

JAERI-M
4799

原子力・火力発電所の総合経済評価
計算コード STRATEGY-LP

1972年4月

安川 茂

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

原子力・火力発電所の総合経済評価
計算コード: STRATEGY-LP

日本原子力研究所動力炉開発管理室

安川 茂

(1972年4月3日受理)

原子力・火力発電所の系統投入に対する動態を分析する計算コードSTRATEGY-LPを開発した。その計算の目的は、系統の基本量である発生電力量、負荷率変動巾等のデータを与え、系統に投入される発電所の総資本や系統が消費する総燃料量等を最少化する条件のもとに投入設備の容量を決定するものである。以下に本コードの特徴を列記する。

- (1) 系統は原子力発電所、火力発電所よりなるものとし、最高10種類までの発電所の投入が許される。
- (2) 投入設備の容量は線型計画法の適用によつて決定するもので、その目的関数にはシステム・コスト、天然ウラン積算量、実効天然ウラン積算量、分離作業積算量の中から任意のもの1量が選択できる。
- (3) 制約条件には、(i)年度毎に投入される全設備容量を保存する条件のもとに個々の発電所の容量に上限/下限値を設ける、(ii)電力発生時間の保存、(iii)負荷率(LDC曲線)の区分化より生ずる制限、(iv)燃料(天然ウラン、原油)所要量に対する制限、(v)生成燃料(分裂性Pu, 233U等)の余剰生産量制限、(vi)システム・コスト制限、等があつて、このうち(i)~(iii)は必ず使用する。また(iv)~(vi)は選択に基づいて使用する。
- (4) 燃料所要量の計算には調達までの余裕時間、おくれ時間を取入れ、且つまた燃料処理工程における損耗量を考慮に入れている。
- (5) 最大計算年度数は100であり、設備投入量、燃料所要量、発電コスト等のシステム基本量は年度毎、発電所の種類毎、負荷率の区分毎に算出される。また、これら各量の種々の積算量が算出され出力されるようになっている。

本計算コードはFORTRAN-IVで書かれていて、使用機種はIBM-360(Model 175)である。標準的な問題を解く場合1ケース約5分の計算時間を必要とした。

Computer Code STRATEGY-LP for the Econometric
Evaluation of Nuclear & Thermal Power Generating
Installations

Shigeru YASUKAWA

Office of Power Reactor Projects, Tokai, JAERI

(Received 3 April 1972)

The computer code STRATEGY-LP has been prepared for the econometric evaluation of nuclear and thermal power stations. The code is capable of calculating the capacities of different types of power stations under the condition of minimum system power cost or fuel consumption. Features of the code are as follows.

- (1) The power generating system consists of nuclear and /or thermal power plants. The maximum number of types of station is up to ten.
- (2) The capacity of each station to be installed is determined by linear programming, in which any of the following objective functions can be chosen: system power cost, cumulative natural uranium, cumulative effective natural uranium, and cumulative separative work.
- (3) The constraints imposed on the system are (i) upper and lower limit capacities of each power plant and the total system capacity for each year, (ii) conservation of the power generating hours in the respective years, (iii) partitioning of the load duration curve for each year, (iv) upper limit of the fuel (natural uranium or crude petroleum) consumption for the system, (v) upper limit of the excess by-product fuel (fissile Pu, and ^{233}U), and (vi) system power cost.

The constraints (i)~(iii) are always used, and (iv)~(vi) are user's option.

(4) Lead and lag times as well as fuel loss are taken into consideration for calculation of the fuel inventory.

(5) The maximum number of years is 100. Main outputs with this code are capacity of each type of power plant, fuel inventory necessary for operating the system, power generating cost, etc.. They are printed out for the respective years. The accumulation of these quantities over the respective years is also possible.

The code is written in FORTRAN-IV language, and encoded for the IBM-360 (Model 75) digital computer. The time of computations is about 5 min. for a standard problem.

目 次

1	まえがき	1
2	システムのモデル化	1
3	設備容量とコスト関数	3
4	燃料インベントリ	7
4.1	インベントリ-基本量	7
4.2	燃料の積算所要量	9
5	線型計画法に対する標準形式	13
5.1	$\vec{\alpha}$ ベクトル	13
5.2	目的関数	14
5.3	制約条件	16
6	入力量	22
7	出力項目	22
8	あとがき	24
	謝 辞	25
	参 考 文 献	25
	付 録	

1 ま え が き

本年1月に発表になつた原子力発電長期計画⁽¹⁾によると、原子力発電設備計画量は昭和60年において6000~6500万kW、65年において9000~11000万kW見込まれている。この計画量は全発電設備に対してそれぞれ25~27%、30~36%を占めている。同様の推定は、昨年日本原子力産業会議⁽²⁾においてもなされ、そこでの計画量は昭和55年において2700~3000万kW、65年において10000~12000万kWとなつていて、全発電設備に占める比率はそれぞれ~16%、~39%である。上記の数値にみるように、向う10~15年のあいだに原子力発電は急激に伸長することが予測されている。

原子力発電設備の急増に加え、いまひとつ注目すべき事柄は、電源構成が複雑化することと、日負荷、年負荷の最大出力、最低出力の開きが拡大の方向にあることである。電源構成に関しては揚水式発電所、火力発電所、原子力発電所が併存して系統に投入されることになり、特に原子力発電所に関しては軽水炉、新型転換炉、^(注1)高速増殖炉による発電所の投入が具体化されているほかさらに高温ガス炉による発電所の投入も考えられていて、将来の電源構成は非常に複雑になる。

火力発電所にしろ原子力発電所にしろ、これらを発電系統に投入して電力を発生させるには多量の原油や核燃料を必要とする。原油や核燃料の資源量は無限ではなくその有効利用を計らねばならない事態が近い将来に差し迫りつつある。他方、これらの発電設備を設置するには設置の当初に巨額の資金が必要になること、ひとたび設置した設備の変更は必ずしも容易でなく、且つまた長期間にわたつて使用しなければならないこと、などからその設置にあつては設置の時期、出力規模、電源設備の構成、等の最適化を計る必要が生じてくる。

このようなことから、各種発電所の系統への最適投入を定めるための計算コードは既に国内外にいくつか発表^(3~4)されている。筆者も今までにこの種の計算コードの開発^(5~6)を試みてきているが、今回は従来の方法を一般化したSTRATEGY-LPコードの開発を試み、本報告においてこのコードの計算モデルと使用方法の説明を行なうことにした。本方法と既になされている内外の研究との関連については参考文献を引用するにとどめ、次章以降において直に計算モデル、計算式、入出力量、使用上の注意事項等の説明に入ることとする。

2 システムのモデル化

システムは電力系統のみを対象とし、系統内へ組入れられる電源設備は火力発電所と原子力発電所のみとし、揚水発電所は除外した。火力発電所、原子力発電所はそれぞれ複数ケの種類数が系統に投入されるものとする。ここでいう種類数とは、たとえば原子力発電所を例にとつて説明すると、軽水炉とか重水炉または高速炉といった原子炉の型式による分類数を指したり、

(注1) ここでは重水炉をさすものとする。

1 ま え が き

本年1月に発表になつた原子力発電長期計画⁽¹⁾によると、原子力発電設備計画量は昭和60年において6000~6500万kW、65年において9000~11000万kW見込まれている。この計画量は全発電設備に対してそれぞれ25~27%、30~36%を占めている。同様の推定は、昨年日本原子力産業会議⁽²⁾においてもなされ、そこでの計画量は昭和55年において2700~3000万kW、65年において10000~12000万kWとなつていて、全発電設備に占める比率はそれぞれ~16%、~39%である。上記の数値にみるように、向う10~15年のあいだに原子力発電は急激に伸長することが予測されている。

原子力発電設備の急増に加え、いまひとつ注目すべき事柄は、電源構成が複雑化することと、日負荷、年負荷の最大出力、最低出力の開きが拡大の方向にあることである。電源構成に関しては揚水式発電所、火力発電所、原子力発電所が併存して系統に投入されることになり、特に原子力発電所に関しては軽水炉、新型転換炉、^(注1)高速増殖炉による発電所の投入が具体化されているほかさらに高温ガス炉による発電所の投入も考えられていて、将来の電源構成は非常に複雑になる。

火力発電所にしろ原子力発電所にしろ、これらを発電系統に投入して電力を発生させるには多量の原油や核燃料を必要とする。原油や核燃料の資源量は無限ではなくその有効利用を計らねばならない事態が近い将来に差し迫りつつある。他方、これらの発電設備を設置するには設置の当初に巨額の資金が必要になること、ひとたび設置した設備の変更は必ずしも容易でなく、且つまた長期間にわたつて使用しなければならないこと、などからその設置にあつては設置の時期、出力規模、電源設備の構成、等の最適化を計る必要が生じてくる。

このようなことから、各種発電所の系統への最適投入を定めるための計算コードは既に国内外にいくつか発表^(3~4)されている。筆者も今までにこの種の計算コードの開発^(5~6)を試みてきているが、今回は従来の方法を一般化したSTRATEGY-LPコードの開発を試み、本報告においてこのコードの計算モデルと使用方法の説明を行なうことにした。本方法と既になされている内外の研究との関連については参考文献を引用するにとどめ、次章以降において直に計算モデル、計算式、入出力量、使用上の注意事項等の説明に入ることとする。

2 システムのモデル化

システムは電力系統のみを対象とし、系統内へ組入れられる電源設備は火力発電所と原子力発電所のみとし、揚水発電所は除外した。火力発電所、原子力発電所はそれぞれ複教ケの種類数が系統に投入されるものとする。ここでいう種類数とは、たとえば原子力発電所を例にとつて説明すると、軽水炉とか重水炉または高速炉といった原子炉の型式による分類数を指したり、

(注1) ここでは重水炉をさすものとする。

または同一炉型式の場合でも出力規模が50万kW, 100万kWクラスといった具合に出力規模による分類数を指したり, さらにまた使用する核燃料の相異, 例えばウラン燃料を使用するもの, プルトニウム富化ウラン燃料を使用するもの, によつて分類する種類であつたり, または上記の組合せであつたりしてよく, 場合によつては基数別の区分であつてもよいわけで, 本計算コードの使用者が適宜その定義を自ずから行なうものとしてよい。このことは火力発電所についても同様である。発電設備の種類数は計算機のメモリー制限から最大10種と定めている。

電力系統の総発電々力量, 総発電設備量は年度毎にあらかじめ定められているものとし, これら各量を外部より入力するものとする。また負荷の変動域を年負荷率曲線にまとめあげ, これをFig.1に示すように複数ヶの負荷率領域に階段状に区分化し, 年度毎に入力するものと

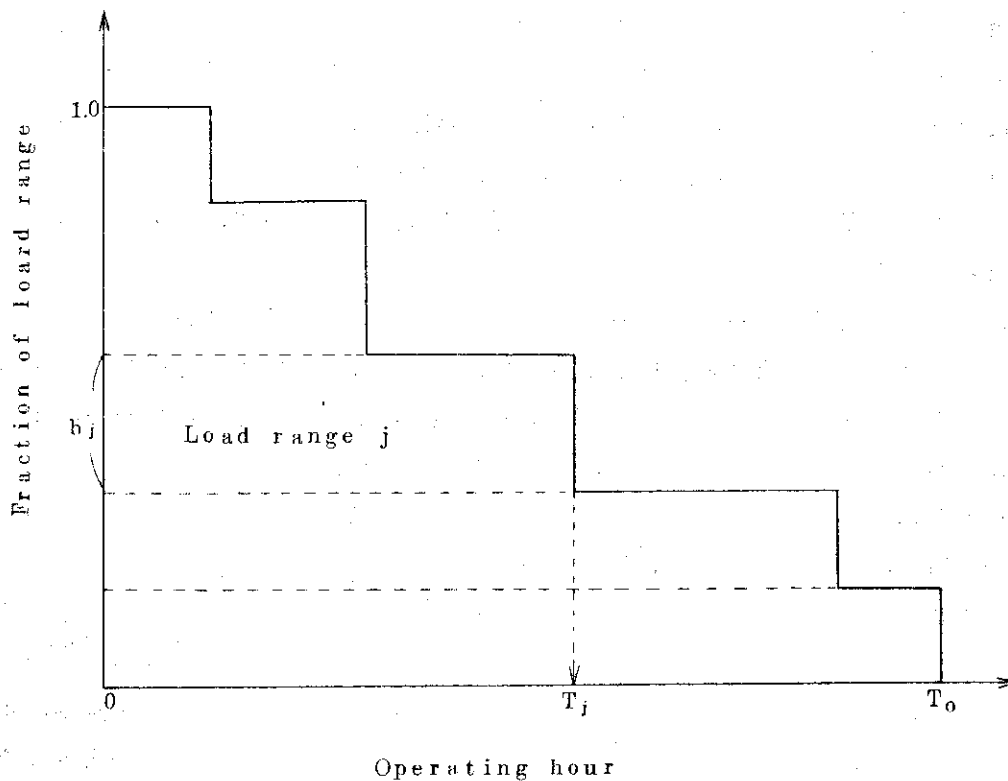


Fig.1 Load duration curve.

している。本計算コードの目的は, ひとつには電源設備の投入量を算出するものである。電源設備の投入量, 特にその新設量は年度毎に規制をうけるのが普通である。すなわち, 既に投入量が定められている年度に対しては電源設備量は変数ではなく定数になつてしまう。また投入量が未定の年度でも, 電源設備の種類毎にその投入量にある思惑がある場合がある。このような事態を反映させる一方法として新設の電源設備容量に対して年度毎, 設備の種類毎に上限容量値, 下限容量値を外部より入力して新設容量を規制するようになっている。

火力, 原子力各発電所は耐用年数間運転された後系統より除外される。発電所の耐用年数は各々に異なるのが普通であるが, 本計算コードでは定式化の複雑化を避ける為に発電所一律に一耐用年数を許すことになつている。その耐用年数は外部より入力する。発電所の耐用年数を

同一にとることは本計算コードの最大の欠点のひとつであるが、これを発電所毎に異なえるように理論を拡張することは勿論可能である。

各発電所のコスト関数はこれを資本費と燃料費+運転維持費の2項目に分け、その数値を年度毎、負荷率区分毎に別途算出評価し、コードの入力量として取扱う。資本費の償却の仕方には定率方法と定額方法の2方法があるが、本計算コードではいずれの方法も可能で、具体的には後述のパラメータ μ (θ)を調整することでこれを可能にしている。総発電コストは基準年度に現在価値換算を行なっている。

次に、個々の発電所の運転特性が必要になるが、これを次のようにモデル化している。先ず発電所を火力発電所と原子力発電所とに大別する。各発電所に共通していることは、それを運転するのに必要な燃料量を初装荷、取替、廃棄の三区分に分けて算出していること、燃料の取替に時間おくれを許していること、燃料の調達に必要な余裕時間を組み入れ且つ原子力発電所のように使用済燃料を再使用する場合にはそのためのおくれ時間をも許すことになつている。核燃料にしる原油にしるこれらが燃焼炉へ装荷されるまでにはいくつかの処理工程を通るのが普通であつて、その場合原料は必ずといつてよいほど若干損耗する。本計算モデルでは処理工程における損耗量を算出し、原料所要量に組入れている。

系統内における年度毎の発電所設備投入量は線型計画法によつて決定される。その際、目的関数と制約条件が必要になる。本計算モデルでは、目的関数として年度積算のシステム・コストを最少化する、年度積算の天然ウラン消費量を最少化する、年度積算の実効天然ウラン消費量を最少化する、年度積算の分離作業量を最少化する、ものの内から任意のものを1ヶ選択して使用することができるようにしてある。また制約条件としては常に用いるものとして、発生電力量の保存、設備投入量の保存、新設設備量の上限值、下限値の制約、発電設備の負荷率区分の割振り、があり他に目的関数にシステム・コストを選ぶ場合には年度毎または年度積算の天然ウラン消費量、実効天然ウラン消費量、プルトニウム余剰生産量、ウラン233余剰生産量、の各量に年度毎に上限、下限の制約を置くことができる。目的関数に天然ウラン消費量、実効天然ウラン消費量、分離作業量を選ぶ場合には、上記の制約条件の他に年度毎のシステムコストの上下限值を指定することができる。これらの組合せをまとめてTable 1 に示しておいた。^(注2)

本計算コードにより算出される諸量は、各発電所の設備量、発電コスト、所要燃料量、などでありこれらは年度毎または計算年度積算量として整理され出力されるようになつている。以下に定式化の過程の概要と計算式を説明する。

3 設備容量とコスト関数

計算モデルの表式化を行なう前に以下に使用する記号の説明を行なつておく必要があるが、これに関しては定式化の過程で必要に応じて説明することにしてある。また単位に関しては、

(注2) 入力変数を適当に調整することにより火力発電所をシミュレートすることができる。

同一にとることは本計算コードの最大の欠点のひとつであるが、これを発電所毎に異なえるように理論を拡張することは勿論可能である。

各発電所のコスト関数はこれを資本費と燃料費+運転維持費の2項目に分け、その数値を年度毎、負荷率区分毎に別途算出評価し、コードの入力量として取扱う。資本費の償却の仕方には定率方法と定額方法の2方法があるが、本計算コードではいずれの方法も可能で、具体的には後述のパラメータ μ (l)を調整することでこれを可能にしている。総発電コストは基準年度に現在価値換算を行なっている。

次に、個々の発電所の運転特性が必要になるが、これを次のようにモデル化している。まず発電所を火力発電所と原子力発電所とに大別する。各発電所に共通していることは、それを運転するのに必要な燃料量を初装荷、取替、廃棄の三区分に分けて算出していること、燃料の取替に時間おくれを許していること、燃料の調達に必要な余裕時間を組み入れ且つ原子力発電所のように使用済燃料を再使用する場合にはそのためのおくれ時間をも許すことになつている。核燃料にしる原油にしるこれらが燃焼炉へ装荷されるまでにはいくつかの処理工程を通るのが普通であつて、その場合原料は必ずといつてよいほど若干損耗する。本計算モデルでは処理工程における損耗量を算出し、原料所要量に組入れている。

系統内における年度毎の発電所設備投入量は線型計画法によつて決定される。その際、目的関数と制約条件が必要になる。本計算モデルでは、目的関数として年度積算のシステム・コストを最少化する、年度積算の天然ウラン消費量を最少化する、年度積算の実効天然ウラン消費量を最少化する、年度積算の分離作業量を最少化する、ものの内から任意のものを1ヶ選択して使用することができるようにしてある。また制約条件としては常に用いるものとして、発電電力量の保存、設備投入量の保存、新設設備量の上限值、下限値の制約、発電設備の負荷率区分の割振り、があり他に目的関数にシステム・コストを選ぶ場合には年度毎または年度積算の天然ウラン消費量、実効天然ウラン消費量、プルトニウム余剰生産量、ウラン233余剰生産量、の各量に年度毎に上限、下限の制約を置くことができる。目的関数に天然ウラン消費量、実効天然ウラン消費量、分離作業量を選ぶ場合には、上記の制約条件の他に年度毎のシステムコストの上下限值を指定することができる。これらの組合せをまとめてTable 1 に示しておいた。^(注2)

本計算コードにより算出される諸量は、各発電所の設備量、発電コスト、所要燃料量、などでありこれらは年度毎または計算年度積算量として整理され出力されるようになつている。以下に定式化の過程の概要と計算式を説明する。

3 設備容量とコスト関数

計算モデルの表式化を行なう前に以下に使用する記号の説明を行なつておく必要があるが、これに関しては定式化の過程で必要に応じて説明することにしてある。また単位に関しては、

(注2) 入力変数を適当に調整することにより火力発電所をシミュレートすることができる。

Table 1 Combinations of Object Function and Constrains

Option	Object Function	Constrains
1	System Cost	<p>Constrain (1)~(4) are always used.</p> <p>(1) Conservation of installation.</p> <p>(2) Upper and lower capacity limits of installation.</p> <p>(3) Conservation of power operating time.</p> <p>(4) Permissible range of load factor.</p> <p>From constrain (5)~(6), one must be selected.</p> <p>(5) Annual or accumulated natural uranium requirement.</p> <p>(6) Annual or accumulated effective natural uranium requirement.</p> <p>Constrain (7)~(8) are always used.</p> <p>(7) Annual or accumulated fissile plutonium production.</p> <p>(8) Annual or accumulated uranium 233 production.</p>
2	Natural Uranium	<p>Constrain (1)~(4) described in option 1 are always used.</p> <p>Constrain (7)~(8) described in option 1 are always used.</p> <p>Additional constrain (9) can be always used.</p> <p>(9) System cost.</p>
3	Effective Natural Uranium	<p>Same as the constrains described in option 2.</p>
4	Separative Work	<p>Same as the constrains described in option 2.</p>

計算コードの入力量となるもののみに対して Table 2 に一括して示した。

今、年度 m 毎の系統の全発電設備量を $p(m)$ で表わすことにし、これを外部入力として与えるものとする。しかるとき発電所の耐用年数を m_0 とするとき年間増分設備量 $\Delta p(m)$ は $p(m) - p(m-1) + r(m)$ で与えられる。但し $r(m)$ は $\Delta p(m - m_0)$ である。発電設備の種類を添字 i で表わし、負荷率の区分を添字 j で区別することにする。 m 年度における第 i 番目の発電所の第 j 番目の負荷率区分に入る新設設備容量の年間増分設備容量に対する比率を $\alpha_{ij}(m)$ で表わすことにすると、この発電所の新設容量 $\Delta p_{ij}(m)$ ならびに廃棄容量 $r_{ij}(m)$ はそれぞれ次式で定義できる。

$$\Delta p_{ij}(m) = \alpha_{ij}(m) \cdot \Delta p(m), \quad (1)$$

$$r_{ij}(m) = \Delta p_{ij}(m - m_0), \quad (2)$$

ただし、 m_0 は発電所の耐用年数である。年度 m における第 i 番目の発電所の第 j 番目の負荷率区分に入る全設備容量を $P_{ij}(m)$ とし、また第 i 番目の発電所の新設容量に上限/下限の制約条件をおくものとし、さらに第 j 負荷率区分に入る年間の運転時間を $T_j(m)$ とすると、年度 m に発生する電力量 $Q(m)$ 、全設備容量 $P_{ij}(m)$ 、新設容量に対する制約条件は下記の式で表わされることになる。

$$Q(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ij}(m) \cdot T_j(m), \quad (3)$$

$$P_{ij}(m) = P_{ij}(m-1) + \Delta P_{ij}(m) - r_{ij}(m), \quad (4)$$

$$\Delta P_i^0(m) \leq \sum_{j=1}^J \Delta P_{ij}(m) \leq \Delta P_i^1(m), \quad (5)$$

但し、 I, J はそれぞれ発電所の種類数、負荷率の区分数である。また $\Delta P_i^1(m)$ 、 $\Delta P_i^0(m)$ は新設容量の上限/下限値である。

負荷率の区分は Fig. 1 に示した如く最大 J ケに分け、第 j 区分の出力分担 $b_j(m)$ とすると、設備容量の保存より下記のふたつの条件式が成立しなければならない。このうち(6)式は全新設容量の保存を示し、(7)式は第 j 区分の負荷率を持つ容量の保存則を示すものである。

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \alpha_{ij}(m) = 1.0, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I P_{ij}(m) = b_j(m) \cdot P(m). \quad (7)$$

いま添字 i, j で区別される発電所をとりあげ、この第 m 年度に投入される資本費を $F_{ij}(m)$ で表わすことにする。またこれの燃料費と運転維持費を加え合せた費用を $V_{ij}(m)$ で示すものとする。単位出力当りの資本費を $f_{ij}(m)$ 、単位発生電力当りの燃料費と運転維持費の和を $v_{ij}(m)$ とし、資本費の年間償却率を $\mu_i(m)$ とすると、 $F_{ij}(m)$ 、 $v_{ij}(m)$ は次式で表わすことができる。

$$F_{ij}(m) = \sum_{\ell=m-m_0+1}^m \mu_i(\ell) \cdot f_{ij}(\ell) \cdot \Delta P_{ij}(\ell), \quad (8)$$

$$V_{ij}(m) = v_{ij}(m) \cdot P_{ij}(m) \cdot T_j(m), \quad (9)$$

但し、(8)式における ℓ に関する総和は $\ell \geq 1$ に対してとるものとする。第 m 年度の割引率を

$r(m)$ とすると、計算年度全域にわたる積算発電コスト $Z(M)$ 、ならびに単位システム発電コスト $C(M)$ は次式で与えられる。

$$Z(M) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\prod_{\ell=1}^m \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot [F_{ij}(m) + V_{ij}(m)], \quad (10)$$

$$C(M) = Z(M) / \left[\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\prod_{\ell=1}^m \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot P_{ij}(m) \cdot T_j(m) \right]. \quad (11)$$

コスト関数 $f_{ij}(m)$ 、 $v_{ij}(m)$ は年度毎、発電所の種類別毎、負荷率の区分毎に別途評価し入力データとして取扱う。また資本費の年度毎の償却の仕方は $\mu_i(m)$ に適当な数値^(注3)を使用することによつて処置する。

(注3) 定額償却 定率償却とも可能である。

4 燃料インベントリ

4.1 インベントリ基本量

火力発電所であろうが原子力発電所であろうが、その運転に必要な燃料量は初装荷、取替、回収（取替燃料に対応するものと廃止炉心より取出される燃料の2種類がある）の3区分に分けて算出されることをすでに説明してきた。以下にこの区分毎に計算式を示す。計算式は原子力発電所を対象に示したものであるが、入力定数を適当に選択することにより火力発電所をシミュレートすることができる。

(1) 初装荷燃料量

第 m 年度に投入される第 i 番目の種類の発電所の比出力を $W_i(m)$ とすると、 $\Delta P_{ij}(m)$ の設備量を投入するのに必要な燃料インベントリ $FI_{ij}(m)$ は $\Delta P_{ij}(m) / W_i(m)$ で与えられる。いま単位燃料内に含まれるウラン、分裂性プルトニウム、トリウム、ウラン233の重量率をそれぞれ $u_i(m)$, $p_i(m)$, $t_i(m)$, $z_i(m)$ で示すと、各初装荷燃料は次式で与えられる。

$$UI_{ij}(m) = u_i(m) \cdot FI_{ij}(m), \dots\dots U \quad (12)$$

$$PI_{ij}(m) = p_i(m) \cdot FI_{ij}(m), \dots\dots \text{分裂性 } P_U \quad (13)$$

$$TI_{ij}(m) = t_i(m) \cdot FI_{ij}(m), \dots\dots Th \quad (14)$$

$$ZI_{ij}(m) = z_i(m) \cdot FI_{ij}(m), \dots\dots U233 \quad (15)$$

但し、

$$FI_{ij}(m) = \Delta P_{ij}(m) / W_i(m) \quad (16)$$

i, j, m の変域は $(1, I), (1, J), (1, M)$ である。

(2) 取替燃料量

現在商用運転に入っている軽水炉は、年間一回の燃料取替を行っている。また将来系統に投入される高速炉も年間一回の割合で燃料取替を行なうようになるであろう。これは、ひとつには炉の構造からくる制約に基づくものであるが、他のひとつには燃料取替の経費が比較的高くつき発電コストの上でも年間一回程度の燃料取替がコストを最少にするという経験的な事実に基づくためである。他の動力炉、例えば重水炉、熔融塩炉等では運転時連続燃料取替を行なうものもある。しかし、本計算コードでは燃料取替を年間1回実施するものとした。したがって連続燃料取替を行なう動力炉を系統に投入する場合には後述の入力定数に適当な補正を加える必要がある。

いま、第 i 番目の発電所をとりあげ、第 m 年度の第 j 負荷区分の電力を発生するのに必要な取替燃料量を算出しよう。燃料取替の開始は初装荷燃料の装填以後 $m(r)_i$ 年おくれて開始されるものとする。第 m 年度までの積算容量 $P_{ij}(m)$ のうち年度 $m - m(r)_i + 1$ より m までに投入された容量の発電所は燃料取替を行なわないことになる。したがって m 年度に燃料取替の対象になる容量 $P'_{ij}(m)$ は

$$P'_{ij}(m) = P_{ij}(m) - \sum_{l=\text{Max}(m-m(r)_i+1, 1)}^m \Delta P_{ij}(l) \quad (17)$$

但し、 $\text{Max}(A, B)$ は $A \geq B$ の場合には A を選び、 $A < B$ の場合には B を選ぶ。

m年度に投入されている発電所の燃料取替の対象になる容量は $P'_{ij}(m)$ であるから、これを運転するに要する燃料量は $P'_{ij}(m) / W_i(m)$ となる。1ヶ年間の実効運転時間は負荷率を考慮に入れて $1.0 \times T_j(m) / T_0$ であり、また燃料の炉内滞在時間を $L_i(m)$ 年とすると、 $P'_{ij}(m) / W_i(m)$ の燃料量のうち1年間で取出される量は $[P'_{ij}(m) / W_i(m)] \times [T_j(m) / T_0] / L_i(m)$ となる。ここで $W_i(m)$ と $L_i(m)$ との積は燃料の燃焼度とみなすことができるので $B_i(m) = W_i(m) \cdot L_i(m)$ を定義する。

単位取替燃料量内のウラン、分裂性プルトニウム、トリウム、ウラン233含有量を $u'_i(m)$, $p'_i(m)$, $t'_i(m)$, $3'_i(m)$ で示すことにすると、これらに対応する取替燃料量は次式で計算できることになる。

$$UB_{ij}(m) = u'_i(m) \cdot FB_{ij}(m), \dots \dots U \tag{18}$$

$$PB_{ij}(m) = p'_i(m) \cdot FB_{ij}(m), \dots \dots \text{分裂性 } P_U \tag{19}$$

$$TB_{ij}(m) = t'_i(m) \cdot FB_{ij}(m), \dots \dots Th \tag{20}$$

$$3B_{ij}(m) = 3'_i(m) \cdot FB_{ij}(m), \dots \dots U-233 \tag{21}$$

但し、

$$FB_{ij}(m) = \frac{T_j(m)}{B_i(m) \cdot T_0} \cdot \left\{ P_{ij}(m) - \sum_{\ell = \text{Max}(m - m(r)_i + 1, 1)}^m \Delta P_{ij}(\ell) \right\} \tag{22}$$

(18)~(22)式内の i, j, m の変域は $(1, I), (1, J), (1, M)$ である。

(3) 回収燃料量 (取替燃料に対応するもの)

第m年度に炉外へ取出される燃料量はその年度に炉に装荷された燃料量と同量になると近似してよい。現実の発電所においては、このふたつの量は相等しからざる場合が生じることがある。がしかし本計算モデルでは等しいとした。炉外へ取出された燃料はそのまま直ちに使用可能になるものではなく、例えば原子炉用燃料の場合には冷却、再処理、再加工を行なわねばならない。この為再使用されるまでには時間おくれを伴なう。再使用までの時間おくれを $m(r)_i$ とすると、取替燃料に対応する回収燃料量は

$$UR_{ij}(m) = u''_i(m - m(r)_i) \cdot FB_{ij}(m - m(r)_i), \dots \dots U \tag{23}$$

$$PR_{ij}(m) = p''_i(m - m(r)_i) \cdot FB_{ij}(m - m(r)_i), \dots \dots \text{分裂性 } P_U \tag{24}$$

$$TR_{ij}(m) = t''_i(m - m(r)_i) \cdot FB_{ij}(m - m(r)_i), \dots \dots Th \tag{25}$$

$$3R_{ij}(m) = 3''_i(m - m(r)_i) \cdot FB_{ij}(m - m(r)_i), \dots \dots U-233 \tag{26}$$

となる。但し $UR_{ij}(m) \sim 3R_{ij}(m)$ は $m - m(r)_i \geq 1$ の m の範囲でのみ計算する。 $u''_i \sim 3''_i$ は回収燃料の炉外取出時におけるウラン、分裂性プルトニウム、トリウム、ウラン233の含有率である。

(4) 回収燃料量 (廃止炉心に対応するもの)

発電所は耐用年数間運転されたあとは廃棄される。この時、炉心から初装荷燃料とほぼ同量の使用済燃料が取出される。使用済燃料が再使用可能になるまでの時間おくれを $m(rp)_i$ とし、この単位燃料内におけるウラン、分裂性プルトニウム、トリウム、ウラン233の含有率を $u'''_i, p'''_i, t'''_i, 3'''_i$ とすると廃止炉心よりの回収燃料量は

$$UIR_{ij}(m) = u'''_i(m - m_0 - m(rp)_i) \cdot FI_{ij}(m - m_0 - m(rp)_i), \dots \dots U \tag{27}$$

$$PIR_{ij}(m) = p'''_i(m - m_0 - m(rp)_i) \cdot FI_{ij}(m - m_0 - m(rp)_i), \dots \dots \text{分裂性 } P_U \tag{28}$$

$$TIR_{ij}(m) = t'''_i(m - m_0 - m(rp)_i) \cdot FI_{ij}(m - m_0 - m(rp)_i), \dots \dots Th \tag{29}$$

$$3IR_{ij}(m) = 3''_i(m-m_0-m(rp)_i) \cdot FI_{ij}(m-m_0-m(rp)_i), \dots \text{U-233} \quad (30)$$

但し、上記各量は $m-m_0-m(rp)_i \geq 1$ を満す m の範囲のみで計算する。

(5) 天然ウラン換算燃料量

ウラン燃料は種々の異つた濃縮度のものを使用するので、これを天然ウランに換算した燃料量として評価するのがよい。いま濃縮ウラン中の ^{235}U 濃度を e 、天然ウラン中の ^{235}U 濃度を e_N 、拡散プラントのテイル濃度を e_0 とすると、単位の濃縮ウランを生産するのに必要な天然ウラン量 $EF(e, e_0)$ は $(e-e_0)/(e_N-e_0)$ で与えられる。

第 m 年度に装荷されるウランを初装荷、取替えに分けこの濃縮度をそれぞれ $e_i(m)$ 、 $e'_i(m)$ とする。また使用済燃料内の ^{235}U 濃度を取替燃料に対して $e''_i(m)$ 、廃止炉心よりの燃料に対して $e'''_i(m)$ とする。しかるとき、初装荷、取替の各装荷燃料の天然ウラン換算量、ならびに取替、廃止の各回収燃料の天然ウラン換算量は次式で計算できることになる。

$$NUI_{ij}(m) = EF(e_i(m), e_0(m)) \cdot UI_{ij}(m), \quad (31)$$

$$NUB_{ij}(m) = EF(e'_i(m), e_0(m)) \cdot UB_{ij}(m), \quad (32)$$

$$NUR_{ij}(m) = EF(e''_i(m-m(rp)_i), e_0(m-m(rp)_i)) \cdot UR_{ij}(m), \quad (33)$$

$$NUIR_{ij}(m) = EF(e'''_i(m-m_0-m(rp)_i), e_0(m-m_0-m(rp)_i)) \cdot UIR_{ij}(m), \quad (34)$$

但し、 $m-m(rp)_i \geq 1$ 、 $m-m_0-m(rp)_i \geq 1$ を満す m についてのみ計算するものとする。

(6) 分離作業量

濃縮度 e のウランを生産するのに必要な分離作業量は $VF(e, e_0)$ 関数を用いて次式で計算できる。初装荷、取替各燃料に対する分離作業量 $SI_{ij}(m)$ 、 $SB_{ij}(m)$ は

$$SI_{ij}(m) = VF(e_i(m), e_0(m)) \cdot UI_{ij}(m), \quad (35)$$

$$SB_{ij}(m) = VF(e'_i(m), e_0(m)) \cdot UB_{ij}(m), \quad (36)$$

で与えられる。但し、

$$VF(e, e_0) = (2e_0-1) \cdot \left(\frac{e-e_N}{e_N-e_0} \right) \cdot \ell_n \left(\frac{e_0}{1-e_0} \right) + (2e-1) \cdot \ell_n \left(\frac{e}{1-e} \right) - (2e-1) \cdot \left(\frac{e-e_0}{e_N-e_0} \right) \cdot \ell_n \left(\frac{e_N}{1-e_N} \right). \quad (37)$$

4.2 燃料の積算所要量

(i) 損耗率、回収率

天然ウラン精鉱が燃料体になるまでの過程をたどつてみると次の如くなる。エーロ・ケーキはまず UF_6 に転換され、次に UF_6 が濃縮プラントへ入れられて濃縮される。濃縮された UF_6 は次に UO_2 に変換され、その後燃料体に成型加工される。濃縮 UF_6 が UO_2 に変換される時や、 UO_2 が燃料体に成型加工される時に生じる核燃料の損耗率をそれぞれ l_{2U} 、 l_{fU} で示すことにする。またエーロ・ケーキを UF_6 に転換したときの転換損耗率を l_{1U} 、 UF_6 の濃縮損耗率を l_e とする。しかるとき、単位の燃料体を製造するに至るまでの実効損耗率の逆数値 $LF(e, e_0)$ は

$$LF(e, e_0) = 1 + l_{1U} + l_e + EF(e, e_0) \cdot (l_{2U} + l_{fU}) \quad (38)$$

によつて算出できる。燃料にプルトニウム、ウラン 233、トリウム等を用いる場合にも同様

の損耗が生じる。その率をそれぞれ l_{fp} , l_{f3} , l_{fh} とするとこれらに対する実効損耗率の逆数値は

$$LFP = 1 + l_{fp}, \dots \text{分裂性 } P_U \quad (39)$$

$$LF3 = 1 + l_{f3}, \dots \text{U-233} \quad (40)$$

$$LFH = 1 + l_{fh}, \dots \text{Th} \quad (41)$$

と定義できる。回収燃料に対しても同様の損耗率を定義されねばならない。使用済燃料の再処理損耗率を l_r , 硝酸ウラニルの六弗化ウランへの転換損耗率を l_{3U} , 同様に硝酸プルトニウム, ウラン233, トリウム等の転換損耗率をそれぞれ l_{3p} , l_{33} , l_{3h} とすると, 燃料の実効回収率は

$$LRU = 1 - l_r - l_{3U}, \dots \text{U} \quad (42)$$

$$LRP = 1 - l_r - l_{3p}, \dots \text{分裂性 } P_U \quad (43)$$

$$LR3 = 1 - l_r - l_{33}, \dots \text{U-233} \quad (44)$$

$$LRH = 1 - l_r - l_{3h}, \dots \text{Th} \quad (45)$$

と定義できる。上記の損耗率, 回収率を用いて以下に種々の定義による燃料所要量を算出しよう。

(2) 天然ウラン所要量

第 m 年度に燃料を炉に装荷するには m_U 年先がけて燃料を調達されていなければならない。それは燃料の変換, 濃縮, 成型加工にかなりの時間を要するからである。いま第 m 年度に調達されねばならない天然ウラン量を $NU(m)$ で示すと, これは先に定義した $NU_{ij}(m)$, $NU_{ij}(m)$ を用いて次式で算出することができる。

$$NU(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J NU_{ij}(m+m_U), \quad (46)$$

但し, m の変域は $1-m_U$ から始まり $M-m_U$ で終る。また $NU_{ij}(m)$ は,

$$NU_{ij}(m) = LF(e_i(m), e_o(m)) \cdot NUI_{ij}(m) + LF(e'_i(m), e_o(m)) \cdot NUB_{ij}(m). \quad (47)$$

回収燃料に対しても同様の定義式を与えることができる。第 m 年度における回収燃料量を $NRU(m)$ とすると

$$NRU(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J NRU_{ij}(m), \quad (48)$$

但し, m の変域は $m(r)_i + m(rp)_i$ より M までとなる。また $NRU_{ij}(m)$ は,

$$NRU_{ij}(m) = LRU \cdot [NUR_{ij}(m) + NUIR_{ij}(m)]. \quad (49)$$

上の諸量を用いて天然ウランの積算所要量 $ANU(M)$ ならびに $ANU(M)$ より天然ウラン換算の回収燃料量を差引いた実効天然ウラン量 $AENU(M)$ ならびに, 年度毎の実効天然ウラン量 $ENU(m)$ は以下に示すものになる。

$$ANU(M) = \sum_{m=1-m_U}^{M-m_U} NU(m), \quad (50)$$

$$AENU(M) = \sum_{m=1-m_U}^M ENU(m), \quad (51)$$

$$ENU(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [NU_{ij}(m+m_U) - NRU_{ij}(m)], \quad (52)$$

但し、 $ENU(m)$ に対する m の変域は $1-m_U$ より M までである。(52)式右辺において、その第1項は $m \geq M-m_U+1$ で零とするものとする。また第2項は $1-m_U \leq m \leq 0$ では零とする。実際には、第2項は $m(r)_i + m(rp)_i \leq m \leq M$ でしか値がでてこない。

(3) プルトニウム生成量

前項目で定義したと同様の諸量をプルトニウム生成量に対して定義することができる。以下に結果の表式のみを示すことにした。装荷燃料に対して、

$$PUI(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J PUI_{ij}(m+m_p), \quad (53)$$

但し、 m の変域は $1-m_p$ より $M-m_p$ までである。

また、 $PUI_{ij}(m)$ は、

$$PUI_{ij}(m) = LFP \cdot [PI_{ij}(m) + PB_{ij}(m)]. \quad (54)$$

同様に回収燃料に対して、

$$PUY(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J PUY_{ij}(m), \quad (55)$$

但し、 m の変域は 1 より M までである。

また $PUY_{ij}(m)$ は

$$PUY_{ij}(m) = LRP \cdot [PR_{ij}(m) + PIR_{ij}(m)]. \quad (56)$$

以上より年度積算量、実効量は以下に示すものになる。

$$APUI(M) = \sum_{m=1-m_p}^{M-m_p} PUI(m), \quad (57)$$

$$APUY(M) = \sum_{m=1}^M PUY(m), \quad (58)$$

$$AEPU(M) = APUY(M) - APUI(M), \quad (59)$$

$$EPU(m) = PUY(m) - PUI(m) + APU(m), \quad (60)$$

但し $APU(m)$ は m 年度に輸入するプルトニウム量である。

(4) ウラン233生成量

計算式のみを以下に示す。

$$U3I(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J U3I_{ij}(m+m_3), \quad (61)$$

$$U3I_{ij}(m) = LF3 \cdot [3I_{ij}(m) + 3B_{ij}(m)], \quad (62)$$

但し、 m の変域は $1-m_3$ より $M-m_3$ までである。

$$U3Y(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J U3Y_{ij}(m), \quad (63)$$

$$U3Y_{ij}(m) = LR3 \cdot [3R_{ij}(m) + 3IR_{ij}(m)], \quad (64)$$

$$AU3I(M) = \sum_{m=1-m_3}^{M-m_3} U3I(m), \quad (65)$$

$$AU3Y(M) = \sum_{m=1}^M U3Y(m), \quad (66)$$

$$AEU3(M) = AU3Y(M) - AU3I(M), \quad (67)$$

$$EU3(m) = U3Y(m) - U3I(m) + A3(m). \quad (68)$$

(4) トリウム所要量

計算式のみを以下に示す。

$$HI(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J HI_{ij}(m+m_h), \quad (69)$$

$$HI_{ij}(m) = LFH \cdot (TI_{ij}(m) + TB_{ij}(m)), \quad (70)$$

$$HR(m) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J HR_{ij}(m), \quad (71)$$

$$HR_{ij}(m) = LRH \cdot (TR_{ij}(m) + TIR_{ij}(m)), \quad (72)$$

$$AHI(M) = \sum_{m=1}^{M-m_h} HI(m), \quad (73)$$

$$AHR(M) = \sum_{m=1}^M HR(m), \quad (74)$$

$$AEH(M) = AHI(M) - AHR(M), \quad (75)$$

$$EH(m) = HI(m) - HR(m). \quad (76)$$

5 線型計画法に対する標準形式

先に定義した発電設備の新設投入率 $\alpha_{ij}(m)$ を定めるのに線型計画法を用いる。そのためには目的関数、制約条件式を標準形式に組変える必要がある。ここでいう線型計画法の標準形式とは、目的関数を $J = \vec{\lambda} \cdot \vec{\alpha}$ の形式にまとめ、制約条件式を $\vec{b}_1 \leq A \vec{\alpha} \leq \vec{b}_2$ の形式にまとめることをさす。ここで $\vec{\alpha}$ は求めようとする新設投入率 $\alpha_{ij}(m)$ を成分とするベクトルであり、 $\vec{\lambda}$ 、 \vec{b}_1 、 \vec{b}_2 もまたベクトルで系固有の量である。また A は系固有の性質で定まるマトリックスである。以下に目的関数と制約条件式を定義しよう。なお導出の詳細過程はシステム・コストのみを例にとつて Appendix に示すことにした。

5.1 $\vec{\alpha}$ ベクトル

目的関数、制約条件に対する標準形式を導くにあつて先ず新設投入率 $\alpha_{ij}(m)$ を成分にもつ $\vec{\alpha}$ ベクトルを定義しよう。これは $J \times I \times M$ 個の成分よりなるもので次式で定義する。

$$\vec{\alpha} = \left(\begin{array}{c} \alpha_{11}(1) \\ \alpha_{12}(1) \\ \dots \\ \alpha_{1J}(1) \\ \alpha_{21}(1) \\ \alpha_{22}(1) \\ \dots \\ \alpha_{2J}(1) \\ \dots \\ \alpha_{I1}(1) \\ \alpha_{I2}(1) \\ \dots \\ \alpha_{IJ}(1) \\ \dots \\ \alpha_{I1}(M) \\ \alpha_{I2}(M) \\ \dots \\ \alpha_{IJ}(M) \end{array} \right) \quad \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \alpha_{11}(1) \\ \alpha_{12}(1) \\ \dots \\ \alpha_{1J}(1) \end{array} \right\} J \\ \left. \begin{array}{l} \alpha_{21}(1) \\ \alpha_{22}(1) \\ \dots \\ \alpha_{2J}(1) \end{array} \right\} J \\ \left. \begin{array}{l} \alpha_{I1}(1) \\ \alpha_{I2}(1) \\ \dots \\ \alpha_{IJ}(1) \end{array} \right\} J \\ \left. \begin{array}{l} \alpha_{I1}(M) \\ \alpha_{I2}(M) \\ \dots \\ \alpha_{IJ}(M) \end{array} \right\} J \end{array} \quad \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \alpha_{11}(1) \\ \alpha_{12}(1) \\ \dots \\ \alpha_{1J}(1) \\ \alpha_{21}(1) \\ \alpha_{22}(1) \\ \dots \\ \alpha_{2J}(1) \end{array} \right\} J \times I \\ \left. \begin{array}{l} \alpha_{I1}(1) \\ \alpha_{I2}(1) \\ \dots \\ \alpha_{IJ}(1) \end{array} \right\} J \times I \\ \left. \begin{array}{l} \alpha_{I1}(M) \\ \alpha_{I2}(M) \\ \dots \\ \alpha_{IJ}(M) \end{array} \right\} J \times I \end{array} \quad \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \alpha_{11}(1) \\ \alpha_{12}(1) \\ \dots \\ \alpha_{1J}(1) \\ \alpha_{21}(1) \\ \alpha_{22}(1) \\ \dots \\ \alpha_{2J}(1) \\ \dots \\ \alpha_{I1}(1) \\ \alpha_{I2}(1) \\ \dots \\ \alpha_{IJ}(1) \\ \dots \\ \alpha_{I1}(M) \\ \alpha_{I2}(M) \\ \dots \\ \alpha_{IJ}(M) \end{array} \right\} J \times I \times M \end{array} \quad \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ ((m-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j \\ \vdots \\ J \times I \times M \end{array} \quad (77)$$

第 m 年度の第 i 番目の発電所の第 j 番目の負荷率区分に入る新設投入率 $\alpha_{ij}(m)$ は $\vec{\alpha}$ ベクトルの成分で $((m-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j$ 番目に対応する。

5.2 目的関数

(1) システム・コスト

システムの年度Mまでの積算コストは(11)式で与えられている。これを標準形式に変形すると以下に示す式になる。

$$J_c = \vec{w} \cdot \vec{a}, \tag{78}$$

但し、 $\vec{w} = (w_{[(m-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j})$ は $J \times I \times M$ 次元行ベクトルでその要素を以下のようにして定める。先ず、 $w_{[(m-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j}$ を零セットし、 m を固定して、 $\ell = m - m_0 + 1, m - m_0 + 2, \dots, m$ に対して

$$w_{[(\ell-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j} + \frac{\left(\prod_{\ell=1}^m \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot \left(\mu_i(\ell) \cdot f_{ij}(\ell) + v_{ij}(m) \cdot T_j(m) \right)}{\sum_{m=1}^M \left(\prod_{\ell=1}^m \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot Q(m)} \cdot \Delta P(\ell) \rightarrow w_{[(\ell-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j} \tag{79}$$

(79)式において \rightarrow の意味は $w_{[(\ell-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j}$ のメモリーへ(79)式左辺第2項の量を入れることを示すものである。上記の計算は $1 \leq j \leq J, 1 \leq i \leq I, 1 \leq m \leq M$ の範囲にわたって行なう。

(2) 天然ウラン積算消費量

年度 $1 - m_U$ 年より $M - m_U$ 年^(注4)までの天然ウラン積算消費量は(50)式により与えられている。これを標準形式に変形すると次式に示すものとなる。

$$J_U = \vec{\Psi} \cdot \vec{a}, \tag{80}$$

但し、 $\vec{\Psi} = (\Psi_{[(m-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j})$ は $J \times I \times M$ 次元行ベクトルで、零セットした後 m を固定して、

$$\Psi_{[(m-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j} + LF(e_i(m), e_o(m)) \cdot EF(e_i(m), e_o(m)) \times \frac{u_j(m)}{W_j(m)} \cdot \Delta P(m) \rightarrow \Psi_{[(m-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j} \tag{81}$$

$\ell = m - m_0 + 1, m - m_0 + 2, \dots, m - m(r)_i$ に対して

$$\Psi_{[(\ell-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j} + LF(e'_i(\ell), e_o(\ell)) \cdot EF(e'_i(\ell), e_o(\ell)) \times \frac{u'_j(\ell) \cdot T_j(m)}{B_j(m) \cdot T_o} \cdot \Delta P(\ell) \rightarrow \Psi_{[(\ell-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j} \tag{82}$$

の計算を $1 \leq j \leq J, 1 \leq i \leq I, 1 \leq m \leq M$ の範囲にわたって行なう。

(3) 実効天然ウラン積算消費量

実効天然ウラン積算消費量は(51)式で定義されている。これを標準形式に変形すると次式になる。

(注4) M年度に炉に装荷される燃料は $M - m_U$ 年度に調達されねばならないので、積算の範囲は $1 - m_U \leq m \leq M - m_U$ となる。

$$J_{EU} = \vec{\phi} \cdot \vec{\alpha}, \tag{83}$$

但し、 $\vec{\phi} = (\phi_{[(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j})$ は $J \times I \times M$ 次元行ベクトルで零セットした後、 m を固定して

$$\begin{aligned} & \circ \phi_{[(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j} + LF(e_i(m), e_o(m)) \cdot EF(e_i(m), e_o(m)) \times \\ & \quad \times \frac{u_i(m)}{W_i(m)} \cdot \Delta P(m) \rightarrow \phi_{[(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j}, \end{aligned} \tag{84}$$

$$\begin{aligned} & \circ \phi_{[(m'-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j} - LRU \cdot EF(e_i''(m'), e_o(m')) \cdot \frac{u_i''(m')}{W_i(m')} \cdot \Delta P(m') \\ & \quad \rightarrow \phi_{[(m'-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j}, \end{aligned} \tag{85}$$

但し、 $m' = m - m_U - m_o - m(r)_i$ 、

$$\begin{aligned} & \circ \ell = m - m_o + 1, m - m_o + 2, \dots, m - m(r)_i \text{ に対して,} \\ & \phi_{[(\ell-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j} + LF(e'_i(\ell), e_o(\ell)) \cdot EF(e'_i(\ell), e_o(\ell)) \times \\ & \quad \times \frac{u'_i(\ell) \cdot T_j(\ell)}{B_i(\ell) \cdot T_o} \cdot \Delta P(\ell) \rightarrow \phi_{[(\ell-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j}, \end{aligned} \tag{86}$$

(3) $\circ \ell' = m' - m_o + 1, m' - m_o + 2, \dots, m' - m(r)_i$ 、

但し $m' = m - m_U - m(r)_i$ 、 ℓ' に対して

$$\begin{aligned} & \phi_{[(\ell'-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j} - LRU \cdot EF(e''_i(\ell'), e_o(\ell')) \times \\ & \quad \times \frac{u''_i(\ell') \cdot T_j(\ell')}{B_i(\ell') \cdot T_o} \cdot \Delta P(\ell') \rightarrow \phi_{[(\ell'-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j}, \end{aligned} \tag{87}$$

の計算を $1 \leq j \leq J$ 、 $1 \leq i \leq I$ 、 $1 \leq m \leq M$ の範囲にわたって行なり。

(4) 分離作業積算量

分離作業量の年度積算量は (35) ~ (36) 式を加え合せ、 i, j, m に対して総和をとればよい。その結果を標準形式に変形すると次式になる。

$$J_{SW} = \vec{\chi} \cdot \vec{\alpha}, \tag{88}$$

但し、 $\vec{\chi} = (\chi_{[(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j})$ は $J \times I \times M$ 次元ベクトルで、零セットした後 m を固定して

$$\begin{aligned} & \circ \chi_{[(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j} + VF(e_i(m), e_o(m)) \cdot \frac{u_i(m)}{W_i(m)} \cdot \Delta P(m) \rightarrow \\ & \quad \rightarrow \chi_{[(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j}, \end{aligned} \tag{89}$$

$$\begin{aligned} & \circ \ell = m - m_o + 1, m - m_o + 2, \dots, m - m(r)_i \text{ に対して} \\ & \chi_{[(\ell-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j} + VF(e'_i(\ell), e_o(\ell)) \cdot \frac{u'_i(\ell) \cdot T_j(\ell)}{B_i(\ell) \cdot T_o} \cdot \Delta P(\ell) \rightarrow \\ & \quad \rightarrow \chi_{[(\ell-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j}, \end{aligned} \tag{90}$$

の計算を $1 \leq j \leq J$ 、 $1 \leq i \leq I$ 、 $1 \leq m \leq M$ の範囲にわたって行なり。

5.3 制約条件

(1) 設備投入率の保存

年度毎に投入される新設設備投入量は入力で指定された値に保存されねばならない。この保存則は(6)式にて定義されるものである。この関係をベクトル表式に変形すると以下に示すものになる。

$$A\vec{\alpha} = \vec{c}, \tag{91}$$

但し、 $A = (A_{x,y})$ は M 行、 $J \times I \times M$ 列のマトリックスで、その要素は

$$A_{m,y} = \begin{cases} 1.0, & [(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j \leq [(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j, \\ 0.0, & \text{その他,} \end{cases} \tag{92}$$

i, j は $1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq J$ の範囲で変動させる。 $\vec{c} = (c_m)$ は M 次元列ベクトルで $c_m = 1.0, 1 \leq m \leq M$ である。

(2) 新設設備容量の上限値, 下限値

年度 m に新設投入される設備の上限値, 下限値を外部より指定する。その関係は(5)式で示されていた。これをベクトル表式に変形すると以下に示すものになる。

$$\vec{\beta}_0 \leq B\vec{\alpha} \leq \vec{\beta}_1, \tag{93}$$

但し、 $B = (B_{x,y})$ は $I \times M$ 行、 $J \times I \times M$ 列のマトリックスで、その要素を零セットした後、

$$B_{(m-1) \cdot I + i, [(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j} + 4P_i^{(m)} B_{(m-1) \cdot I + i, [(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j} \tag{94}$$

の計算を $1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq J, 1 \leq m \leq M$ の範囲で行なう。

$\vec{\beta}_0 = (\beta_{(m-1) \cdot I + i}^0)$, $\vec{\beta}_1 = (\beta_{(m-1) \cdot I + i}^1)$ はそれぞれ $I \times M$ 次元列ベクトルでその要素は

$$\beta_{(m-1) \cdot I + i}^0 = 4P_i^0(m), \tag{95}$$

$$\beta_{(m-1) \cdot I + i}^1 = 4P_i^1(m) \tag{96}$$

である。

(3) 有効電力発生時間

第 m 年度に発生した電力量 $Q(m)$ とその年度に投入されている設備量 $P(m)$ ならびに負荷率との間には次の保存則が成立てなければならない。

$$\sum_{j=1}^J b_j(m) \cdot T_j(m) = Q(m)/P(m). \tag{97}$$

この関係式が成立するよう $b_j(m)$ と $T_j(m)$ の組合せを作っておく。(97)式の関係は $\vec{\alpha}$ を求めるのに直接使用されない。

(4) 負荷率変動巾

負荷率の区分に関しては、さらに(7)式で示す制約条件がある。これをベクトル表式化すると以下に示すものになる。

$$C\vec{\alpha} = \vec{\gamma}, \tag{98}$$

但し、 $C = (C_{x,y})$ は $J \times M$ 行、 $J \times I \times M$ 列のマトリックスでその要素を零セットし

た後 m を固定して $\ell = m - m_0 + 1, m - m_0 + 2, \dots, m$ に対して

$$C_{(m-1) \cdot J+i}, [(l-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j + \Delta P(\ell) \rightarrow C_{(m-1) \cdot J+i}, [(l-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j, \quad (99)$$

の計算を $1 \leq j \leq J, 1 \leq i \leq I, 1 \leq m \leq M$ の範囲にわたって行なう。

$\vec{r} = (r_{(m-1) \cdot J+i})$ は $J \times M$ 次元列ベクトルでその要素は

$$r_{(m-1) \cdot J+i} = b_j(m) \cdot P(m) \quad (100)$$

である。

(5) 天然ウラン消費量 (年度毎)

年度毎に消費される天然ウラン量は (46) 式で与えられている。 m の変域は $1 - m_U$ より $M - m_U$ までであるが、 m を $m' = m + m_U$ に変換してベクトル表式化する。以下に結果のみを記す。

$$\vec{0} \leq D \vec{\alpha} \leq \vec{\delta}, \quad (101)$$

但し、 $D = (D_{x,y})$ は M 行、 $J \times I \times M$ 列のマトリックスで、その要素を零セットした後 m を固定して

$$\begin{aligned} & \circ D_m, [(m-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j + LF(e_i(m), e_0(m)) \cdot EF(e_i(m), \\ & e_0(m)) \cdot \frac{u_i(m)}{W_i(m)} \cdot \Delta P(m) \rightarrow D_m, [(m-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j, \end{aligned} \quad (102)$$

$\circ \ell = m - m_0 + 1, m - m_0 + 2, \dots, m - m(r)_i$ に対して

$$\begin{aligned} & D_m, [(l-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j + LF(e'_i(m), e_0(m)) \cdot EF(e'_i(m), e_0(m)) \times \\ & \times \frac{u'_i(m) \cdot T_j(m)}{B_i(m) \cdot T_0} \cdot \Delta P(\ell) \rightarrow D_m, [(l-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j \end{aligned} \quad (103)$$

の計算を $1 \leq j \leq J, 1 \leq i \leq I, 1 \leq m \leq M$ の範囲にわたって行なう。

$\vec{0} = (O_m), \vec{\delta} = (\delta_m)$ は M 次元列ベクトルでその成分は

$$O_m = 0.0, \quad 1 \leq m \leq M, \quad (104)$$

$$\delta_m = CU(m - m_U), \quad 1 \leq m \leq M, \quad (105)$$

である。 $CU(m - m_U)$ は天然ウラン消費量の上限值で外部より入力する。

(6) 実効天然ウラン消費量 (年度毎)

年度毎の実効天然ウラン消費量は (52) 式により与えられている。 $m' = m + m_U$ の変換を行なった後ベクトルの表式化をする。以下に結果のみを記す。

$$\vec{0} \leq E \vec{\alpha} \leq \vec{\epsilon}, \quad (106)$$

但し、 $E = (E_{x,y})$ は M 行、 $J \times I \times M$ 列のマトリックスでその要素を零セットした後 m を固定して、

$$\begin{aligned} & \circ E_m, [(m-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j + LF(e_i(m), e_0(m)) \cdot EF(e_i(m), \\ & e_0(m)) \cdot \frac{u_i(m)}{W_i(m)} \cdot \Delta P(m) \rightarrow E_m, [(m-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j, \end{aligned} \quad (107)$$

$$\begin{aligned} & \circ E_m, [(m''-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j - LRU \cdot EF(e''_i(m''), e_0(m'')) \times \\ & \times \frac{u''_i(m'')}{W_i(m'')} \cdot \Delta P(m'') \rightarrow E_m, [(m''-1) \cdot I+i-1] \cdot J+j, \end{aligned} \quad (108)$$

但し, $m'' = m - m_U - m_o - m(rp)_i$, $m'' \geq 1$,

○ $\ell = m - m_o + 1, m - m_o + 2, \dots, m - m(rp)_i$; $\ell \geq 1$ に対して

$$E_{m, ((\ell-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j} + L F(e'_i(m), e_o(m)) \cdot E F(e'_i(m), e_o(m)) \times \\ \times \frac{u'_i(m) \cdot T_j(m)}{B_i(m) \cdot T_o} \cdot \Delta P(\ell) \rightarrow E_{m, ((\ell-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j} \quad (109)$$

○ $\ell = m' - m_o + 1, m' - m_o + 2, \dots, m' - m(rp)_i$, 但し

$m' = m - m_U - m(rp)_i$, $\ell \geq 1, m' \geq 1$ に対して

$$E_{m, ((\ell-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j} - L R U \cdot E F(e''_i(m'), e_o(m')) \times \\ \times \frac{u''_i(m') \cdot T_j(m')}{B_i(m') \cdot T_o} \cdot \Delta P(\ell) \rightarrow E_{m, ((\ell-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j} \quad (110)$$

の計算を $1 \leq j \leq J, 1 \leq i \leq I, 1 \leq m \leq M$ の範囲にわたって行なう。

$\vec{\epsilon} = (\epsilon_m)$ は M 次元列ベクトルでその成分は

$$\epsilon_m = C E U(m - m_U), 1 \leq m \leq M, \quad (111)$$

である。CEU($m - m_U$)は実効天然ウラン消費量の上限値で外部より指定される。

(7) プルトニウム余剰生成量 (年度毎)

年度 m におけるプルトニウム余剰生成量は (60) 式で定義した。この式において $m' = m + m_p$ の変換を行ない、その後ベクトル表式化をする。結果の式のみを以下に示す。

$$\vec{\eta} \leq F \vec{\alpha} \leq \vec{\zeta}, \quad (112)$$

但し, $F = (F_{x,y})$ は M 行, $J \times I \times M$ 列のマトリックスでその要素を零セットした後, m を固定して

$$F_{m, ((m-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j} - L F P \cdot \frac{P_i(m)}{W_i(m)} \cdot \Delta P(m) \rightarrow \\ \rightarrow F_{m, ((m-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j} \quad (113)$$

○ $m'' = m - m_p - m_o - m(rp)_i \geq 1$ に対して

$$F_{m, ((m''-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j} + L R P \cdot \frac{P''_i(m'')}{W_i(m'')} \cdot \Delta P(m'') \rightarrow \\ \rightarrow F_{m, ((m''-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j}, \quad (114)$$

○ $\ell = m - m_o + 1, m - m_o + 2, \dots, m - m(rp)_i \geq 1$ に対して

$$F_{m, ((\ell-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j} - L F P \cdot \frac{P'_i(m) \cdot T_j(m)}{B_i(m) \cdot T_o} \cdot \Delta P(\ell) \rightarrow \\ \rightarrow F_{m, ((\ell-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j}, \quad (115)$$

○ $\ell = m' - m_o + 1, m' - m_o + 2, \dots, m' - m(rp)_i \geq 1$,

$m' = m - m_p - m(rp)_i \geq 1$ に対して

$$F_{m, ((\ell-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j} + L R P \cdot \frac{P''_i(m') \cdot T_j(m')}{B_i(m') \cdot T_o} \cdot \Delta P(\ell) \rightarrow$$

$$\rightarrow F_m, [(l-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j, \quad (116)$$

の計算を $1 \leq j \leq J, 1 \leq i \leq I, 1 \leq m \leq M$ の範囲にわたつて行なう。

$\vec{\zeta} = (\zeta_m), \vec{\eta} = (\eta_m)$ は M 次元列ベクトルでその成分は、

$$\zeta_m = E C P U (m - m_p) - A P U (m - m_p), \quad (117)$$

$$\eta_m = -A P U (m - m_p) \quad (118)$$

である。E C P U (m - m_p), A P U (m - m_p) は外部より入力される量で、それぞれプルトニウム余剰に対する上制限値ならびに輸入量である。

(8) ウラン 233 余剰生成量 (年度毎)

年度毎のウラン 233 余剰生成量は (68) 式で計算される。この式において $m' = m + m_3$ と m' を m' に変換した後ベクトル表式化を行なう。その結果のみを以下に示す。

$$\vec{\zeta} \leq G \vec{\alpha} \leq \vec{\beta}, \quad (119)$$

但し、 $G = (G_{x,y})$ は M 行、 $J \times I \times M$ 列のマトリックスでその要素を零セットした後 m を固定して

$$\begin{aligned} & \circ G_m, [(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j - L F 3 \cdot \frac{3_i(m)}{W_i(m)} \cdot \Delta P(m) \rightarrow \\ & \rightarrow G_m, [(m-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j, \quad (120) \end{aligned}$$

$\circ m'' = m - m_3 - m_0 - m(r)_i \geq 1$ に対して

$$\begin{aligned} & G_m, [(m''-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j + L R 3 \cdot \frac{3_i''(m'')}{W_i(m'')} \cdot \Delta P(m'') \rightarrow \\ & \rightarrow G_m, [(m''-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j, \quad (121) \end{aligned}$$

$\circ \ell = m - m_0 + 1, m - m_0 + 2, \dots, m - m(r)_i \geq 1$ に対して

$$\begin{aligned} & G_m, [(l-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j - L F 3 \cdot \frac{3_i'(m) \cdot T_i(m)}{B_i(m) \cdot T_0} \cdot \Delta P(\ell) \rightarrow \\ & \rightarrow G_m, [(l-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j, \quad (122) \end{aligned}$$

$\circ \ell = m' - m_0 + 1, m' - m_0 + 2, \dots, m' - m(r)_i \geq 1,$

$m' = m - m_3 - m(r)_i \geq 1$ に対して

$$\begin{aligned} & G_m, [(l-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j + L R 3 \cdot \frac{3_i'(m') \cdot T_i(m')}{B_i(m') \cdot T_0} \cdot \Delta P(\ell) \rightarrow \\ & \rightarrow G_m, [(l-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j, \quad (123) \end{aligned}$$

の計算を $1 \leq j \leq J, 1 \leq i \leq I, 1 \leq m \leq M$ の範囲にわたつて行なう。

$\vec{\beta} = (\beta_m), \vec{\alpha} = (\alpha_m)$ は M 次元列ベクトルでその成分は

$$\beta_m = E C 3 (m - m_3) - A 3 (m - m_3), \quad (124)$$

$$\alpha_m = -A 3 (m - m_3) \quad (125)$$

である。E C 3 (m - m_3) はウラン 233 の余剰生成量の上限值を示し、A 3 (m - m_3) は輸入量で、それぞれ外部より入力される量である。

(9) 天然ウラン消費量 (年度積算)

年度 m までの積算消費量に上限制約条件を置く場合の制約式を以下に示した。

$$\vec{O}' \leq D' \vec{a} \leq \vec{\delta}', \quad (126)$$

但し、 $D' = (D'_{x,y})$ は M 行、 $J \times I \times M$ 列のマトリックスでその要素はマトリックス D の要素を用いて次のように計算する。

$$D' = (D'_1, D'_2, \dots, D'_m, \dots, D'_M), \quad (127)$$

$$D'_m = \sum_{\ell=1}^m D_{\ell}, \quad (128)$$

但し、 D_{ℓ} は D マトリックスのコラム要素より作られるコラム・ベクトルである。

$\vec{O}' = (O'_m)$ 、 $\vec{\delta}' = (\delta'_m)$ は M 次元列ベクトルで、その要素は

$$O'_m = 0.0, \quad (129)$$

$$\delta'_m = ACU(m - m_U) \quad (130)$$

である。上記の計算は $1 \leq m \leq M$ の範囲で行なう。また $ACU(m - m_U)$ は外部入力量である。

(10) 実効天然ウラン消費量 (年度積算)

年度 m までの積算消費量に上限制約条件を置く場合の制約式を以下に示した。

$$\vec{O}' \leq E' \vec{a} \leq \vec{\varepsilon}', \quad (131)$$

但し、 $E' = (E'_{x,y})$ は M 行、 $J \times I \times M$ 列のマトリックスでその要素はマトリックス E の要素を用いて

$$E' = (E'_1, E'_2, \dots, E'_m, \dots, E'_M), \quad (132)$$

$$E'_m = \sum_{\ell=1}^m E_{\ell} \quad (133)$$

のように計算する。ここで E_{ℓ} はマトリックス E のコラム要素より作られるコラム・ベクトルである。

$\vec{O}' = (O'_m)$ 、 $\vec{\varepsilon}' = (\varepsilon'_m)$ は M 次元列ベクトルでその成分は

$$O'_m = 0.0, \quad (134)$$

$$\varepsilon'_m = ACEU(m - m_U) \quad (135)$$

である。上記の計算は $1 \leq m \leq M$ の範囲で行なう。 $ACEU(m - m_U)$ は外部入力量である。

(11) プルトニウム余剰生成量 (年度積算)

年度 m までの積算余剰生成量に上限制約条件を置く場合の制約式を以下に示した。

$$\vec{\eta}' \leq F' \vec{a} \leq \vec{\zeta}', \quad (136)$$

但し、 $F' = (F'_{x,y})$ は M 行、 $J \times I \times M$ 列のマトリックスでその要素はマトリックス F の要素を用いて

$$F' = (F'_1, F'_2, \dots, F'_m, \dots, F'_M), \quad (137)$$

$$F'_m = \sum_{\ell=1}^m F_{\ell} \quad (138)$$

のように計算する。ここで F_{ℓ} は F マトリックスのコラム要素よりなるコラム・ベクトルである。

$\vec{\eta}' = (\eta'_m)$ 、 $\vec{\zeta}' = (\zeta'_m)$ は M 次元列ベクトルで、その要素は

$$\zeta'_m = \text{AECPU}(m-m_p) - \text{AAPU}(m-m_p), \quad (139)$$

$$\eta'_m = -\text{AAPU}(m-m_p) \quad (140)$$

である。AECPU($m-m_p$), AAPU($m-m_p$) は外部入力量であり、上記の計算は $1 \leq m \leq M$ の範囲で行なう。

(12) ウラン 233 余剰生成量 (年度積算)

年度 m までの積算余剰生成量に上限制約条件を置く場合の制約式を以下に示した。

$$\vec{c}' \leq G' \vec{a} \leq \vec{d}' \quad (141)$$

但し、 $G' = (G'_{x,y})$ は M 行、 $J \times I \times M$ 列のマトリックスでその要素はマトリックス G の要素を用いて

$$G' = (G'_1, G'_2, \dots, G'_m, \dots, G'_M), \quad (142)$$

$$G'_m = \sum_{\ell=1}^m G_{\ell}, \quad (143)$$

のように計算する。ここで G_{ℓ} は G マトリックスの ℓ 列要素よりなる $J \times I$ マトリックスである。

$\vec{c}' = (c'_m)$, $\vec{d}' = (d'_m)$ は M 次元列ベクトルで、その要素は、

$$c'_m = \text{AEC3}(m-m_3) - \text{AA3}(m-m_3), \quad (144)$$

$$d'_m = -\text{AA3}(m-m_3) \quad (145)$$

である。AEC3($m-m_3$), AA3($m-m_3$) は外部入力量である。上記各量は $1 \leq m \leq M$ の範囲で計算する。

(13) システム・コスト (年度積算)

年度 m までの積算システム・コストに上限制約条件を置く場合の制約式を以下に示した。

$$\vec{0} \leq H \vec{a} \leq \vec{\kappa}, \quad (146)$$

但し、 $H = (H_{x,y})$ は M 行、 $J \times I \times M$ 列のマトリックスでその要素は $\ell = n - m_0 + 1, n - m_0 + 2, \dots, n, \ell \geq 1$ に対して

$$H_{m, [(l-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j} + \frac{\left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot \left(\mu_i(\ell) f_{ij}(\ell) + v_{ij}(n) \cdot T_j(n) \right)}{\sum_{n=1}^m \left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot Q(n)} \times \Delta P(\ell) \rightarrow H_{m, [(n-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j}, \quad (147)$$

の計算を $n = 1, 2, \dots, m$ まで行なう。

また、 $\vec{0} = (0_m)$, $\vec{\kappa} = (\kappa_m)$ は M 次元列ベクトルで、その要素は

$$0_m = 0.0, \quad (148)$$

$$\kappa_m = \text{CC}(m) \quad (149)$$

である。CC(m) はシステム・コストの上限値で年度毎に外部より入力する。

6 入力量

本計算コードの使用にあつて必要な入力量の一覧をまとめて Table 2 に示しておいた。本表には単位も合せて示してある。Table 3 には入力データのカード形式が示されている。

入力データの作成にあつては次の諸点に注意が必要である。変数 I, J, M は計算コード内で可変にできるようにとられているが、それらの値には次の制約がある。 $I \times J \times M \leq 1000$, $I \times J \leq 500$, $J \times M \leq 500$, $I \times M \leq 1000$, $I \leq 10$, $J \leq 5$, $M \leq 100$ 。これらの制約条件を満たす範囲内においてのみ I, J, M を選択することができる。

7 出力量

本計算コードで出力される量は入力量 1 式ならびに次の出力量である。

$\Delta P(m)$	増分設備容量 (年度)
$P_{ij}(m)$	設備容量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$\Delta P_{ij}(m)$	増分設備容量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$r_{ij}(m)$	廃棄設備容量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$\alpha_{ij}(m)$	増分設備容量比率 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$F_{ij}(m)$	資本投資額 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$V_{ij}(m)$	燃料・運転維持費 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$FI_{ij}(m)$	初装荷燃料量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$FB_{ij}(m)$	取替燃料量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$UI_{ij}(m)$	初装荷燃料内濃縮ウラン量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$PI_{ij}(m)$	初装荷燃料内分裂性プルトニウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$TI_{ij}(m)$	初装荷燃料内トリウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$3I_{ij}(m)$	初装荷燃料内ウラン 233 量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$UB_{ij}(m)$	取替燃料内濃縮ウラン量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$PB_{ij}(m)$	取替燃料内分裂性プルトニウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$TB_{ij}(m)$	取替燃料内トリウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$3B_{ij}(m)$	取替燃料内ウラン 233 量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$UR_{ij}(m)$	取替使用済燃料内濃縮ウラン量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)*1
$PR_{ij}(m)$	取替使用済燃料内分裂性プルトニウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)*1
$TR_{ij}(m)$	取替使用済燃料内トリウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)*1

*1 取替使用済 = 取替燃料に対応する使用済燃料。

6 入力量

本計算コードの使用にあつて必要な入力量の一覧をまとめてTable 2に示しておいた。本表には単位も合せて示してある。Table 3には入力データのカード形式が示されている。

入力データの作成にあつては次の諸点に注意が必要である。変数I, J, Mは計算コード内で可変にできるようにとられているが、それらの値には次の制約がある。 $I \times J \times M \leq 1000$, $I \times J \leq 500$, $J \times M \leq 500$, $I \times M \leq 1000$, $I \leq 10$, $J \leq 5$, $M \leq 100$ 。これらの制約条件を満たす範囲内においてのみI, J, Mを選択することができる。

7 出力量

本計算コードで出力される量は入力量1式ならびに次の出力量である。

ΔP_{ij} (m)	増分設備容量 (年度)
P_{ij} (m)	設備容量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
ΔP_{ij} (m)	増分設備容量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
r_{ij} (m)	廃棄設備容量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
α_{ij} (m)	増分設備容量比率 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
F_{ij} (m)	資本投資額 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
V_{ij} (m)	燃料・運転維持費 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
FI_{ij} (m)	初装荷燃料量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
FB_{ij} (m)	取替燃料量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
UI_{ij} (m)	初装荷燃料内濃縮ウラン量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
PI_{ij} (m)	初装荷燃料内分裂性プルトニウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
TI_{ij} (m)	初装荷燃料内トリウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$3I_{ij}$ (m)	初装荷燃料内ウラン233量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
UB_{ij} (m)	取替燃料内濃縮ウラン量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
PB_{ij} (m)	取替燃料内分裂性プルトニウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
TB_{ij} (m)	取替燃料内トリウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$3B_{ij}$ (m)	取替燃料内ウラン233量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分)
UR_{ij} (m)	取替使用済燃料内濃縮ウラン量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分) *1
PR_{ij} (m)	取替使用済燃料内分裂性プルトニウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分) *1
TR_{ij} (m)	取替使用済燃料内トリウム量 (年度, 発電所型式, 負荷率区分) *1

*1 取替使用済 = 取替燃料に対応する使用済燃料。

$3R_{ij}(m)$	取替使用済燃料内ウラン233量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*1
$UIR_{ij}(m)$	廃棄使用済燃料内濃縮ウラン量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*2
$PIR_{ij}(m)$	廃棄使用済燃料内分裂性プルトニウム量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*2
$TIR_{ij}(m)$	廃棄使用済燃料内トリウム量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*2
$3IR_{ij}(m)$	廃棄使用済燃料内ウラン233量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*2
$NUI_{ij}(m)$	初装荷天然ウラン量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*3
$NUB_{ij}(m)$	取替天然ウラン量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*3
$NUR_{ij}(m)$	取替使用済天然ウラン量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*4
$NUIR_{ij}(m)$	廃棄使用済天然ウラン量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*5
$NU_{ij}(m)$	天然ウラン量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$NRU_{ij}(m)$	使用済天然ウラン量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*6
$PUI_{ij}(m)$	分裂性プルトニウム所要量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$PUY_{ij}(m)$	分裂性プルトニウム生成量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$U3I_{ij}(m)$	ウラン233所要量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$U3Y_{ij}(m)$	ウラン233生成量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$HI_{ij}(m)$	トリウム所要量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$HR_{ij}(m)$	トリウム回収量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)
$SI_{ij}(m)$	初装荷分離作業量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*7
$SB_{ij}(m)$	取替分離作業量(年度, 発電所型式, 負荷率区分)*8
$NU(m)$	天然ウラン所要量(年度)
$NRU(m)$	使用済燃料の天然ウラン換算量(年度)
$ENU(m)$	実効天然ウラン所要量(年度)
$PUI(m)$	分裂性プルトニウム所要量(年度)
$PUY(m)$	分裂性プルトニウム生成量(年度)
$EPU(m)$	分裂性余剰プルトニウム生成量(年度)
$U3I(m)$	ウラン233所要量(年度)
$U3Y(m)$	ウラン233生成量(年度)
$EU3(m)$	ウラン233余剰生成量(年度)
$HI(m)$	トリウム所要量(年度)
$HR(m)$	トリウム回収量(年度)
$EH(m)$	実効トリウム所要量(年度)
$ANU(M)$	積算天然ウラン所要量(年度)
$ANRU(M)$	積算使用済燃料の天然ウラン換算量

*2 廃棄使用済=廃棄炉心より取出される使用済燃料の意である。 *3 天然ウラン換算量。 *4 取替燃料に対応する使用済燃料の天然ウラン換算量。 *5 廃棄炉心より取出された使用済燃料の天然ウラン換算量。
*6 天然ウラン換算量。 *7 初装荷燃料に対応する分離作業量。 *8 取替燃料に対応する分離作業量である。

AENU (M)	積算実効天然ウラン所要量
APUI (M)	積算分裂性プルトニウム所要量
APUY (M)	積算分裂性プルトニウム生成量
AEPU (M)	積算分裂性プルトニウム余剰生成量
AU3I (M)	積算ウラン233所要量
AU3Y (M)	積算ウラン233生成量
AEU3 (M)	積算ウラン233余剰生成量
AHI (M)	積算トリウム所要量
AHR (M)	積算トリウム回収量
AEH (M)	積算実効トリウム所要量
Z (M)	システム総コスト
C (M)	システム単位コスト

以上の諸量の他にシステム・コストに関連する下記の量を算出して出力する。

$$Z(m) = \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot \left[F_{ij}(n) + V_{ij}(n) \right], \quad (150)$$

$$C(m) = Z(m) / \left[\sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot P_{ij}(n) \cdot T_j(n) \right], \quad (151)$$

$$Z_{ij}(m) = \sum_{n=1}^m \left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot \left[F_{ij}(n) + V_{ij}(n) \right], \quad (152)$$

$$C_{ij}(m) = Z_{ij}(m) / \left[\sum_{n=1}^m \left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot P_{ij}(n) \cdot T_j(n) \right]. \quad (153)$$

$Z(m)$, $C(m)$ は年度毎のシステム総コスト，ならびにシステム単位発電コストである。 m の変域は1～Mである。 $Z_{ij}(m)$, $C_{ij}(m)$ は年度毎の発電所型式 i ，負荷率区分 j に属する発電所の総コストならびに単位発電コストであつて， $m=1 \sim M$ ， $i=1 \sim I$ ， $j=1 \sim J$ にわたつて計算され，また出力される。

8 あ と が き

まえがきにも述べた通り，本計算コードを開発した目的は，これを用いて原子力発電所，火力発電所の投入計画を分析して最適投入に関する指針を得るところにある。本計算コードを用いて分析できる事項は，発電所個々の設備投入量，発電所を運転するために必要な燃料量，発電所投入のために必要な資本費，燃料費，運転維持費，系統の総合コストならびに単位発電コスト，等である。

本計算コードはIBM-360機種で使用可能であり，使用言語はFORTRAN-IVである。標準的な問題，例えば計算年度数=20，発電所型式数=6，負荷率区分数=1，目的関数にシステム・コストを選び，制約条件として年度毎に設備投入率，新設設備量の上下限値，発生

AENU (M)	積算実効天然ウラン所要量
APUI (M)	積算分裂性プルトニウム所要量
APUY (M)	積算分裂性プルトニウム生成量
AEPU (M)	積算分裂性プルトニウム余剰生成量
AU3I (M)	積算ウラン233所要量
AU3Y (M)	積算ウラン233生成量
AEU3 (M)	積算ウラン233余剰生成量
AHI (M)	積算トリウム所要量
AHR (M)	積算トリウム回収量
AEH (M)	積算実効トリウム所要量
Z (M)	システム総コスト
C (M)	システム単位コスト

以上の諸量の他にシステム・コストに関連する下記の量を算出して出力する。

$$Z(m) = \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot \left[F_{ij}(n) + V_{ij}(n) \right], \quad (150)$$

$$C(m) = Z(m) / \left[\sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot P_{ij}(n) \cdot T_j(n) \right], \quad (151)$$

$$Z_{ij}(m) = \sum_{n=1}^m \left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot \left[F_{ij}(n) + V_{ij}(n) \right], \quad (152)$$

$$C_{ij}(m) = Z_{ij}(m) / \left[\sum_{n=1}^m \left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot P_{ij}(n) \cdot T_j(n) \right]. \quad (153)$$

$Z(m)$, $C(m)$ は年度毎のシステム総コスト，ならびにシステム単位発電コストである。 m の変域は1～ M である。 $Z_{ij}(m)$, $C_{ij}(m)$ は年度毎の発電所型式 i ，負荷率区分 j に属する発電所の総コストならびに単位発電コストであつて， $m=1 \sim M$ ， $i=1 \sim I$ ， $j=1 \sim J$ にわたつて計算され，また出力される。

8 あ と が き

まえがきにも述べた通り，本計算コードを開発した目的は，これを用いて原子力発電所，火力発電所の投入計画を分析して最適投入に関する指針を得るところにある。本計算コードを用いて分析できる事項は，発電所個々の設備投入量，発電所を運転するために必要な燃料量，発電所投入のために必要な資本費，燃料費，運転維持費，系統の総合コストならびに単位発電コスト，等である。

本計算コードはIBM-360機種で使用可能であり，使用言語はFORTRAN-IVである。標準的な問題，例えば計算年度数=20，発電所型式数=6，負荷率区分数=1，目的関数にシステム・コストを選び，制約条件として年度毎に設備投入率，新設設備量の上下限値，発生

電力時間，負荷率変動巾，天然ウラン消費量，実効天然ウラン消費量，プルトニウム余剰生成量，ウラン233余剰生成量の8ヶを用いた場合の計算時間は5分であつた。

本計算コードの最大の欠点は発電所の耐用年数を型式毎に同一の数値をとつているところにある。これを型式毎に変えて一般化することは勿論可能ではあるが，表式が複雑になる。将来，本計算コードの改良を行なうとすれば耐用年数を炉型式毎に変えるとか，さらには燃料の調達，再使用に必要な進み時間，おくれ時間，などを発電所の型式毎に変えられるように変更することである。また，今回のモデルでは総設備量を入力量として与える仕組になつているが，これを求める問題もある。すなわち発電々力量と負荷率曲線のみを与えて系統を運転するのに必要な設備量を求めるのである。

謝 辞

本計算コードの作成にあたり科学技術庁原子力局の吉本秀幸，林敏和両氏による御指導があつた。ここに謝意を表す。またコード作成にあつては，日本アイ・ビー・エム社の吉森正大氏に負うところ多であつた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 原子力局 ; “原子力発電分科会報告書(基礎資料編)”，昭和47年1月
- (2) 日本原子力産業会議 ; “2000年にいたる原子力構想(原子力産業長期計画委員会報告書)”，(1971)。
- (3) 大井 宏，二木 康 ; “ウラン所要量計算コードNURANについて”，東電研資 B68012 (1968)。
- (4) A.A.de Boer, J.C. Leclercq, W.de Haan ; “Computer Programs to Determine The Contribution of Nuclear Energy to Electric Power Production”，IAEA-SM-139/45 (1970)。
- (5) 安川 茂，篠原慶邦，島崎潤也 ; “核燃料需要・推定計算コード FUEL-DEMAND”，JAERI-memo 第3572号 (未公開)(1969)。
- (6) 安川 茂，古橋 晃 ; “核燃料需要・推定計算コード FUEL-DEMAND II”，JAERI-memo 第3946号 (未公開)(1970)。

電力時間，負荷率変動巾，天然ウラン消費量，実効天然ウラン消費量，プルトニウム余剰生成量，ウラン233余剰生成量の8ヶを用いた場合の計算時間は5分であつた。

本計算コードの最大の欠点は発電所の耐用年数を型式毎に同一の数値をとつているところにある。これを型式毎に変えて一般化することは勿論可能ではあるが，表式が複雑になる。将来，本計算コードの改良を行なうとすれば耐用年数を炉型式毎に変えるとか，さらには燃料の調達，再使用に必要な進み時間，おくれ時間，などを発電所の型式毎に変えられるように変更することである。また，今回のモデルでは総設備量を入力量として与える仕組みになつているが，これを求める問題もある。すなわち発電々力量と負荷率曲線のみを与えて系統を運転するのに必要な設備量を求めるのである。

謝 辞

本計算コードの作成にあたり科学技術庁原子力局の吉本秀幸，林敏和両氏による御指導があつた。ここに謝意を表す。またコード作成にあつては，日本アイ・ビー・エム社の吉森正大氏に負うところ多であつた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 原子力局 ; “原子力発電分科会報告書(基礎資料編)”，昭和47年1月
- (2) 日本原子力産業会議 ; “2000年にいたる原子力構想(原子力産業長期計画委員会報告書)”，(1971)。
- (3) 大井 宏，二木 康 ; “ウラン所要量計算コードNURANについて”，東電研資 B68012 (1968)。
- (4) A.A.de Boer, J.C. Leclercq, W.de Haan ; “Computer Programs to Determine The Contribution of Nuclear Energy to Electric Power Production”，IAEA-SM-139/45 (1970)。
- (5) 安川 茂，篠原慶邦，島崎潤也 ; “核燃料需要・推定計算コード FUEL-DEMAND”，JAERI-memo 第3572号 (未公開)(1969)。
- (6) 安川 茂，古橋 晃 ; “核燃料需要・推定計算コード FUEL-DEMAND II”，JAERI-memo 第3946号 (未公開)(1970)。

電力時間，負荷率変動巾，天然ウラン消費量，実効天然ウラン消費量，プルトニウム余剰生成量，ウラン233余剰生成量の8ヶを用いた場合の計算時間は5分であつた。

本計算コードの最大の欠点は発電所の耐用年数を型式毎に同一の数値をとつているところにある。これを型式毎に変えて一般化することは勿論可能ではあるが，表式が複雑になる。将来，本計算コードの改良を行なうとすれば耐用年数を炉型式毎に変えるとか，さらには燃料の調達，再使用に必要な進み時間，おくれ時間，などを発電所の型式毎に変えられるように変更することである。また，今回のモデルでは総設備量を入力量として与える仕組になつているが，これを求める問題もある。すなわち発電々力量と負荷率曲線のみを与えて系統を運転するのに必要な設備量を求めるのである。

謝 辞

本計算コードの作成にあたり科学技術庁原子力局の吉本秀幸，林敏和両氏による御指導があつた。ここに謝意を表す。またコード作成にあつては，日本アイ・ビー・エム社の吉森正大氏に負うところ多であつた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 原子力局 ; “原子力発電分科会報告書(基礎資料編)”，昭和47年1月
- (2) 日本原子力産業会議 ; “2000年にいたる原子力構想(原子力産業長期計画委員会報告書)”，(1971)。
- (3) 大井 宏，二木 康 ; “ウラン所要量計算コードNURANについて”，東電研資 B68012 (1968)。
- (4) A.A.de Boer, J.C. Leclercq, W.de Haan ; “Computer Programs to Determine The Contribution of Nuclear Energy to Electric Power Production”，IAEA-SM-139/45 (1970)。
- (5) 安川 茂，篠原慶邦，島崎潤也 ; “核燃料需要・推定計算コード FUEL-DEMAND”，JAERI-memo 第3572号 (未公開)(1969)。
- (6) 安川 茂，古橋 晃 ; “核燃料需要・推定計算コード FUEL-DEMAND II”，JAERI-memo 第3946号 (未公開)(1970)。

Table 2 Description of Input Data

Item No.	Mathematical Notation	Comments	Units
1	M	Maximum number of fiscal year.	
2	I	Maximum number of types of stations.	
3	J	Maximum number of the partitions of load factor.	
4	$P(m)$	System capacity of the installation in m th fiscal year.	kw(e)
5	$Q(m)$	System electric power generated in m th fiscal year.	kw.hr
6	$\Delta P_i^C(m)$	Lower limit of the installation capacity of i th type of station in m th fiscal year.	kw(e)
7	$\Delta P_i^L(m)$	Upper limit of the installation capacity of i th type of station in m th fiscal year.	kw(e)
8	$T_j(m)$	Operation hour of j th load range in m th fiscal year.	hr.
9	$b_j(m)$	Fraction of j th load range in m th fiscal year.	
10	$f_{ij}(m)$	Capital cost of i th type of station which is installed in j th load range in m th fiscal year.	\$/kw(e)
11	$v_{ij}(m)$	Fuel and operation cost of i th type of station which is installed in j th load range in m th fiscal year.	\$/kw(e).hr
12	$r(m)$	Discount factor in m th fiscal year.	$\% \times 0.01$
13	$\mu_i(m)$	Working capital interest rate of i th type of station in m th fiscal year.	$\% \times 0.01$

Item No.	Mathematical Notation	Comments	Units
14	$u_i(m)$	Uranium, fissile plutonium, thorium and uranium 233 contents in the initial loaded fuel of i th type of station installed in m th fiscal year.	W/O \times 0.01
15	$p_i(m)$		
16	$t_i(m)$		
17	$z_i(m)$	Uranium, fissile plutonium, thorium and uranium 233 contents in the replaced fuel of i th type of station installed in m th fiscal year.	W/O \times 0.01
18	$u_i'(m)$		
19	$p_i'(m)$		
20	$t_i'(m)$	Uranium, fissile plutonium, thorium and uranium 233 contents in the depleted fuel which is taken out from reloaded core of i th type of station installed in m th fiscal year.	W/O \times 0.01
21	$z_i'(m)$		
22	$u_i''(m)$		
23	$p_i''(m)$	Uranium, fissile plutonium, thorium and uranium 233 contents in the depleted fuel which is taken out from disused core of i th type of station in m th fiscal year.	W/O \times 0.01
24	$t_i''(m)$		
25	$z_i''(m)$		
26	$u_i'''(m)$	Uranium fuel enrichments for the initial and replaced fuels of i th type of station installed in m th fiscal year.	W/O \times 0.01
27	$p_i'''(m)$		
28	$t_i'''(m)$		
29	$z_i'''(m)$	Uranium fuel enrichments for the initial and replaced fuels of i th type of station installed in m th fiscal year.	W/O \times 0.01
30	$e_i(m)$		
31	$e_i'(m)$		

Item No.	Mathematical Notation	Comments	Units
32	$e_i^{n(m)}$	Contents of ^{235}U in the depleted fuels obtained from reloaded core and disused core of i th type of station.	$\text{W/O} \times 0.01$
33	$e_i^{m(m)}$		$\text{W/O} \times 0.01$
34	$e_o(m)$		Tail enrichment of diffusion plant.
35	e_N	^{235}U content in natural uranium.	$\text{W/O} \times 0.01$
36	$W_i(x)$	Specific power of i th type of station installed in m th fiscal year.	$\text{kW(e)}/\text{kg}$
37	$B_i(m)$	Fuel burnup of i th type of station installed in m th fiscal year.	$\text{kW(e)} \cdot \text{Yr}/\text{kg}$
38	$m(r)i$	Lagged time for first fuel reloading.	Year
39	$m(rp)i$	Lagged time for fuel reprocessing.	Year
40	m_u	Lead times for uranium, fissile plutonium, uranium 233, thorium fuel procurements.	Year
41	m_p		
42	m_3		
43	m_h	Uranium loss at conversion of U_{38} to UF_6 .	$\text{W/O} \times 0.01$
44	l_{lu}		
45	l_e		
46	l_{2u}	Uranium loss at conversion of UF_6 to UO_2 .	$\text{W/O} \times 0.01$
47	l_{fu}	Uranium loss at fuel fabrication.	$\text{W/O} \times 0.01$
48	l_r	Fuel loss at reprocessing.	$\text{W/O} \times 0.01$

Item No.	Mathematical Notation	Comments	Units
49	l_{3u}	Uranium loss at reconversion of uranium nitride to UF_6 .	$W/O \times 0.01$
50	l_{fp}	Fissile plutonium loss at fuel fabrication.	$W/O \times 0.01$
51	l_{3p}	Fissile plutonium loss at reconversion of plutonium nitride to metal.	$W/O \times 0.01$
52	l_{f3}	Uranium 233 loss at fuel fabrication.	$W/O \times 0.01$
53	l_{33}	Uranium 233 loss at reconversion of nitride to UF_6 .	$W/O \times 0.01$
54	l_{fh}	Thorium loss at fuel fabrication.	$W/O \times 0.01$
55	l_{3h}	Thorium loss at reconversion.	$W/O \times 0.01$
56	CU(m)	Upper limit of natural uranium supply in m th fisical year.	kg/Year
57	CEU(m)	Upper limit of natural uranium effective supply in m th fisical year.	kg/Year
58	ECPU(m)	Upper limit of excess fissile plutonium production in m th fisical year.	kg/Year
59	APU(m)	Imported fissile plutonium in m th fisical year.	kg/Year
60	EC3(m)	Upper limit of excess uranium 233 production in m th fisical year.	kg/Year
61	A3(m)	Imported uranium 233 in m th fisical year.	kg/Year
62	ACU(m)	Upper limit of natural uranium supply accumulated from 1-m ₀ to m.	kg

Item No.	Mathematical Notation	Comments	Units
63	ACEU(m)	Upper limit of natural uranium effective supply accumulated from $1-m_4$ to m.	kg
64	AECPU(m)	Upper limit of excess fissile plutonium production accumulated from $1-m_4$ to m.	kg
65	AAPU(m)	Accumulation of imported fissile plutonium.	kg
66	AEC3(m)	Upper limit of excess uranium 233 production accumulated from $1-m_3$ to m.	kg
67	AA3(m)	Accumulation of imported uranium 233.	kg
68	CC(m)	Upper limit of system cost in m th fiscal year.	\$/kW(e)hr.

付録 1. 目的関数をシステム・コストとする場合の標準形式

本文(11)式で与えられているシステム・コスト $C(M)$ をベクトル $\vec{\alpha}$, ベクトル $\vec{\omega}$ の内積として表式化する過程を以下に説明する。(11)式の分母の項のうち $\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{ij}(m) \cdot T_j(m)$ は本文(3)式より $Q(m)$ と表わせる。したがって

$$(11) \text{式} \text{の分母} = \sum_{m=1}^M \left(\prod_{\ell=1}^m \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot Q(m) \tag{A1}$$

である。分子の $V_{ij}(m)$ は $P_{ij}(m)$ に依存する量である。(4)式で定義されている $P_{ij}(m)$ においてこれをくり返し使用することによつて $P_{ij}(m)$ を $\Delta P_{ij}(m), \Delta P_{ij}(m-1), \dots$ で表示することができる。具体的には

$$\begin{aligned} P_{ij}(m) &= P_{ij}(m-1) + \Delta P_{ij}(m) - r_{ij}(m) \\ &= P_{ij}(m-1) + \Delta P_{ij}(m) - \Delta P_{ij}(m-m_0) \\ &\vdots \\ &= \left[\Delta P_{ij}(m) + \Delta P_{ij}(m-1) + \dots + \Delta P_{ij}(1) \right] - \left[\Delta P_{ij}(m-m_0) + \dots \right. \\ &\quad \left. \dots + \Delta P_{ij}(1-m_0) \right] + P_{ij}(0) \\ &= \sum_{\ell=1}^m \Delta P_{ij}(\ell) - \sum_{\ell=1-m_0}^{m-m_0} \Delta P_{ij}(\ell) + P_{ij}(0) \end{aligned} \tag{A2}$$

(A2)式において $\ell \leq 0$ で $\Delta P_{ij}(\ell) = 0.0, P_{ij}(0) = 0$ とすると, $P_{ij}(m)$ は結局 (A3) 式で表わすことができる。

$$P_{ij}(m) = \sum_{\ell=m-m_0+1}^m \Delta P_{ij}(\ell) \tag{A3}$$

(9)式で与えられている $V_{ij}(m)$ に (A3) 式を代入し, $F_{ij}(m) + V_{ij}(m)$ を作ると, (11)式で与えられる式は

$$C(M) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{\ell=m-m_0+1}^m \left(\prod_{\ell=1}^m \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot (\mu_i(\ell) f_{ij}(\ell) + v_{ij}(m) T_j(m)) \cdot \Delta H(\ell) \cdot \alpha_{ij}(\ell)}{\sum_{m=1}^M \left(\prod_{\ell=1}^m \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot Q(m)} \tag{A4}$$

と書き改められる。これをベクトル $\vec{\alpha}$ を用いて (78) 式のように表現すると $\vec{\omega}$ ベクトルの成分が (79) 式で示すように定義できる。

制約式 (146) の $H \vec{\alpha}$ は M 次元列ベクトルでその成分は (A4) 式で与えられている $C(M)$ において M を m に変えたものに他ならない。すなわち $H \vec{\alpha}$ は M 次元列ベクトル $(C(1), C(2), \dots, C(m), \dots, C(M))$ である。これをベクトル $\vec{\alpha}$ ならびにマトリックス H を用いてその積の形式に表現がえする。 $H \vec{\alpha}$ の第 m 番目の成分 $C(m)$ は $H, \vec{\alpha}$ を用いて

$$C(m) = \sum_{\ell=1}^M \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J H_{m, ((\ell-1) \cdot I + i - 1) \cdot J + j} \cdot \alpha_{ij}(\ell) \tag{A5}$$

と書けるはずであるから, (A4) 式において $M \rightarrow m, m \rightarrow n$ と変換した $C(m)$, すなわち

$$C(m) = \frac{\sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{\ell=n-m_0+1}^n \left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot (\mu_i(\ell) f_{ij}(\ell) + v_{ij}(n) T_j(n)) \cdot \Delta F(\ell) \alpha_{ij}(\ell)}{\sum_{n=1}^m \left(\prod_{\ell=1}^n \frac{1}{(1+r(\ell))} \right) \cdot Q(n)} \quad (\text{A6})$$

と直接に比較することにより $H_m, [(l-1) \cdot I + i - 1] \cdot J + j$ の要素を定義することができる。