

火力発電所のシステム熱効率評価

キーワード：システム熱効率，火力発電，複合発電，
技術進歩，市場浸透

永 田 豊 内 山 洋 司

〔要 旨〕

将来の電源構成を考える上で、火力発電所のシステム熱効率（あるシステムに属する各火力発電所の熱効率をそれぞれの発電電力量で加重平均したもの）は重要な要素の一つである。本研究では、将来のシステム熱効率を予測するためのシミュレーションモデルを開発し、我が国の電源構成における、高効率の複合発電の導入効果を、2015年度までのシステム熱効率の予測を通して分析した。同時に複合発電導入ペース・電力需要の伸び・年負荷率・原子力の開発規模などの変化による感度解析を実施し、システム熱効率に影響をおよぼす要因を定量的に調べた。結果は以下に要約される。

1. 複合発電の導入により、2015年度末時点でのシステム熱効率は42.6%となり、これは複合発電を導入しない場合と比較して4.2ポイント高い。また、複合発電を導入しない限り、システム熱効率の現状からの飛躍的な改善は望めない。
2. 感度解析の結果、システム熱効率を改善するためには、
 - ① 設備利用率上限の改善
 - ② 発電効率改善のための技術開発
 - ③ 複合発電導入の積極的な推進が重要であることが明らかになった。
3. 将来、負荷率の低下が懸念されているが、極端な場合を除くと、年負荷率の変化がシステム熱効率に与える影響は小さい。

1. はじめに

2. 評価方法

2.1 システム熱効率

2.2 技術進歩と市場占有率

2.3 評価モデルの概要

3. 結 果

3.1 システム熱効率の予測

3.2 感度解析

4. おわりに

参考文献

付 録

・1985年度火力発電所給電実績（9電力）

1. はじめに

我が国の電源構成の中で、これまで圧倒的な発電シェアを誇っていた火力発電は、徐々にその主役の座を原子力に譲りつつある。このような状況のもと、火力発電の将来像は次のように考えられる。

設備面では、電力需要の伸び率低下・原子力発電の積極的な導入による新設の減少、反面、複合発電の導入による熱効率の向上があげられる。適用面では、負荷率の低下およびベース電源である原子力発電の比率の増大により、ピーク対応すなわち負荷追従型の運転を一層余儀なくされることが予想される。

本研究では、このような状況を念頭に置きつつ、将来の電源構成を考える上で必要なシステム熱効率を予測するためのモデルを開発し、我が国の電源構成における複合発電¹⁾の導入効果を、2015年度までのシステム熱効率の予測を通して分析した。同時に、システム熱効率に影響を及ぼす要因を抽出し、それらの値の変化がシステム熱効率に与える効果について定量的に調べた。

2. 評価方法

2.1 システム熱効率^[1]

システム熱効率 (System Thermal Efficiency, STE) は、ある決まった電力供給エリア (国, 地域, 電力会社別など) に属する火力発電所の集団について、同一期間内における各火力発電所の熱効率をそれぞれの発電電力量で加重平均したもので、その集団レベルでの平均熱効率とすることができる²⁾。

$$STE = \frac{\sum_i (TE_i \cdot GE_i)}{\sum_i GE_i} \quad (2.1)$$

但し、

STE: システム熱効率

TE_i : i 設備の熱効率

GE_i : i 設備の発電電力量

STE の上昇はより熱効率の高い技術の導入によって達成されることから、その伸びは技術進歩の指標であると同時に、より経済的な電源計画を決定するために必要な要素の一つである。STE は新設および廃止される設備容量とその熱効率、およびそれらの運用状況によって決まるが、これらは電力需要・新技術導入ペース・原子力開発計画・負荷特性などに大きく影響される。

現行の9電力体制が施行されて以来現在までのSTE(9電力)の変遷を図2.1に示す。1965年度頃までSTEは堅調に上昇してきたが、その後は頭打ちでほとんど変化が見られない。この主な原因として

- ① 在来型技術の技術進歩の停滞 (Technological Stalemate)
- ② 電力需要伸び率の低下および原子力の導入による火力の新設設備の減少
- ③ 環境規制強化と負荷追従運転による熱効

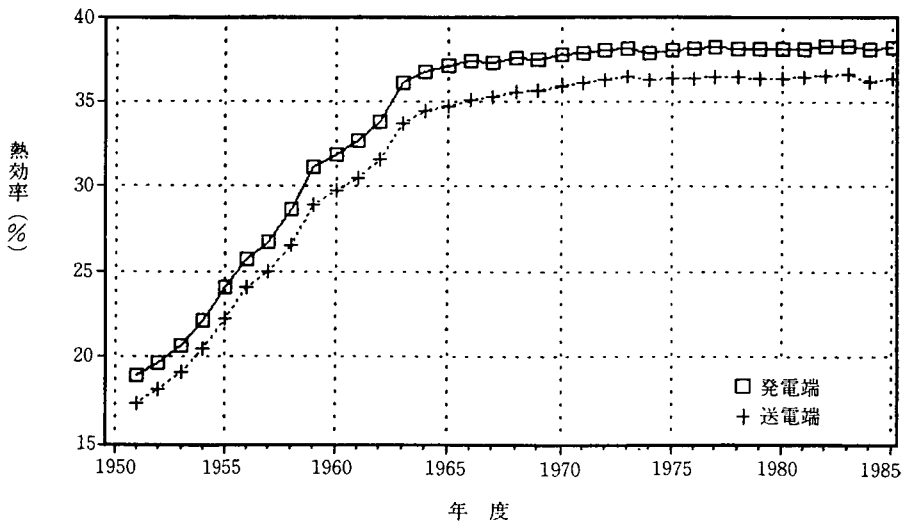


図 2.1 STE (9電力) の変遷

率の低下の3つが考えられる。しかし、①については1985年度以降複合発電技術の導入、②については設備更新分の需要もあるので、今後 STE は緩やかながらも上昇していくと考えられる。

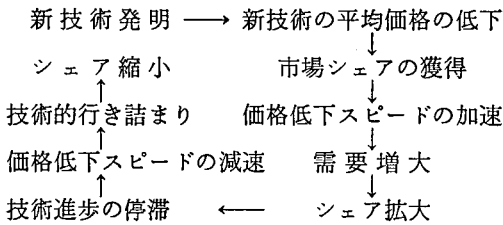
2.2 技術進歩と市場占有率^[2, 3]

複合発電が STE におよぼす影響を評価するために、将来の

① 複合発電の熱効率の改善状況

② " 導入規模

が必要となるが、これらは独立なものではなく、互いに影響しながら進展する。一般に、これまでの新技術の市場浸透は図 2.2 と、次に示す一連の過程をたどってきたと考えられる。



この過程は発電技術にも当てはまり、その実証例を我が国の水力-火力間の代替過程および火力の熱効率の改善状況に見ることができる

(図 2.3, 2.4)。そしてこれらの変化は、次に示すマーケットシェア関数 (Market Share Function, MSF) および技術進歩関数 (Technology Progress Function, TPF) で表される。

● マーケットシェア関数 (MSF)

マーケットシェア関数は、図 2.2 に示すような、技術の代替過程において時間と共に変化する新技術の市場シェアを、次の関数で表したものである。

$$MS_a(t) = \frac{1}{1+(h/(t-t_i))^r} \quad (t > t_i) \tag{2.2}$$

$$= 0 \quad (t \leq t_i)$$

但し、

$MS_a(t)$: a 技術の、t 年度におけるマーケットシェア

t_i : a 技術の導入年度

h : 総量で 50% のマーケットシェアを獲得するのに要する年数

r : シェア獲得の変化の仕方を表すパラメータ

h はその技術市場における代替の弾力性と密接に関係しており、巨額な設備投資を必要とす

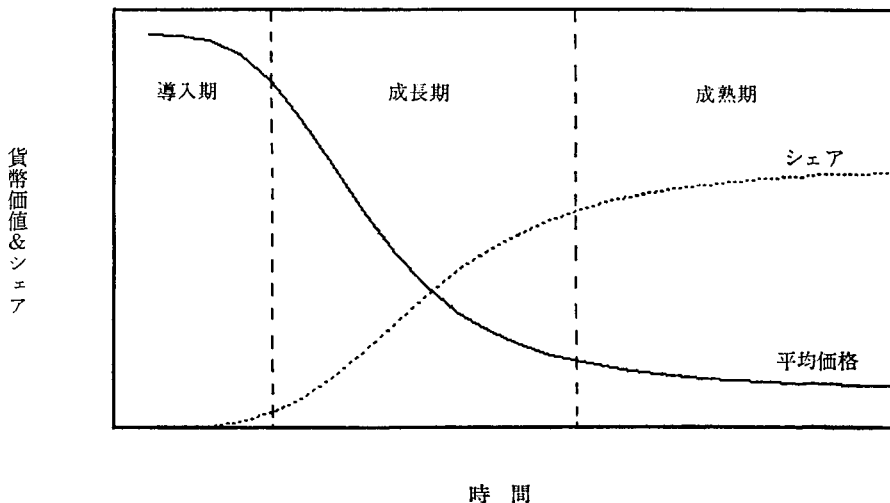


図 2.2 新技術の市場浸透過程

る発電技術の場合、他の市場と比べて大きい値を示す ($h=15\sim 25$ 年)。

●技術進歩関数 (TPF)

技術進歩関数は、新技術の技術進歩を時間の関数として表したもので、ここではベストプラントの熱効率の改善を進歩の指標とする。ベストプラントは、設備を運開年度別に分けたときに、各年度で熱効率が最大であるものを指す。その熱効率は、過去の実績から、一定値に向か

ってその差が指数関数的に減少しながら改善していく関数で表される。ここで、一定値はその技術の最終到達熱効率と考えることができる。

$$TE_a(t) = TE_{af} \cdot (1 - \exp(-\alpha t + \beta)) \quad (2.3)$$

但し、

$TE_a(t)$: a 技術の t 年度における熱効率

TE_{af} : a 技術の最終到達熱効率

α, β : 技術進歩を表すパラメータ

(2.2) 式および (2.3) 式を用いて回帰を行っ

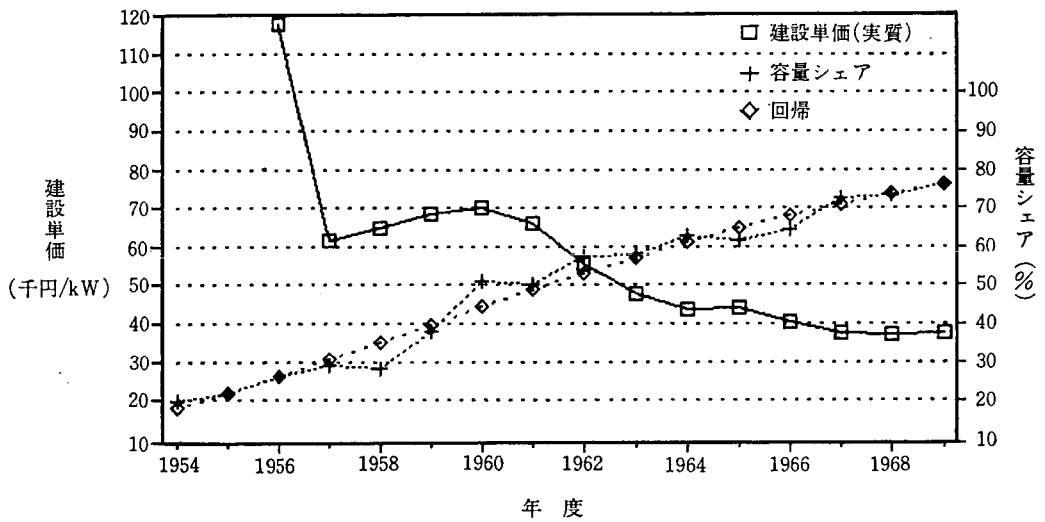


図 2.3 火力の建設単価と容量シェア

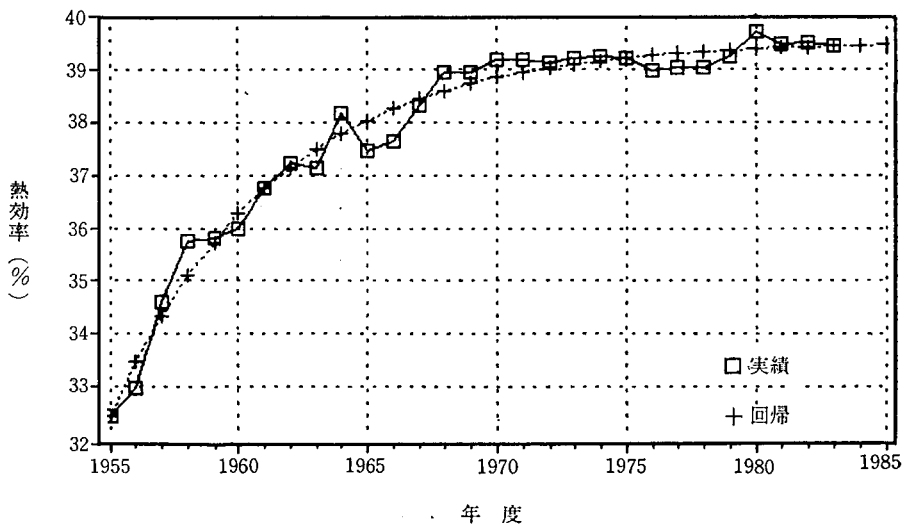


図 2.4 火力の熱効率改善状況

た結果を表 2.1 および図 2.3, 2.4 に示す。予測の際、TPF について在来型技術にはこの値を、複合発電には現状と推測される最終到達熱効率から決定した値を用いた。

表 2.1 MSF と TPF のパラメータの回帰結果

MSF(R ² =0.974)	r=4.044, h=23.26
TPF(R ² =0.976)	TE _{nr} =39.5227 α=-0.1556, β=302.6

2.3 評価モデルの概要

評価モデルの概要を表 2.2 に示す。また、計算手順を図 2.5 に示す。

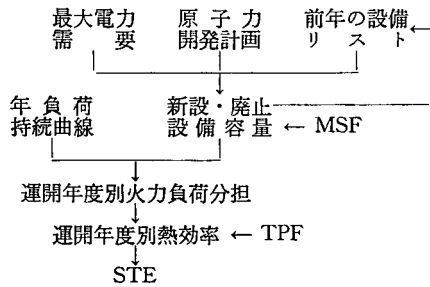


図 2.5 計算手順

ある年度の STE を求めるために必要なパラメータには次のようなものが考えられる。

〔設備面〕

- その年度に新設する設備の容量と熱効率
- " 廃止する設備の容量と熱効率
- その他の既存設備の容量と熱効率

〔運用面〕

- 各設備の負担分担（利用率）
- " 負荷追従による熱効率の低下割合

これらのパラメータは次式で関係付けられる。

$$\begin{aligned}
 STE(t) &= \frac{\sum_{i=t-DY}^t (TE_i \cdot GE_i)}{\sum_{i=t-DY}^t GE_i} \\
 &= \frac{\sum_{i=t-DY}^t (TE_i \cdot CP_i \cdot UR_i)}{\sum_{i=t-DY}^t (CP_i \cdot UR_i)} \\
 CP_t &= CP_{nt} + CP_{ct} \\
 TE_t &= TE(i) \cdot (1 - X(UR_i)) \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

但し、

表 2.2 評価モデルの概要

設備面	発電形式	火力と原子力の2種類
	火力技術	在来型と新技術の2種類 在来型：燃料（石油、石炭、LNG等）による区別をせず一括して扱う 新技術：複合発電（LNG・石炭ガス化）
	設備新設	各年の最大電力需要を満たすように設備を新設（火力＝全容量－原子力） 毎年運開する火力設備は在来型・新技術ともにその時点で熱効率が最高の「ベストプラント」
	設備廃止	耐用年数一定でそれを過ぎると即時廃止
需給面	既設設備	運開年度別に容量を合計、熱効率を発電量で加重平均したものをを用いる
	電力需要	年負荷持続曲線（ロードデュレーションカーブ）を階段状に近似
	負荷変動	年負荷持続曲線をピーク部分が先鋭化するように変化させて負荷率の低下を反映
技術面	運用形態	原子力はベース対応、火力はピーク・ミドル対応で利用率に応じて熱効率が変化 新しい設備から優先的に運転 計画・計画外停止分を除いた利用率上限の枠内で運用 火力：ピーク時フル稼働 原子力：年間を通して均等に停止
	技術代替	複合発電の熱効率の改善状況を「技術進歩関数」で表す 全火力容量中の複合発電のシェアを「マーケットシェア関数」で表す

STE(*t*): *t* 年度のシステム熱効率

DY: 耐用年数

TE_{*i*}: *i* 年度に運開した設備の熱効率

GE_{*i*}: " 発電量

UR_{*i*}: " 利用率

CP_{*t*}: *t* 年度の火力新設容量

CP_{*nt*}: " 在来型新設容量

CP_{*ct*}: " 複合発電新設容量

TE(*i*): 技術進歩関数

X(UR_{*i*}): 利用率による熱効率の低下割合

ここで新設容量 CP_{*t*} は、総設備容量（予備力を考慮しないので、最大電力需要に等しい）と廃止容量の和から原子力の容量を差し引いたものとして表される。

$$CP_t = TCP_{t-1} \cdot r + RCP_t - ACP_{t-1} \cdot r_a \quad (2.5)$$

但し、

TCP_{*t-1*}: *t-1* 年度の総設備容量

RCP_{*t*}: *t* 年度の火力廃止容量

ACP_{*t-1*}: *t-1* 年度の原子力設備容量

r: 最大電力需要の伸び率

r_a: 原子力容量の伸び率

廃止のスケジューリングには、

- ① 新設容量の一定の割合の容量だけ廃止
- ② 過去の廃止容量トレンドの利用
- ③ 耐用年数を一定の値に決める

などの方法があるが、寿命延伸の効果を調べるために、このモデルでは③の方法を採用した。

なお、新設容量のうち、複合発電の容量 CP_{*ct*} は、次式のように総容量中の複合発電のシェアが(2.2)式で与えられる値になるように決定される。

$$CP_{ct} = MS(t) \cdot TCP_t - MS(t-1) \cdot TCP_{t-1} \quad (2.6)$$

但し、

MS(*t*): マーケットシェア関数

新設設備の熱効率は、その年度中に新設される設備について共通で、在来型・複合発電ともに(2.3)式を用いて決定される。既存設備も運開年度別にまとめて扱う。

負荷分担は以下のようにして決める。負荷持続曲線から、ベース電源の原子力分を差し引き、火力の負荷時間帯別の需要を決定する。

$$D_{it} = DT_{it} - ACP_t \cdot AUR \quad (2.7)$$

但し、

D_{*it*}: *t* 年度, *i* 時間帯の火力需要

DT_{*it*}: *t* 年度, *i* 時間帯の総需要

AUR: 原子力平均利用率

次に、火力設備の運開年度別利用率 UR_{*i*} を決定する。決定の仕方は省略するが、考え方は、供給不足を生じないようにしながら、利用率制約のもと、できるだけ新しい設備を使用する、ということである。

実際には、各設備の熱効率は、定格値より低い値 TE_{*i*} を示す。気候・燃料の質・運用状況などの違いが原因として考えられるが、このモデルでは、熱効率の低下は利用率にのみ依存するとする。利用率による熱効率の低下割合 X(UR_{*i*}) を、内山^[4]の報告に従い、3次式で回帰した関数で推計し、各設備の実際の熱効率とする。

$$X(UR_i) = a_3 \cdot UR_i^3 + a_2 \cdot UR_i^2 + a_1 \cdot UR_i + a_0 \quad (2.8)$$

$$\begin{pmatrix} a_0 = -0.1590 \\ a_1 = 0.4695 \\ a_2 = -0.4890 \\ a_3 = 0.1785 \end{pmatrix}$$

3. 結 果

3.1 システム熱効率の予測

予測を行う前に、予測期間と期間の等しい過去 30 年間（1955～85 年度）についてシミュレーションを行い、計算値と実績値を比較した（図 3.1）。その結果、差は初年度を除いて±1 ポイントの範囲に入っており、特に STE の変化が小さい昭和 40 年度以降は ±0.4 ポイント以下と小さく、モデルの信頼性を確認できた。

予測は表 3.1 に示す基準ケースで計算し、その値をベースに感度解析を行った。基準ケース

として用いた値のうち、需要と容量の平均伸び率は長期電力需給見通しから、負荷持続曲線は 1981 年度の実績から引用した。

基準ケースと、比較対象として複合発電を全く導入しないケースの結果を図 3.2 に示す。また、このときの設備構成を図 3.3 に示す。

基準ケースでは、複合発電の導入に伴い、STE は堅調に、S 字型を描くように増加し、2015 年度末時点で 42.6% まで達する。この値は非導入ケースに比べて 4.2 ポイントも高く、複合発電の導入効果の大きさを表している。一方、非導入ケースでは、STE は増加するどこ

表 3.1 STE 予測における基準ケース

基準年度	1985年度	負荷持続曲線								
予測年度	2015年度	時間帯	1(ピーク)	2	3	4	5	6	7	8
新技術導入年度	1985年度	時間 (%)	0	3.43	17.2	31.1	47.7	64.4	82.2	100
設備耐用年数	30年	負荷 (%)	100	90.6	78.0	71.5	64.1	55.8	48.9	41.9
年負荷率減少率	0.15%/年	火力全容量中の複合発電シェア (%)								
火力利用率上限	70%	年度	85	95	05	15				
原子力平均利用率	75%	シェア	0.0	5.0	41.0	76.7				
基準年度の原子力シェア	22%	ベストプラントの定格送電端熱効率 (%)								
需要と容量の平均伸び率 (%)		年度	85	95	05	15				
期 間	95/85 00/95 15/00	在来型	39.5	39.5	39.5	39.5				
最大	2.9 2.6 2.0	新技術	42.0	43.3	44.1	44.5				
原子力	5.2 5.2 4.2									

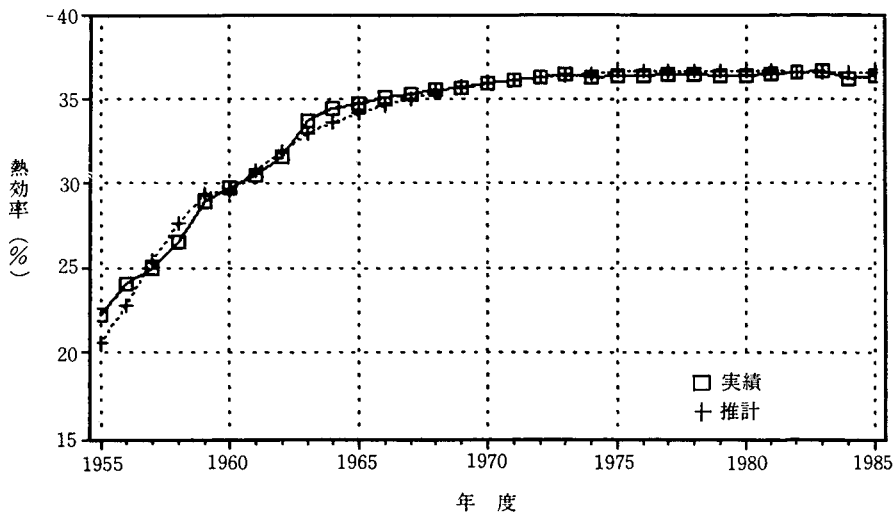


図 3.1 過去の実績による評価モデルの検証

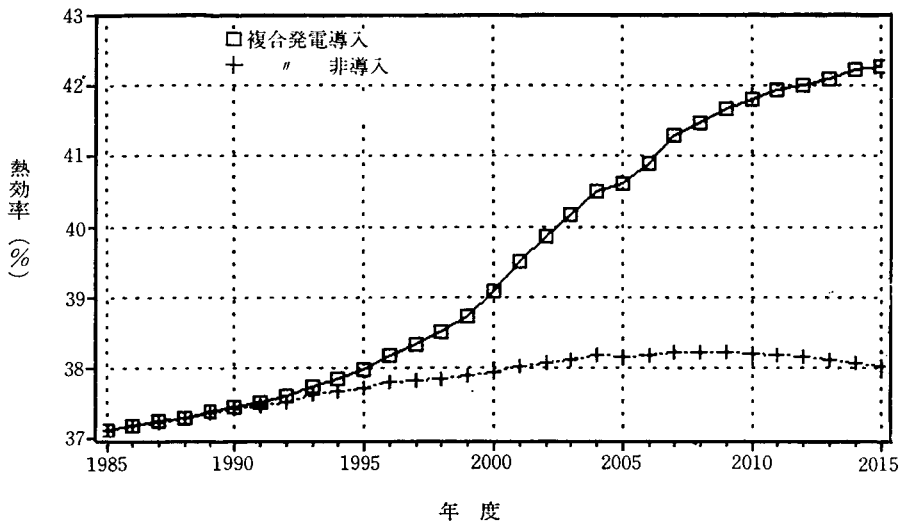


図 3.2 STE 予測結果 (基準ケース)

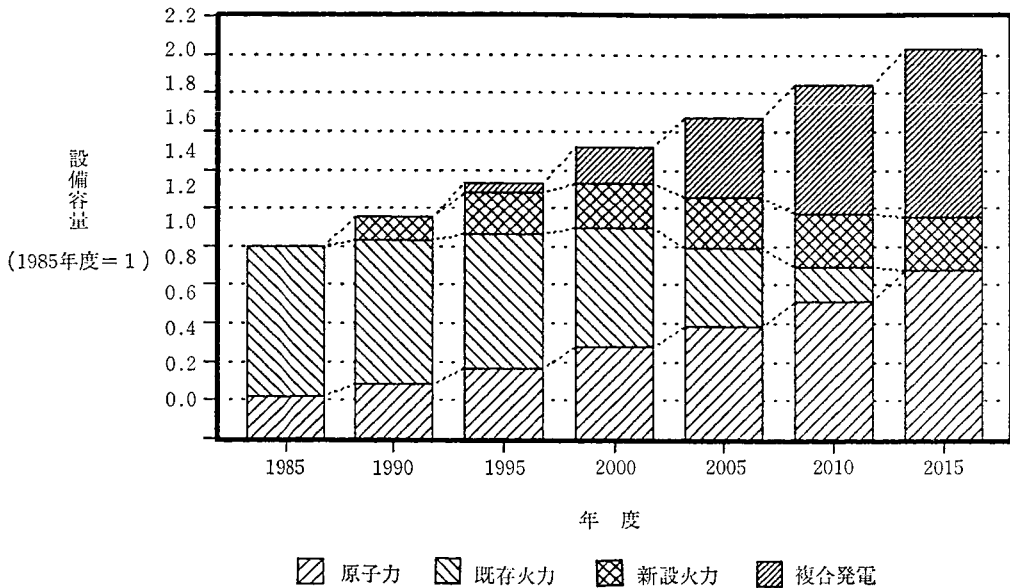


図 3.3 基準ケースの設備構成

ろか、逆に負荷率の低下により、後半わずかながら低下する。

3.2 感度解析

全部で7ケースについて感度解析を行った。このうち、③、⑤、⑥は火力技術そのものに関わる内的要因で、その他は、電力需要や電源構成に係わる外的要因であるといえる。

結果を表3.2に要約する。例として、最大電

力伸率・利用率上限・耐用年数を変えた場合のグラフを図3.4~3.7に示す。

① 最大電力需要を変えた場合

最大電力需要の伸び率が高いほど STE は高いという傾向がみられる。これは火力の新規設備需要が増加し、その結果複合発電の導入が促進されるためである。もう一つの特徴として、ケース間の差が予測期間の前半 (~2000) 大き

表 3.2 感度解析の結果

変化させるパラメータ	パラメータとSTEの相関	STEの変化の大きさ	特徴
最大電力需要	+	中	基準との差は前半広がり、後半に縮まる
原子力容量	-	中	最大電力需要とはほぼ同じ動向
利用率上限	+	大	全期間にわたって一様に変化、即効性あり
年負荷率	0	極小	負荷率改善の影響なし
耐用年数	-	中	25年と30年ではほとんど違いなし
最終到達熱効率	+	大	後半になるほど影響大
50% シェア達成期間	-	大	達成が遅れた分だけ STE の上昇も遅くなる

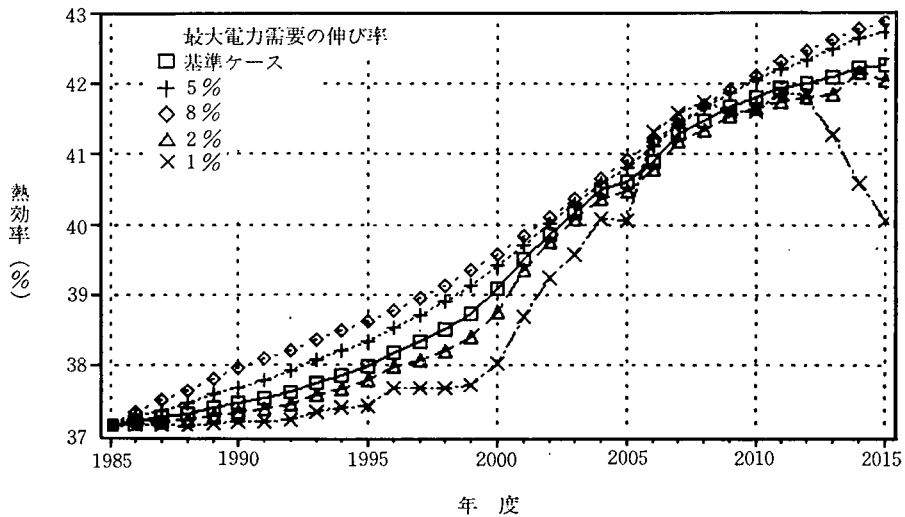


図 3.4 最大電力の伸び率を変えた場合

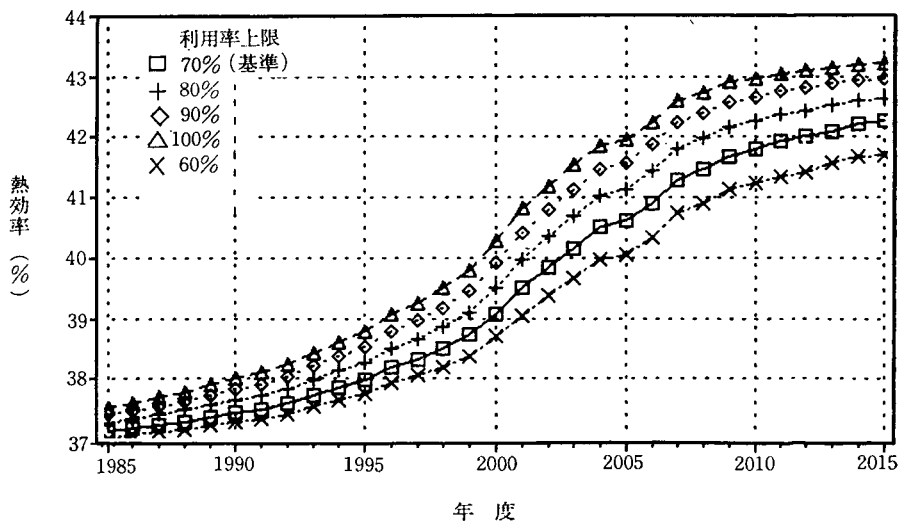
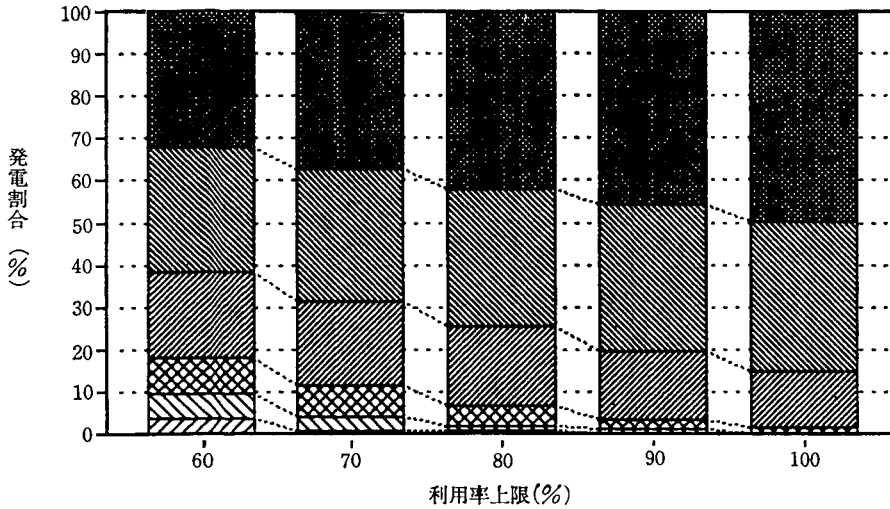


図 3.5 利用率上限を変えた場合



発電所の余命(年) 0-4 5-9 10-14 15-19 20-24 25-29

図 3.6 利用率上限を変えた場合の発電割合

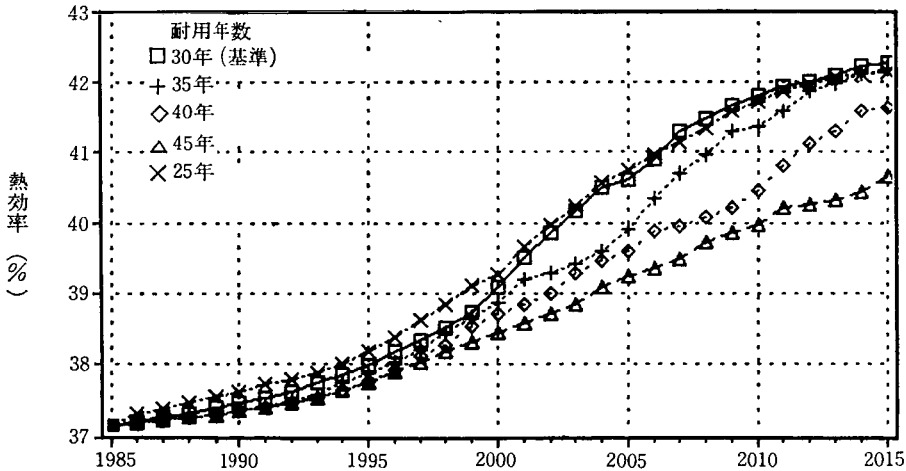


図 3.7 耐用年数を変えた場合

く後半に縮まっていることがあげられる(図 3.4)。

② 原子力設備容量を変えた場合

本質的には①と同じなので、同様の变化をする。しかし变化の仕方が若干違うため、①ほど前半の開きは大きくない。

③ 利用率上限を変えた場合

利用率上限が大きいほど、STE は大きい(図

3.5)。この理由は、図 3.6 (2015 年度の発電量の割合を、発電所の余命で 5 年毎に分けた集団についてプロットしたもの) からわかるように、利用率上限が大きいほど、熱効率の高い、新しい設備をより有効に使用することができるためである。

感度解析の他の結果と比較すると、利用率上限の改善(すなわち、定期点検期間の短縮およ

び計画外停止の減少)が、最も早急に STE を改善する方法であることがわかる。

④ 年負荷率を変えた場合

将来予想される範囲でパラメータを変えた場合、STE はほとんど変化しない。これは、例えば年負荷率が低下しても、新しい設備は優先的に使用されるので、ほとんどその影響を受けず、システム全体から見て、熱効率の低い、古い設備を使用しないで済むプラス効果と、利用率の低下による熱効率の低下というマイナス効果が相殺した結果である、と言えよう。逆に負荷率が改善した場合にも、同様のことが言える。

⑤ 最終到達熱効率を変えた場合

最終到達熱効率は、究極的に達成し得る熱効率であるので、もっぱら技術進歩に依存するものである。これを変えた場合、複合発電の割合が高くなる後半ほど影響が大きい。定量的にみると、最終到達熱効率が2ポイント上昇すると2015年度時点で STE は約 1.3 ポイント改善することがわかる。

⑥ 耐用年数を変えた場合

耐用年数が長いほど設備の更新が遅くなるため、STE は小さくなるのは明らかである。しかし、25年と30年では全期間にわたってほとんど差がみられない(図 3.7)。このことは将来、設備の寿命延伸を含めた更新スケジュールを組む際に重要である。

⑦ 50% シェア達成期間を変えた場合

50% シェア達成期間は、全火力容量中に占める複合発電の割合が、導入後から 50% に達するまでに要する期間で、複合発電の導入ペースを表すものである。これが長いほど複合発電の導入が遅くなり、STE は小さくなる。特に、長くした場合の影響が大きく、50% シェア達

成が遅くなると、等しい熱効率に到達するまで同程度の期間を要することがわかった。

4. おわりに

本研究は、複合発電の導入が将来のシステム熱効率に与える影響を分析するために、現存のシステムを次の2点、

- ① 原子力開発
- ② 年負荷率の変化

に着目しながら簡略的にモデル化し、我が国の電源構成に適用したものである。その結果、

- 今後、複合発電の導入なくして、STE の現状からの飛躍的な向上は望めない。
- STE を改善するために重要な項目として、
 - ① 各設備の時間稼働率の改善
 - ② 発電効率改善のための技術開発
 - ③ 複合発電導入の積極的な推進
 があげられる。

● 年負荷率の変化が STE に与える影響は小さい。
ということが明らかになった。

一般に、モデル化については常に現実との整合性が問題になる。このモデルは、過去の実績との比較から見る限り、第一段階としては信頼できるモデルであるといえよう。また、運用まで含めたシステム熱効率予測モデルとしては他に例がなく、その意味でも有用であろう。

今後の研究の発展方向について考察する。モデル自体では、より現実的なものに近づけるために、火力設備を燃料別、規模別へ拡張することが最も重要である。モデルの応用では、これを電源構成モデルとリンクして、設備の寿命延伸や最適廃止スケジュールの決定を含め、システム熱効率の改善による経済効果を、将来の電源計画に反映することである。

(注)

- 1) ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせることにより、発電設備全体の熱効率の向上をはかる火力発電。
- 2) 次式に示す総発電電力量と総投入熱量の比で表される従来の平均熱効率とは異なる。

$$\begin{aligned} \text{平均熱効率} &= \frac{860 \times \text{総発電電力量 (MWh)}}{\text{総投入熱量 (10}^9 \text{ Kcal)}} \\ &= \frac{\sum_i GE_i}{\sum_i (GE_i/TE_i)} \end{aligned}$$

平均熱効率は STE より若干低い値を示し、その差は基準ケースでマイナス 0.1~0.2 ポイントとなる。

ntries] Thch. Fore. and Soc. Change, 28, p. 335-350, 1985.

[2] DOE [Solar Energy Research and Development: Program Balance] A. 2, p. X4-12, 1978.

[3] R. J. Condap [Market Penetration of Energy Supply Technologies] 1980.

[4] 内山洋司「新エネルギー技術の発電効率と建設費の推定方法」電力中央研究所報告書 582005

参考文献

- [1] A. Pouris [Forecasting System Thermal Efficiencies in Technology Importing Cou-

(ながた ゆたか
うちやま ようじ
経済部 エネルギー研究室)

付 録

●1985 年度火力発電所給電実績 (9 電力)

運開年度	設備容量 (%) [10 ³ kW]	発電電力量 (%) [10 ³ kWh]	年度平均設備 利用率 [%]	年度平均送電端 熱効率 [%]
1955	132 (0.16)	129,692 (0.05)	11.19	25.64
1956	225 (0.28)	0 (0)	0	—
1957	550 (0.69)	5,775 (0)	0.12	28.72
1958	422 (0.53)	158,507 (0.06)	4.29	32.82
1959	1,576 (1.96)	1,766,492 (0.62)	12.76	32.39
1960	670 (0.84)	1,024,219 (0.36)	17.45	33.76
1961	275 (0.34)	703,457 (0.25)	29.20	31.62
1962	657 (0.82)	1,401,969 (0.49)	24.36	33.82
1963	2,286 (2.85)	3,035,808 (1.06)	15.12	34.42
1964	1,126 (1.40)	3,814,606 (1.34)	38.67	34.93
1965	687 (0.86)	2,346,148 (0.82)	38.98	34.09
1966	3,027 (3.77)	9,593,847 (3.36)	36.18	35.40
1967	156 (0.19)	0 (0)	0	—
1968	645 (0.80)	1,892,809 (0.66)	33.50	35.13
1969	1,237 (1.54)	3,713,316 (1.30)	34.27	35.47
1970	3,240 (4.04)	11,924,683 (4.17)	42.01	36.40
1971	5,570 (6.94)	16,675,883 (5.84)	34.08	37.35
1972	5,300 (6.61)	18,686,060 (6.54)	40.25	36.23
1973	3,756 (4.68)	6,804,797 (2.38)	20.68	36.07
1974	5,900 (7.35)	18,844,819 (6.60)	36.46	37.11
1975	950 (1.18)	4,209,127 (1.47)	50.44	36.97
1976	4,550 (5.67)	21,217,421 (7.43)	53.23	36.81
1977	7,237 (9.02)	29,605,440(10.4)	46.70	37.13
1978	3,410 (4.25)	14,622,568 (5.12)	48.95	35.85
1979	4,575 (5.70)	21,419,556 (7.50)	53.30	36.42
1980	3,125 (3.89)	10,437,388 (3.65)	38.13	36.10
1981	3,056 (3.81)	15,301,635 (5.36)	57.16	37.21
1982	2,312 (2.88)	8,272,673 (2.90)	40.85	35.02
1983	4,831 (6.07)	26,078,887 (9.13)	61.46	37.18
1984	5,361 (6.68)	21,229,294 (7.43)	45.20	35.74
1985	3,395 (4.23)	10,810,723 (3.78)	54.50	39.29
総 計	80,239 (100)	285,727,599 (100)	40.62	36.51