なった。始めにマグネットコストを100 (\$/kg)とし、ベータ値を変化させたものを図-1(a)に示す。図より、低ベータ領域(ベータ値(10%))では、COEはベータ値に強く依存しており、ベータ値の増加につれてCOEが減少する事がわかる。また、ベータ値が0.1(10%)以上になるとベータ値に対するCOEの依存性が小さくなり、COEはベータ値が上昇してもあまり減少しない事が分かる。これは低ベータ領域では閉じ込め効率がよくなく、設定した出力に達するた

めのプラズマ体積が大きくなり、それに付随して超伝導コイルをはじめとする各装置要素の体積が大きくなってしまふためである。次に、この結果からベータ値を0.12(12%)に固定し、マグネットのコストをパラメータとした場合の、設備利用率のCOEに与える影響を解析した。結果を図-1(b)に示す。核融合炉実現に向けてCOEを低いものとするためには、高ベータ値の達成のみではなく高利用率の達成が必要とされる事が考えられる。

3. 設備利用率算出方法

次に設備利用率を算出する方法について述べる事とする。Generomak Modelでは設備利用率は定数として代入している。本研究では装置の形状の複雑性を考慮して算出するために、設備利用率は次のように求める事とする。プラントの寿命期間内を1時間毎に各装置要素の故障の有無を、その装置要素の故障率関数と発生させた乱数との比較で判定する。故障が起こった場合は直ちに修理または交換するものとして、故障した装置のメンテナンス時間分プラントは稼働しないものとする。そこで設備利用率は単純に、

$$F_{av} = \frac{LT - Mr}{LT} \quad (2)$$

と定義する。 LT は核融合プラントの寿命を示しており、 Mr はメンテナンスに要した時間を示している。

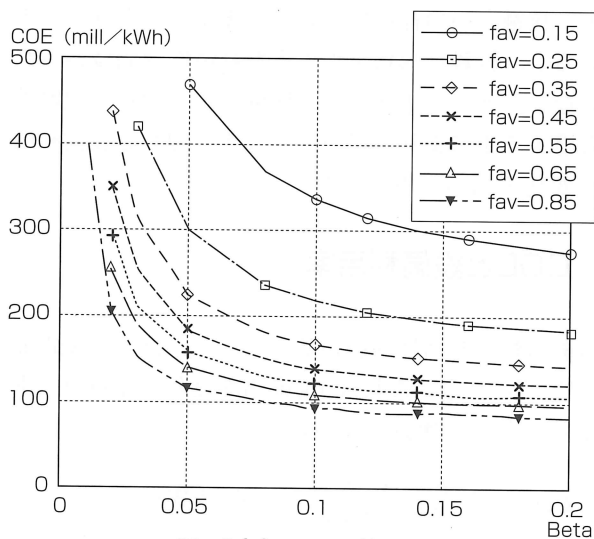


図-1(a) ベータ値とCOE

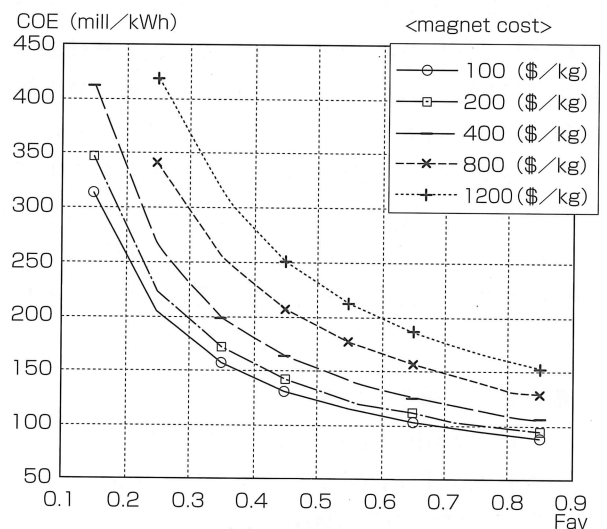


図-1(b) 利用率とCOE

次に故障率関数に関しては、時刻 t までに対象としている装置が故障する確率を非信頼度関数 $F(t)$ とすると、時刻 t まで故障しない確率 $R(t)$ は、

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (3)$$

で示され、 $R(t)$ は信頼度関数と呼ばれる。この時、 $F(t)$ が微分可能であるとき、

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4)$$

を故障時間密度関数という。 dt を微小な値としたとき、 $f(t)dt$ は時間間隔 $(t, t+dt)$ において故障する確率となる。そして、故障率関数は

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (5)$$

で表わされ、 dt を微小な値とすると、 $\lambda(t)dt$ は時刻 t まで故障しなかったという条件のもとで、時間間隔 $(t, t+dt)$ で故障する確率を示している。また、故障率関数は、初期故障期間を過ぎた機器は偶発故障期間とよばれる故障率が時間に対して一定となる時期をむかえることとなる⁽²⁾。本研究では系統的なデータがないため Generomak Model で考えられていたデータを参考として計算を行なう事とする。表-1 にこのデータを表記し

た。これには装置要素とその故障率やメンテナンス時間等のパラメータが示されている。ここで F_{ra} は故障率、 M_{r0} は大破壊時のメンテナンス時間を示しており、この場合は装置の交換が必要となる。 M_{r1} は小破壊時のメンテナンス時間であり、この場合は交換を必要とせず、大破壊と比べて短いメンテナンス時間となる。 F_m は全ての故障に対する大破壊の割合を示している。

4. プラントモデルとタイプ

本研究では核融合炉の形状の複雑性による影響を調べるために次のようなモデルを仮定した。

(1) simple model

このモデルでは、全ての装置要素が独立に交換が可能である場合である。そのため、大破壊時のメンテナンス時間は故障した装置要素のものだけでよい。

(2) complex model I

このモデルでは、図-2 (a) に示すように B/S (Blanket&Shield) 装置要素が PC (Primary coils) の内側にあるため、ブランケットが大破壊を起こした場合には、外側の装置要素である主コイルを取り除くことなく B/S 装置要素を交換する事ができない場合である。

表-1 計算に用いたプラントの装置要素データ

Component	Number n	F_{ra} (h^{-1})	M_{r0} (h)	M_{r1} (h)	F_m
Primary coils + auxiliaries	10	6.0×10^{-6}	10^4 (440)	240	0.1
Secondary coils + auxiliaries	4	6.0×10^{-6}	10^4 (440)	240	0.1
Magnet supplies	2	2.0×10^{-4}	100	10	0.1
Cryogenic system	1	2.0×10^{-4}	500	24	0.1
Blanket/shield	20	3.6×10^{-6}	440	320	0.5
Impurity/particle control components	10(8)	3.0×10^{-5}	250	10	0.1
Fueling	2(1)	2.3×10^{-4}	72	-	1.0
Vacuum systems	3	1.0×10^{-5}	72	6	0.1
Plasma heating	3(2)	5.0×10^{-4}	350	20	0.3
Cooling	3	1.0×10^{-4}	100	5	0.1
Instrumentation	1	1.0×10^{-3}	100	3	0.1
Turbine plant	1	6.6×10^{-4}	172	-	
Electric plant	1	1.0×10^{-4}	90	-	
Plant services	1	6.0×10^{-6}	170	-	
Heat rejection	1	9.8×10^{-7}	13	-	

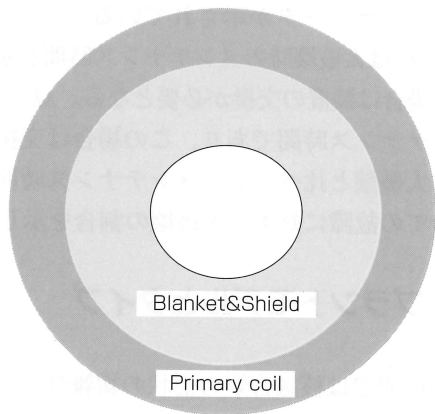


図-2(a)

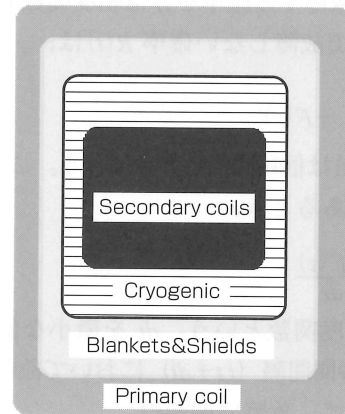


図-2(b)

図-2 計算に用いたモデル

(3) complex model II

このモデルは(2)と比べてさらに複雑になっている。図-2(b)に示すような構造となっており、内側の装置要素は外側の装置要素全てを取り除かなければ交換する事ができない場合である。そのため、例えばSC (Secondary coils) 装置要素が大破壊を起こした場合は、CS (Cryogenic)、B/SそしてPCの外側装置要素3つを全て取り除かなければならない。すなわちメンテナンス時間はSC、CS、B/SとPCの4つのメンテナンス時間を合計した時間が必要となる。

次に超伝導コイルの分割製造及び接合が可能となった場合、コイル系のメンテナンス時間は大幅に短縮できると考えられる³⁾。この手法を用いる事ができるならば、コイル系(PC及びSC)の交換時間は、B/Sと比べて放射化の影響が少ないと考えられるので、短くする事ができると予測できる。そこで、以下の2つのタイプを仮定した。

(1) standard maintenance time type

このタイプではコイルは分割製造する事ができない事とする。そのため、メンテナンス時間はGeneromak Modelのものをそのまま使用、すなわち $M_{r0} = 10000$ (h)とする。

(2) short maintenance time type

このタイプでは、コイル系の分割製造及び接合が可能な場合を想定する。そのため、 $M_{r0} = 440$ (h)として計算する。

5. 故障率をそのまま用いた場合の計算結果

以上の設定のもとに計算を行なった。計算したプラントの数は 10^5 個、プラントの寿命は20年と一定にした。故障率はGeneromak Modelのものをそのまま使用している(この場合を以下、標準とする)。結果はヒストグラムを用いて表示している。そしてモデル毎にstandard maintenance time type(以下standard)とshort maintenance time type(以下short)の場合を同じ図中に表示した。また、参考のために統計表を挿入している。

はじめにsimple modelの場合について計算を行なった。結果を図-3(a)に示した。図よりStandardの場合は、利用率が分散する傾向にあることを知る事ができる。このモデルでは最大値や平均値はstandard及びshortの場合もほとんど変化がないように思われる。しかし、standardでは最小値はshortの場合と比べて13%ほど低く、分散も約8倍にもなっている事がわかる。

次にcomplex model Iにおける計算結果を図-3(b)に示した。図が示すように明らかにstandardの方がshortの場合と比べて利用率の悪化が見取れる。Standardに関しては、simple modelのstandardと比較して各統計値の悪化を知る事ができる。特に最小値は約14%、分散は約2.5倍となっていることがわかる。一方、shortの場合では、complex model Iの場合でもsimple modelと比べてほとんど変化がない事がわかる。

また、complex model II でも同様な事がいえ、このモデルのstandardを同じモデルのshortの場合と比較すると最小値は30%ほど、平均値は約20%、そして分散はおよそ16倍にもなっている事がわかる。

6. 故障率を変化させた場合の計算結果

次に分割型のコイルを使用する事ができてコイル系の短いメンテナンス時間を達成する事ができた場合、すなわちshortでの大破壊時のメンテナンス時間 $Mr0 = 440$ が可能であるとする場合に、どれほどまでの故障率の上昇を考慮できるかを評価した。故障率はGeneromak Modelのものと比べてコイル系の故障率が変化無し(標準)、5倍、10倍、50倍の場合についてモデル毎に計算を行なった。計算結果は、図の横軸に利用率をとり、縦軸にその利用率が達成される割合を示している。また、参考のためにstandardにおける故障率は変化無しの場合の計算結果を黒線で示している。

はじめにsimple modelにおける結果を図-4(a)に示した。図より、このモデルではメンテナンス時間を短縮できれば、5倍ほどの故障率の上昇はstandardの場合と比較しても悪くは無い利用率を達成できると考えられる。

次にcomplex model I の場合の結果を図-4(b)に示した。図-4(b)より、10倍ほどの故障率上昇を考慮してもstandardの場合(図中の実線)より、良い利用率を得る事ができると考えられる。

最後にcomplex model II における結果を図-4(c)に示した。この場合も図から、10倍ほどの故障率上昇を考慮してもstandardの場合と比べてはるかに良い利用率を得ることができると考えられる。また、standardの場合、利用率は分散しているが、メンテナンス時間を短縮する事ができれば、一定した利用率が得られる事がわかる。

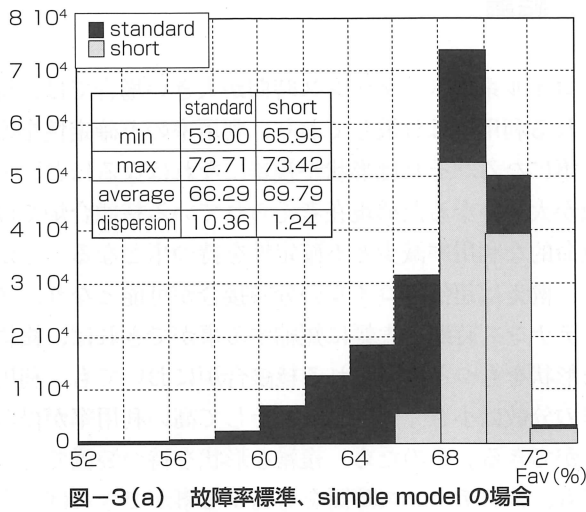


図-3(a) 故障率標準、simple model の場合

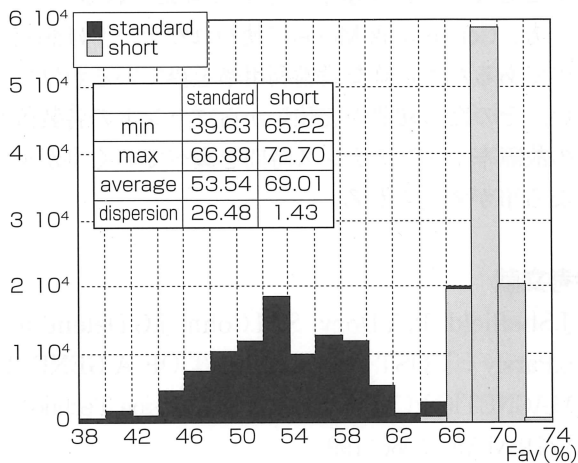


図-3(b) 故障率標準、complex model I の場合

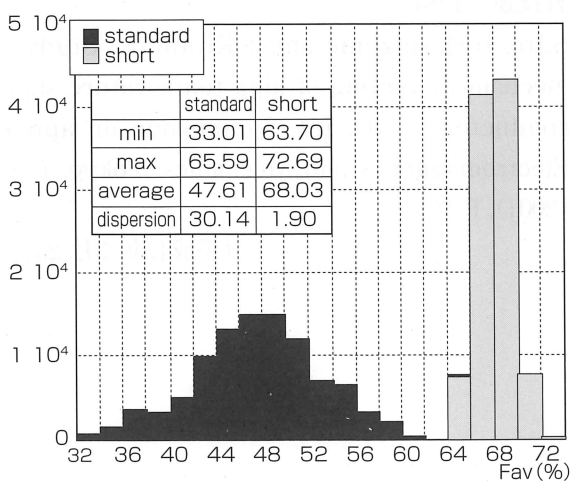


図-3(c) 故障率標準、complex model II の場合

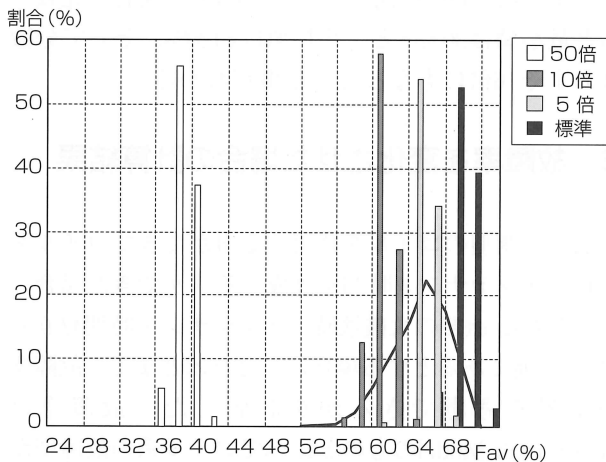


図-4(a) simple model における故障変化

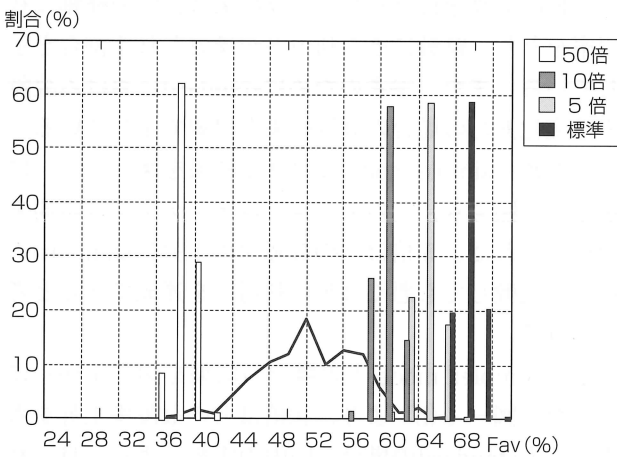


図-4(b) complex model I における故障変化

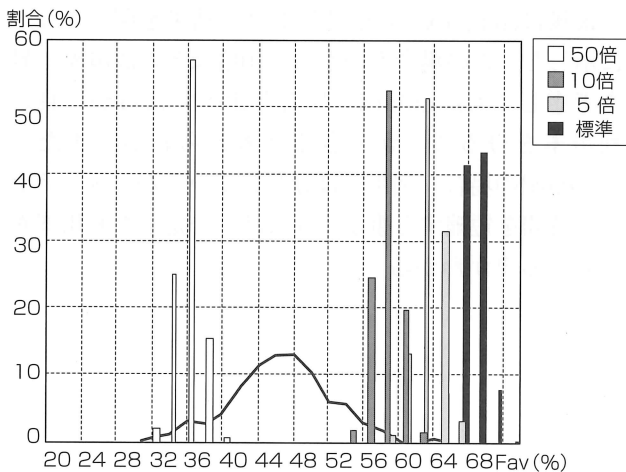


図-4(c) complex model II における故障変化

7. 結論

コイル系のメンテナンス時間が大きい場合では、得られる利用率は分散しており、利用率の不確定性を導くことになる。それは形状が複雑になればなるほど、分散が大きくなるため現在考えられている核融合炉では致命的な利用率減少と不確定性を持つ事となる。しかし、例えば超伝導コイルの分割接合が可能となり、メンテナンス時間を大幅に短縮する事ができれば、複雑な形状をもつと考えられる核融合炉においても、利用率の分散は小さく一定した、そして高い利用率が得る事ができる。そのため、複雑な形状を持つ装置であっても、メンテナンス時間を短縮する事ができれば、商用炉として成り立つ事ができると考えられる。

一方、Generomak Modelに使われたデータは想定のものであるため正確な設備利用率を得ているわけではない。そのため初期の実験炉からプラントの各装置要素の故障率やメンテナンス時間を調べていく事が重要となる事が考えられる。

参考文献

1. J.Sheffield, R.A.Dory, S.M.Cohn, J.G.Delene and L.Parsly : "COST ASSESSMENT OF A GENERIC MAGNETIC FUSION REACTOR", Fusion Technology Vol.9 MAR. (1986) 199
2. 三根久、河合一：「信頼性・安全性の基礎数理」日科技連 (1984)
3. S.Ito, H.Hashizume and S.Kitajima, "Study on mechanical jointing of high temperature superconductors", 10th Int. Symposium on applied Electromagnetics and Mechanics, Tokyo, Japan (2001), P.283

(平成15年 3月 25日)