原子力発電所と電力系統の最適運用計画

(京都大学原子エネルギー研究所) 星野 力

1940年代、物理学者の造り出した魔法の原子炉は、30年を経たいま「発電工学」の教科書の一章に吸収されようとしている。原子力発電所が多くなるにつれて、電力系統全体の最適運用計画と原子炉の燃料サイクル計画をいかに統一的に扱うべきかが問われている。まず、電力系統経済運用の予備知識と近年のアメリカの開発成果を紹介し、筆者の考えをつけ加える。

1. はじめに

軽水型発電用原子炉では、炉心の運転をするうえで利用可能ないくつかの自由度がある。

- (1) 燃料の運用(Fuel Management): 燃えた燃料の取出し方、新しい燃料を含めて燃料集合体の炉心内の再配置をうまく行なって、炉心出力分布と反応度を制御する自由度。
- (2) 吸収材の運用(Absorber Management): 制御材などの吸収物質によって、炉心の出力分布と反応度を制御する自由度。
- (3) 冷却材の運用(Coolant Management): 冷却材の流量や炉心入口温度を制御し、負の反応度係数を利用して、炉心の出力またはプラントの熱効率と炉心反応度を制御する自由度。

これらの自由度は、種々の物理的工学的制限、例えば臨界を保つための反応度の下限、停止余裕を保つための局所的反応度の上限、冶金学的な燃焼度の上限、熱工学的制限値、例えば限界熱流束比の下限などを満たす範囲内で利用されることはいうまでもない。

さて、これらの自由度を利用して最適な炉の運用方法を求めることは、従来から理論と実際上の興味を持たれて来たテーマである。1960年代以来、炉を他のシステムとは切り離されたものとして扱い、取出し燃料の燃焼度を最大にする制御棒の操作計画や、燃料費を最小にする燃料交換計画が研究されて来た。この初期の研究では、炉の取扱いも少数領域モデルなどの簡単なもので、多段決定過程としての理論的興味が主であった。

1970年代の商業化時代を迎えて現実に実行可能な計画が要求され、炉のモデルも各燃料集合体ごとに取り扱う粗メッシュ拡散モデル、制約条件も実際の炉工学

的制限条件を課した研究が主流となってきた。

このように炉の取扱いがより現実的かつ詳細になってきている一方、電力系統中に原子力の占める比重が大きくなるにつれ、系統中にある発電所として系統の運用計画との関連はどうなるべきか、という問題が意識されて当然であろう。

そもそも電力系統における計画の目的は、種々の制約を満たしつつ需要に応える電力を、安定かつ経済的に供給する方策を立てることである。近年この問題を難しくしているのは、需要の急増、電源構成の多様化、燃料や建設費の急増、個々のシステムに個有の問題が多いこと、運転上の新しい制約、などである。

問題を時間スケールに応じて3つに分類することが普通行われている*。

- (1) 短期(数週間): 日々の運転であって、経済負荷配分、系統間電力融通、起動停止などを対象とする。
- (2) 中期(数年): 発電所や系統を与えられたものとし、原子力発電所の燃料管理、運転計画、定期検査計画、原子力と水力の経済運用、燃料需要予測などが対象となる。
- (3) 長期(数10年): 発電所の建設と廃止の計画、送電系統建設計画、燃料需要、コスト予測などが対象となる。

系統の経済運用上、原子力特有の問題は燃料サイクルとの関係で、主として(2)の中期的局面に現れる。ま

Operation Strategies of Nuclear Power Stations and Electrical Power System, Tsutomu HOSHINO.

(1976年 9月27日 受理)

* ずっと短い時間領域に属する系統安定度や信頼度制御の問題はここでは除外する。

た、中期の計画は重要なコスト計算ルーチンとして長期の計画中に含まれているべきものである。

II. 経済負荷配分の基礎⁽¹⁾

まず、経済負荷配分の基礎理論を知らねばならない。電力系統における経済負荷配分(ELD)とは、需要を満たす電力を複数の電源から供給するとき、最も発電費(燃料費にほぼ等しい)が少なくなるような負荷の配分方法、すなわち各発電ユニットの出力を定めることである。一般に資源割り当て問題といわれるものの一種である。

いま、ユニット i の出力 P_i 、燃料費を $C_i(P_i)$ とすると、

$$\text{全系統発電費} = \sum_i C_i(P_i)$$

を、需給バランスの条件

$$\text{全負荷電力} = \sum_i P_i$$

の下で最小にせよという問題である。周知のように、ラグランジュ乗数 λ を用いて

$$\lambda = \frac{dC_1}{dP_1} = \frac{dC_2}{dP_2} = \dots = \frac{dC_i}{dP_i} = \dots = \frac{dC_j}{dP_j}$$

となる。ここで dC_i/dP_i は増分燃料費と呼ばれる。要するに需要を満たす供給の組合せのうち、増分燃料費がすべてのユニットについて等しくなるように配分すればよい。これを等増分燃料費則という。

実際には、各ユニットの出力に上下限がある。これを不等式制約として考えてもよいが、もう一つの方法は、この上下限を超えると高額のペナルティ・コストを加えて、範囲を逸脱しないようにすることである。

燃料費 $= C_i'(P_i) = C_i(P_i) + \text{ペナルティ・コスト}$
こうすると、第1図からもわかるように、出力配分は上下限に固定されると考えてよい。

もし増分燃料費が一定値になる第2図のような時(また増分燃料費の変域が重ならない時)、No.1, No.3, No.2のように、安い方から順次ゼロから全出力に持ってゆけばよい。これを優先順位法という。

等増分燃料費則
による負荷配分
第1図

優先順位法に
よる負荷配分
第2図

直観的にはこれは自明であろう。増分費が他のユニットより高いユニットが稼働していれば、それを停止してより安いユニットを稼働させることにより、全体のコストは確かに減少するし、これを続ければすべてのユニットの増分費が等しくなるところに落ち着くであろう。これは経済学でいう完全競走下における生産価格の均衡に相当し、増分費は限界費用にあたる。優先順位法も、次のように理解できる。ある品物の価格が店 A, B, C, ……によって、 $C_A < C_B < C_C < \dots$ のようだとすれば、まずA店で買い、売り切れれば次のB店へゆき、売り切れればC店へ……これを必要量に達するまで続ければ最も経済的な買い方になる。

さて、いままでは各瞬間ごとの話であるが、ある期間にわたって第3図(a)のように負荷が変動する時はどうなるだろうか。もしすべてのユニットが火力であれば、燃料費はその瞬間の出力の関数であり、各瞬間の燃料費の積分がある期間の発電費になるから、各瞬間ごとにこの負荷配分則を実行することにより、全期間にわたっても最適になることは直観的に予想されるし、また証明も可能である。(第3図(b))

(a) 負荷変動曲線

(b) 負荷持続曲線
(系統負荷を時間方向へ積算したもの)
H1: 自流水力
H2: 貯水式水力
F1: ベース用火
F2: ミドル用火
P: ピーク用火・火力
N: 原子力

第3図

III. 原子力に伴う問題

ところが、ある瞬間にある出力を選択することが後に影響を与える場合がある。例えば貯水量に限りのある調整池をもつ水力発電所では、ある時期に水を使いすぎると後で困ることもありうる。原子力発電所も同様で、先のことを考えずに負荷配分をやってゆくと、すでに決まっている次回以降の燃料交換スケジュールや、調達済み燃料の量や濃縮度と矛盾してしまいかね

ない。核燃料は炉内に数年間滞在し、過去の出力の履歴は燃料の燃え方と将来の出力を規定する。この時間方向の結合のゆえに、原子力の燃料費は火力のそれとは違ってある瞬間の出力の関数として定義することができない。

原子力発電費は、ある期間を通じての一まとめの運用方策に対して

発電費(円/kWh)=

$\frac{\text{期間中に生じた運転のための支出(期間始点へ換算)}}{\text{期間中に発電した総電力量(期間始点へ換算)}}$

のように計算されるのが普通である。運用方策は、これこそ求めようとするものであるから、原子力発電費の最適化のためには、なんらかの繰返し計算が要求されるのである。

いまでもこの問題が表面に出て来なかった理由は、第3図(b)を見てもわかるように、原子力は負荷曲線の基底部分を占めているからである。これは増分費が安く優先順位が高いことによるが、燃料などの信頼性への懸念から、なるべくそと出力を変動させずに運転されてきたことにもよる。

しかし、いつまでもこれでよい訳ではない。原子力が系統設備容量のうちに占める率が大きくなってくると、軽負荷時(第3図(a)の谷の部分)には原子力ユニットのある部分は日負荷変動への追従、すなわち夜間の運転停止をせねばならなくなるだろう。日本では揚水発電所の適地がアメリカなどより恵まれている方だから、揚水ユニットを原子力と歩調を合わせて建設してゆけば、第3図(a)の谷の部分はならされて、負荷追従の時期は先へ延びるだろう。しかし、早晚原子力の比重が増すかぎり負荷追従は避けられない。すると原子力の負荷率(=発電電力量/定格電力量)、ひいては炉心の燃焼や燃料の運用計画も系統全体の計画の一部分として考えなければならない。

ところで、基底負荷運転をしている現在はこういう問題解決へのニーズはないのだろうか。基底負荷時代はまた低信頼度時代であって、発電所の予期しない計画外停止がひんばんに起り、一定期間一定出力という前提自身がこわれがちなのが現状であろう。また負荷曲線も生活水準の向上や、産業の発展とともに山と谷の比が大きくなってきている。また、コストも経済環境の変動につれて、予期しないエスカレーションが生じうる。こういう不確定な要素が多い環境下で適切な意志決定を行うには、コストや系統信頼度の確率的な評価が大切になる。そのためには、まず近年実用段階に入ってきた、確率的な考慮をとり入れた負荷配分の

理論を理解せねばならない。

IV. 負荷配分の確率的シミュレーション⁽²⁾

確率的現象である計画外停止の効果は、従来は(停止中のユニットの容量)×(計画外停止の確率)の分だけ第3図(b)の負荷持続曲線上で発電容量が減るとして平均的に扱っていた。そのため順位の低い予備ユニット(ピーク負荷を担う高コストのユニット)は、実際には基底部分にある大容量ユニットの停止時には稼働するのに、平均的取扱いは稼働しないことになりうる。したがって、予備ユニットの運転を過小に評価し、系統信頼度を過大に評価し、系統発電費を過小に評価する傾向を生じる。この傾向は、とくにユニット数が少なく大容量、コストと利用率のバラツキ、停止確率、負荷変化がいずれも大きいほど著しく、近年の情勢はこれにあてはまってきている。数年にわたるモンテカルロ・シミュレーションは計算時間がかかりすぎるので、1967年 Baleriaux らにより提唱され、1971年 Booth らによって改良された確率的シミュレーション手法が有効である。

第3図(b)の負荷持続曲線は、負荷に関する累積確率分布曲線 $L(X)$ 、すなわち系統負荷 $\geq X$ である確率を表わすと解釈できる。各ユニットは、あらかじめ決められた順序 $i=1, 2, \dots, I$ によって系統に投入されると仮定すると、一番優先度の高いユニット1の発電量の期待値は、

$$E_1 = p_1 T \int_0^{b_1} L(x) dx$$

ただし、 $p_i = 1 - q_i$

q_i : ユニット i の停止確率

q_i : ユニット $1 \sim i-1$ の容量の和

b_i : ユニット $1 \sim i$ の容量

の和

T : 全期間長

ユニット2については、ユニット1が停止中か否かで2つの項が生じ、

$$E_2 = p_2 T \left[\int_{a_1}^{b_2} \{p_1 L(x) dx + q_1 L(x - MW_1)\} dx \right]$$

ただし、 MW_i : ユニット i の容量

一般に、(等価負荷) = (系統の全負荷) + (停止中の容量に等しい仮想負荷)に関する持続曲線 EL_m を定義して、次の漸化式が書ける。

$$EL_m = p_m EL_{m-1}(x) + q_m EL_{m-1}(x - MW_m)$$

$$E_m = p_m T \int_{a_m}^{b_m} EL_{m-1}(x) dx$$

これを用いて逐次各ユニットの発電量の期待値を評価できる。系統信頼度を表わすものとして LOLP (Loss of Load Probability), すなわち系統負荷が供給電力を上回る確率と, そのときの不足電力 U も評価できる。

$$LOLP = EL_N(\bar{X}), \quad \bar{X}_N: \text{全系統の容量}$$

$$U = T \int_{\bar{X}_N}^{\infty} EL_N(x) dx$$

V. ORSIM コードとその使用例

すでに述べたように, ニーズは目前にあるのだが, 日本でこの種のプランニングの開発が盛んに行われたとは到底いえない。一方アメリカでは, 1970年頃より AEC, 電力会社, 大学が Joint Systems Analysis Study Group というグループを結成して開発が進められ, 1974年にはオークリッジ国立研究所でシンポジウムが開かれて成果をとりまとめている⁽²⁾。“ORSIM”というコードはオークリッジ研究所が中心となって開発した中期的系統運用計画コードである*。原子力界ではおなじみの「アメリカ直輸入」になりそうだが, 以下 ORSIM コードの紹介をしてみよう。

ORSIM コードの目的は, 数年にわたる計画期間において, 期間の始点に換算した全系統の発電コストを最小にするような各発電ユニットの運転方策を求めることである。対象は火力, 原子力, 水力, 揚水, ピーク火力の混合した系で, 原子力ユニットの燃料交換期日を既知とし, 各ユニットの点検スケジュールと月ごとの出力配分を最適に決定し, 各ユニットの負荷率, 系統信頼度, 系統発電コストを計算する(第4図)。計算の大すじは, まず,

- (1) 全ユニットについて定期検査のための停止スケジュールを決定する。
- (2) 全期間をいくつかの小期間に分け, 各小期間ごとに各ユニットの現在換算増分発電費を推定する。

第4図 ORSIM コードの計算流れ図

- (3) 各小期間ごとに(2)の増分費に基づいて, 確率的シミュレーションによる最適負荷配分計算を行い, 各ユニットの出力の期待値を求める。

- (4) この出力配分の関数として各ユニットの増分発電費を計算し直して(3)から繰り返す。

次に各部分の説明を行う。(1)は, タービン, ボイラーの定期検査と燃料交換のための停止スケジュールで, 検査の頻度, 作業要員, 負荷曲線, 予備供給力などの制限を満たすもののうち発電費+保守費を最小にするものを, 直接探索法やダイナミック・プログラミング(D.P.)を用いて求めている。

(3)と(4)の部分は ORSIM モデルの核心をなす System Integration Model といわれるものである。(2)で推定した増分費を用いて(3)では優先順位法による経済負荷配分を行う。前述のように, 総発電電力の上限が決まっている水力と原子力は, 増分費による負荷配分からは独立に D.P. を用いて決めている。まず期間の最終時点より発電電力を変数とし, 小期間をステージとして時間と逆方向へ可能なパスを検索してゆき, 貯水量や定格出力の制限条件に引っかかるものと, 非最適な発電費を生じるパスを省いてゆく。期間の始点に達したとき全期間を通じての最適発電計画が求まったことになる。各小期間中では, より高価なユニットを置き換えるように系統に投入される。水力と原子力が混在している系では, 両者の間に生じる結合を考慮するために何回かの繰返しが必要となる。

普通なら負荷配分が終ればすべて終るのだが, 前に述べた原子力発電の増分費が運転計画そのものの関数であるから, 全期間の発電計画を最適に実現するような燃料, 吸収材, 冷却材の運用計画が樹立されねばならない。この結果, 新しい増分発電費が求まり, もしこれが初めに仮定した優先順位と異なっているようなら, 新たに(3)の手順に戻って繰返しを行うことになる。このループが収束すれば各小期間ごとに(瞬間的)増分費則による負荷配分が行われたことになり, 全期間にわたる各発電ユニットの運転および停止計画と, 系統信頼度および系統発電費が出力される。

さて, このコードは種々の運転計画の比較調査や, パラメータの効き方(感度)を調べるのに用いられる。コモソウェルス・エヂソン社における適用例を1つ紹介する⁽²⁾。

コストエスカレーションの大中小と電力需要増大の大中小の組み合わせた9通りの可能性を考える。各可

* このコードは公開されている⁽³⁾。

能性の確率分布が与えられていると、あとは ORSIM コードを用いて発電費と各発電ユニットの負荷率の確率分布を計算できる。同様な応用例として、隣接系統の揚水電力を2年契約で買うか、1年先に1年契約で買うかの決定の経済評価、原子力ユニットの運転開始時期が遅れる可能性のあるときの系統内の火力の保守計画のコストおよび系統信頼度評価が報告されている。いずれもモデルは、決定責任者が意志決定に伴う不確定要因をできるだけ明確に把握できるように助けるのが目的であって、人間に代って決断してくれる統計的決定理論のようなブラックボックスを提供するものではない。したがってこのリスク解析では、確率分布は直接意志決定責任者に提示されるのが一番よいという考え方がとられている。ある可能性が確率分布として提示されていたからには、あとで「そんなこと」は予期していなかった」といって責任ののれをすることは許されない。

Ⅶ. おわりに

ORSIM モデルは現在この方面では最も進んだものと思われるが、若干の筆者の感想を述べておこう。第4図の炉心モデルは各サイクルの発生エネルギーを入力されて増分費を出力する働きをもつが、どのような系統からの要請にも応じられる柔軟な炉心計画が可能かどうかという問題が残る。炉の制御の自由度が制約に引っかかる事態があるとすれば、いかにしてそれをモデルの中で扱うかが問題となる。

また増分発電費の定義も慎重でなければならない。原子力の場合は、各サイクルの発生電力(すなわち運転計画)に依存する多変数関数であるが、現実的にはいつも最適炉心運用が行われることを前提にして、偏微分の方角を定義しておかないと、増分発電費が不自然な値をとり、収束計算に影響を与えることが懸念される。すなわち、

増分発電費＝

$$\left[\frac{\partial [\text{全期間の発電費}(\text{各サイクル発電電力量})]}{\partial [\text{あるサイクルの発電電力量}]} \right]_{\text{最適計画上で}}$$

電力系統を考慮して最適化すると、信頼度や最適計画はこうなると一般的にいえることよのだが、大規模な系になると一般的にいえることは「解を一般的に論ずることは難しい」ということだけになってしまう。これをシステム依存性(System Dependence)といい、特定のシステムの特定の局面でまちまちの解が生じて簡単な見通しが得られにくいという意味である。もちろ

ん経験を積み重ねてゆけば見通しは広がるだろうが、それでも人間の直観的理解には限度がある。ORSIM モデル中一番システム依存性が強く生じるのは、保守定検スケジュールの部分である。また、従来から燃料交換サイクル間の結合はあまり強くないという考えの下に、平衡炉心あるいは各サイクルごとの最適化が行われていたが、これもあらためて系統負荷配分下の炉心という観点から考え直してみることが大切である。とくに、増分費は燃料サイクル間の結合の影響が強く現われるという報告がある。

もう少し丁寧に炉心を扱うモデルの1例として筆者の作製した PSMOPT モデルを紹介しておこう⁴⁾。対象は原子力1基と等価火力1基が固定負荷に連なっている系で、電力コストを最小化する。非平衡な交換パターンとそれに属する燃料集合体の本数、出力レベル、サイクル長さ、サイクル終了後の延長運転期間の長さを最適決定する。制約条件は各サイクル終期反応度、領域内燃料棒本数、新燃料装荷本数、各サイクル長、出力レベル、許容燃焼度について課せられている。出力レベルやサイクル長を固定すると、うまく線形計画問題になり、残りの変数は非線形計画法により解く。増分費も線形計画法を解くとき影のコスト(shadow price)として最適計画に沿ったものが自動的に求められる。その結果わかったことは、特定の燃料交換方式を守っていると融通がきかなくて、設計パラメータ中に含まれている余裕を生かすことができないことである。

要するに ORSIM コードにとり込めるような、簡単で使用に耐える炉心最適化モデルが作れるかどうか、またそれによって計算時間が長くなりすぎないか、が ORSIM コードの実用性の鍵のようである。

筆者はニーズを直接感じる立場にいないが、とくに理論的手法へのニーズに限ってコメントをつけ加えておく。一般に

$$(\text{最適点へ至る過程}) = (\text{実行可能解を見付ける過程}) + (\text{最適化の過程})$$

に分解できる。この種の最適化問題は、しばしば制約条件が厳しくて実行可能解が見付けにくい反面、一たん見付かると後それを最適化してもあまりゲインが得られないことがある。核燃料費が安ければますますこの傾向は強まるであろうし、また最適化する余裕があるならそれはすべて安全性への余裕として使うべきだ(したがって実行可能領域は遂には1点に縮まってしまう)という考えもある。

こうなれば第2項へのニーズはなくなり、第1項へのニーズばかりになるが、教科書を見ると第2項の理

論ばかりで役に立たない。現実には実行不能の場合でも「ほぼ実行可能」な答を出す手法が望まれている。

大規模な系をいかに取り扱いやすいサイズの問題に分割するかを指導する強力な原理の出現が望まれるが、教科書にあるシステム分解の理論はあまりに抽象的で難解であり、それでは演習問題とは見ると、たった2つの2次方程式が連立しているだけだったりしてあまりに簡単すぎる。真に大規模な系に挑戦したい人にこの電力システムプラス原子力の問題をすすめる。

見方によれば、解へ至るプロセスを厳しくリミットしている1つの要因は手法すなわち理論であろう。前に述べたアメリカの研究開発グループも、理論に興味を持つ側とニーズを持つ側によって構成されており、これを認識していることがうかがわれる。アメリカがORSIMの開発を終えたところ日本でよく聞かれた声は、「原子力は基底負荷で、したがって平衡炉心のはずで現行の××方式で十分やれる。難しい理論はお呼びでない」というものであった。しかし一説によれば、半分以上の炉がなんらかのトラブルのため予定よ

り早い目の停止を強いられており、炉心は単純な××方式からはずれているのが現実であろう。いずれにしても、原子力発電の一部が負荷追従する時代になれば、負荷率はこの中期的最適計画によって推定するほかにわけである。このようにニーズは明らかに存在するし、それを認識するしないにかかわらず、早晩なんらかの決定が要求されるであろう。そのとき意志決定の任にある人々が、できるだけリスクを科学的に把握して責任ある決定を下していただくよう望むばかりである。

— 参 考 文 献 —

- (1) 深尾 毅, 豊田淳一: “電力システムへのコンピュータの応用”, (1972年), 産業図書.
- (2) A collection of papers presented at the Nuclear Utilities Planning Methods Symposium, ORNL-TM-4443, (1974).
- (3) TURNAGE, J.C., et al.: ORNL-TM-4506, (1975); PRINCE, B.E., TURNAGE, J.C.: ORNL-TM-4507, (1975).
- (4) HOSHINO, T., TAKAHASHI, M., FUJII, Y.: CONF-750413, Vol. I, p. 115, (1975).

いっそうの研究開発と人材養成をめざす

* 内容見本呈

原子力工学シリーズ 全10巻

編集代表 関口 晃

A 5 判・上製カバー装／各巻2500～2900円

1 原子炉構造工学

宮 健三
矢川元基

原子炉の設計及び安全性に関して構造の問題はその土台であり、中心的位置を占めていることが原子力開発の発展につれて明らかとなってきた。しかしこの種の入門書は殆んど見あたらず、ここにこの分野の新進気鋭の二人の工学者によって本書が公刊されることは時宜を得たものと思われる。本書の内容は大学3, 4年を対象としているが、基礎的知識を必要とする企業・研究所の技術者にとっても有用なものとなろう。

¥2500

〈主要目次〉 1 固体力学概論 2 有限要素法概論 3 原子炉構造物の破壊現象 4 原子炉の構造設計 5 原子炉構造の高温挙動とその解析 6 原子炉構造物の製造

■ 巻別構成

② 原子炉燃料

菅野 昌義

③ 原子炉化学

内藤 奎爾

④ 放射線計測概論

関口 晃

⑤ 核融合とプラズマの制御

内田・井上

⑥ 放射線化学

田畑 米穂

⑦ 照射損傷

石野 栞

⑧ 原子力プラントの構造設計

安藤・岡林

⑨ 原子力熱工学

秋山 守

⑩ 原子炉の理論と設計

安 成弘

113 東京都文京区本郷7-3-1

東京大学出版会

振替東京6—59964 目録呈