

JAERI-M
83-123

レーザー濃縮プラントの経済評価

1983年8月

有沢 孝・柴 是行

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

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

レーザー濃縮プラントの経済評価

日本原子力研究所東海研究所燃料工学部

有沢 孝・柴 是行

(1983年7月11日受理)

現時点において得られる実験室規模でのデータに基づきプラントの運転特性を記述し、さらに生産設備およびエネルギー消費の両面からプラントの経済性について考察した。特性の考察においてはまずプラント構成を想定し、それらを構成する各コンポーネントについての設計を行い、次にコンポーネントコストの算出を行った。このコストに基づいて各基本パラメータのコストに与える感度の解析を行った。さらに製品コストに対してプラントの最適化を行うことにより経済プラント規模などに関する知見を得た。その結果、初期投資に占めるレーザー装置設備費および消費電力費に占める電子銃の割合の大きいことなどが明らかとなった。

Economic Evaluation of Laser Enrichment Plant

Takashi ARISAWA and Koreyuki SHIBA

Department of Fuels and Materials Research
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 11, 1983)

Operational characteristics of Laser Enrichment Plant are described based on the data available at present. And its economy is also discussed from the view point of investment and energy consumption. In the procedure of this estimation, the composition of the plant is firstly considered, secondly each component is designed, and thirdly the production cost of each component is estimated. Then the sensitivity of the component cost on the plant cost is analysed, which leads to the optimization of the product cost and the determination of the economic plant size, etc. The results shows that the power cost of the electric gun occupies the large majority of the total power cost, and that the capital cost of laser devices occupies most of the total capital cost.

Keywords : Laser Enrichment, Plant, Economic Evaluation,
Isotope Separation, Operation Cost, Power Cost

目 次

1. はじめに	1
2. プラントの概要	1
2.1 配 置	1
2.2 濃縮モジュールの構成	4
2.3 光源の種類	5
3. 基本計算式	8
3.1 レート方程式	8
3.2 照射条件に関する基本式	8
3.3 選択励起特性	10
3.4 濃縮作業量	11
3.5 最適化	12
4. コストの算出	15
4.1 レーザー装置	15
4.2 光学系	23
4.3 レーザー媒質	28
4.4 真空セル	30
4.5 真空排気系	32
4.6 電子銃	33
4.7 回収装置	36
4.8 プロセス建家	38
4.9 その他	39
5. 最適化計算	47
5.1 2段階光電離法	49
5.2 3段階光電離法	51
6. その他	53
7. おわりに	74
謝 辞	74
参考文献	74

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Concept of LIS plant	1
2.1 Facilities	1
2.2 Enrichment module	4
2.3 Light sources	5
3. Fundamental equations	8
3.1 Rate equations	8
3.2 Equations concerning laser irradiation	8
3.3 Selective excitation	10
3.4 Enrichment performance	11
3.5 Optimization method	12
4. Cost estimation	15
4.1 Laser devices	15
4.2 Optics	23
4.3 Laser medium	28
4.4 Vacuum cell	30
4.5 Evacuation system	32
4.6 Electron gun	33
4.7 Recovery system	36
4.8 Process buildings	38
4.9 Others	39
5. Optimization	47
5.1 Two-step-photoionization method	49
5.2 Three-step-photoionization method	51
6. Other comments	53
7. Summary	74
Acknowledgments	74
References	74

1. はじめに

レーザーを用いたウラン濃縮法は未だ確立された方法ではなく、目下のところ主要先進国において意欲的に研究が成されている段階である。従って原子法レーザー濃縮に限ってもかかわらずレーザー濃縮技術のうちどの方法がウラン濃縮を行うために最も適した方法であるかを明らかにしうるデータは現在のところほとんど無い。そこで、これらの方法を互いに比較しプラントとしての評価を行い問題点を把握するためには、現在入手可能なデータを用いてプラント設計を行うことが必要となってくる。

本報にて考察を加えた方式は、レーザー光により光電離を行う方法として代表的な3つのスキーム、すなわち2段階光電離、2光子光電離、3段階光電離である。またこれらの目的に使用されるレーザーとしては、ダイレーザーポンピング用あるいは電離用として今日最も効率が高くしかも平均出力も高いとされている銅蒸気レーザー、エキサイマーレーザー、それにYAGレーザーをあげることができる。銅蒸気レーザーでは 5105 \AA 、YAGレーザーでは第2高調波(SHG)の 5300 \AA でダイレーザーをポンプするが、エキサイマーレーザーではダイレーザーを介さずにその幅広いレーザー波長の中から紫外域のウラン原子スペクトルに直接合致する発振光をエタロンを用いて切り出し照射することも可能であろう。このような条件の下で、2段階および3段階光励起に対するレート方程式を解き、照射条件、選択励起特性を与えることにより分離作業量と動力が得られる。これに対して、レーザー装置、レーザー媒質、電子銃、真空セル、真空排気系、プラント建屋、空調設備、変電施設、インベントリー、制御機器に要するコストを算出しそれら装置の運転維持費や人件費を算出することができる。なお装置の減価償却や大量生産を考慮し、また年次による価格変動の検討も必要である。

このようにして求められたコストは機器の基本特性やプラント操作条件により変動するので、それらパラメータに対して生産コストを最も下げられるように最適化を行うことによりプラントの諸元が求められる。

2. プラントの概要

2.1 配 置

濃縮プラントの概要を知るために、原料から製品に到るまでの流れを追って説明する。まず原料ウラン金属受入れ施設により工場内に搬入された原料は、一たん原料貯蔵施設に貯蔵され、必要に応じて原料調整施設に送られる。ここで濃縮処理が行えるような形状に加工され原料供給施設に搬入される。金属ウランはコンベアによりプロセス建家内部を運搬され、同建家内部にある濃縮セルの内部へ真空搬入口を通して導入されルツボ上にセットされる。ウラン金属は真空中で補助電子銃により溶融され周囲が水冷されたルツボに供給される。ル

1. はじめに

レーザーを用いたウラン濃縮法は未だ確立された方法ではなく、目下のところ主要先進国において意欲的に研究が成されている段階である。従って原子法レーザー濃縮に限ってもかざあるレーザー濃縮技術のうちどの方法がウラン濃縮を行うために最も適した方法であるかを明らかにしうるデータは現在のところほとんど無い。そこで、これらの方法を互いに比較しプラントとしての評価を行い問題点を把握するためには、現在入手可能なデータを用いてプラント設計を行うことが必要となってくる。

本報にて考察を加えた方式は、レーザー光により光電離を行う方法として代表的な3つのスキーム、すなわち2段階光電離、2光子光電離、3段階光電離である。またこれらの目的に使用されるレーザーとしては、ダイレーザーポンピング用あるいは電離用として今日最も効率が高くしかも平均出力も高いとされている銅蒸気レーザー、エキサイマーレーザー、それにYAGレーザーをあげることができる。銅蒸気レーザーでは 5105 \AA 、YAGレーザーでは第2高調波(SHG)の 5300 \AA でダイレーザーをポンプするが、エキサイマーレーザーではダイレーザーを介さずにその幅広いレーザー波長の中から紫外域のウラン原子スペクトルに直接合致する発振光をエタロンを用いて切り出し照射することも可能であろう。このような条件の下で、2段階および3段階光励起に対するレート方程式を解き、照射条件、選択励起特性を与えることにより分離作業量と動力が得られる。これに対して、レーザー装置、レーザー媒質、電子銃、真空セル、真空排気系、プラント建屋、空調設備、変電施設、インベントリー、制御機器に要するコストを算出しそれら装置の運転維持費や人件費を算出することができる。なお装置の減価償却や大量生産を考慮し、また年次による価格変動の検討も必要である。

このようにして求められたコストは機器の基本特性やプラント操作条件により変動するので、それらパラメータに対して生産コストを最も下げられるように最適化を行うことによりプラントの諸元が求められる。

2. プラントの概要

2.1 配 置

濃縮プラントの概要を知るために、原料から製品に到るまでの流れを追って説明する。まず原料ウラン金属受入れ施設により工場内に搬入された原料は、一たん原料貯蔵施設に貯蔵され、必要に応じて原料調整施設に送られる。ここで濃縮処理が行えるような形状に加工され原料供給施設に搬入される。金属ウランはコンベアによりプロセス建家内部を運搬され、同建家内部にある濃縮セルの内部へ真空搬入口を通して導入されルツボ上にセットされる。ウラン金属は真空中で補助電子銃により溶融され周囲が水冷されたルツボに供給される。ル

ツボ内の原料は電子銃により蒸発され、コリメーターを介して原子ビームとなりその上部にある光反応部へと移動し、ここでレーザー装置から発せられるレーザー光が光学系を通して照射される。これらレーザー装置のレーザー媒質である各種ガス、色素は専用の循環装置により循環するようになっている。光によって処理された原子ビームはイオンとなって回収電極により回収され、また処理を受けなかったものは中性原子回収トラップにより回収される。回収ウランは移動電極によって回収器を通り集められる。レーザー光の処理を受けなかったウラン原子は回転式のトラップにより金属として集められる。これらは搬送器にまで送られ濃縮ウラン、減損ウランとして製品抽出し設備および廃棄材抽出し設備に集められる。濃縮度測定後、必要濃縮度に調整された濃縮ウランは酸化ウランあるいは金属ウランとして燃料加工工場へ送られる。また減損ウランは金属ウランとして装置に再供給され処理される。以下これら施設および付属施設の概要について述べる。

① 濃縮モジュール

濃縮モジュールは真空セル、真空セル排気装置、電子銃加熱装置、電子銃電源、ダイレーザーマスターオシレーター、ダイレーザーアンプ、ダイ循環装置、ポンプレーザーヘッド、ポンプレーザー電源、ポンプレーザー媒質供給装置、電離レーザーヘッド、電離レーザー電源、電離レーザー媒質供給装置等より成る。真空セルには冷却ハース、ルツボ、回収電極、中性原子回収装置などが含まれている。

② プロセス建屋

プロセス建屋内には濃縮モジュールが配置される。レーザー部分はほこりをきらうし、また温度・湿度コントロールが必要であるため環境コントロールが行われる。

③ 原料供給設備

金属ウラン原料をルツボに入れ易いような形状（棒状）に加工し濃縮モジュールにまで運搬するものである。

④ モジュール用変電設備

本設備は濃縮モジュールに使用されるレーザーや電子銃の電源に電力を供給するために設置され、主として計測用には 100 V、レーザーには 230 V 又 460 V、また電子銃には 460 V 以上の電源電圧が用いられる。

⑤ 高圧変電設備

商用の 6.6 k V 高圧を 1.8 k V に変圧し、モジュール用変電設備に供給する設備である。

⑥ 中央制御室

各モジュールの濃縮度管理、収量管理および保守管理を行うための室であり、以下各々について記述する。

- i) 濃縮度管理……濃縮モジュールの各処理位置においては濃縮度が微かながら異なる。従って製品濃縮度を管理するためには、幾つかのサンプリング部に Q-マスヘッドを取り付けて決められたサンプリング時間間隔で ^{235}U と ^{238}U との組成比をモニターすることが必要となる。最終的な濃縮度は各回収電極上の製品をブレンドすることによって求まる。
- ii) 収量管理……電極間に流れる全電流値は非常に大きいものとなるため通常の電流計によ

り測定を行うことが可能で、またこれよりイオン電流のみをモニターすれば刻々の収量を検知できる。しかし中性原子の付着量はこうした方法では測定できないため、超音波式あるいは水晶発振式のフラックスメーターにて総合的なモニターを行う必要がある。なお、このような中性原子は電極面に付着する事により濃縮度にも大きな影響を及ぼすので、モジュールを2～3群に分割し或る程度のマージンを持たせて運転を行い、最終製品の濃縮度を電極付着中性原子の混合調整により実施することも考えられる。

- iii) ポンプレーザー管理……一つのダイレーザーシステムに多数のポンプレーザーが使用される場合やポンプレーザー自体が多段アンプシステムを有する場合には高い精度の同期システムが必要である。銅蒸気レーザーは一定時間毎に銅試料、熱シールド、ウィンドウ、放電管、サイラトロン、キャパシター、ダイオードを、また、Nd:YAGレーザーは一定時間毎にYAGロッド、SHGクリスタル、フラッシュランプ、フェラデーローテーター、スパークギャップを交換するが、常時出力をモニターし出力変動のある場合には警報が出されるようになっている。また作動流体(冷却水やHeガス)の圧力、流量、湿度の他一定時間間隔でアライメント調整が行われる。
- iv) ダイレーザー管理……ダイレーザーには多段アンプ機構が用いられる。レーザー内部光学系はダイセルと共に一定期間毎に交換される。ダイは循環され、劣化したダイはフィルターで漏過され新たなダイを補充しつつ使用される。ダイレーザーオシレーターにおいては波長の管理が重要であるが、中心波長は自動的にフィードバック制御で一定位置に固定されるようになっている。モード調整も一定時間毎に必要なが、ダイレーザー自体は恒温室にあり、なるべく外乱の影響をさけるように工夫される。制御室コンソールにおいては特定波長の出力、ダイの流量、温度、恒温室温度がモニターされる。
- v) 電離レーザー管理……銅蒸気レーザー、Nd:YAGレーザーの他に希ガスハロゲンレーザーを用いる場合には、希積フッ素ガス(または塩素ガス)、希ガスの流量、温度、レーザー出力を管理する。これらガスはフィルターを通して高速で循環され、絶えず新しいガスが補充されるようになっている。レーザーヘッドやサイラトロンに対しては運転時間を記録し、一定時間毎に交換を行う。
- vi) 光学系管理……モジュールの中でも最も精密な管理を要するのは、ダイレーザーと並んで光学系である。通常は大出力レーザーをビームコンバイナーで合成し、段数の数(通常10段以下)だけ反復反射させるなどの精密な調整が必要となり、光学系の熱膨張などによる光路や出力の変動をモニター・制御しなければならない。このために位置検出器を用いてフィードバックを行ったり、あるいは恒温室に設置して温度管理を行ったりすることが必要である。

その他モニターおよび遠隔操作の必要な装置については全て中央制御室にて管理が行われるようになっている。

⑦ モジュールの組立て・修理建家

ここではレーザー電源、電子銃、レーザーヘッド、セル光学系等の組立て修理が行われる。

従ってこの建家内には光学調整台，各種電気測定器，工作機械，溶接器，作業台，クレーン，防塵作業室が設けられている。

⑧ 除染・洗浄建家

修理作業を行うものについてはこの建家で除染・洗浄を行い，汚染検査を行った後，他のエリアに搬出される。

⑨ ガス貯蔵施設

使用するレーザーに応じて，He，希ガス（Ar，Kr，Xe），希積フッ素ガスなどが，またセル分解等の際の酸化防止のため乾燥窒素，あるいは電極付着ウラン原子を酸化物として取出すための希積酸素が貯蔵されている。

⑩ ボイラー，冷水塔

恒温室を一定温度に保つために用いられる。

その他の付属施設を列挙すると，

⑪ 原料受入れ施設

⑫ 原料貯蔵庫

⑬ 一般倉庫

⑭ 汚染廃棄物ヤード

⑮ 管理事務棟

⑯ 技術サービス建家

⑰ 守衛詰め所

⑱ 消防設備

⑲ 車庫

⑳ 購売店，食堂

㉑ 正門，駐車場

などがあげられる。

2.2 濃縮モジュールの構成

Fig.1には濃縮スキームの種類を示した。ここで取り扱うのは，3-step，2-step，2-photon方式である。まず3-step方式はCVL（銅蒸気レーザー）によりポンプされるオレンジ色のダイレーザー光を3本使用して，一段目で選択励起し，これを2段，3段のオレンジ光のレーザーを用いて高リドベルク状態にまで励起したり自動電離レベルを利用する方式である。本方式では高効率，高繰返し数のCVLが使用できること，比較的発振効率の高いポリメチン系のダイが使用できることなどに特徴がある。本スキームにおいては，ダイレーザーオシレーターをCVLでポンプし，これを増幅してセルに照射するわけであるが，選択励起は基底状態ばかりからではなく高温にて占有率の高くなる準安定状態 620 cm^{-1} からも行う。こうして選択励起された原子はさらに同じ方式で次の段に励起される。この方式では高い精度で波長を制御しなければならない欠点はあるが，各段の遷移確率が高いこと，電離断面積が大きいなどの光学的な利点を有している。

次に 2-step 方式は、CVL または YAG の第 2 高調波によりポンプされたダイレーザーを用いてウラン原子のエネルギー状態を選択励起準位にまで上げ、さらに EXL (エキシマーレーザー) にて電離状態 (連続体) にまで励起するものである。本方式には励起波長を選ぶ点では自由度が大きいものの、電離断面積が小さいという欠点がある。このため自動電離状態に励起しうる波長を有する EXL を用いる必要がある。この方式においても基底状態の他、下位準安定状態からも選択的な励起が行われる。

次に 2-photon のシステムにおいては、1つの photon でウラン原子の選択励起を行うと同時に、同種の photon で電離も行われるため、レーザーが一台で済む (620 cm^{-1} からの励起を考えると 2 台必要) 代りに光電離断面積は著しく小さくなるという欠点を有する。

Fig. 2 にはセル内部の模式図を示す。電子銃加熱により蒸発したウラン金属は定められた開度で上方へと膨張してゆく。下方ではビームが拡がっていないのでレーザー照射のためには都合がよいが電荷交換が大きいため濃縮効率は下るし、反対に上方では電荷交換損失は少いがレーザーを照射するには都合が悪い。従って適切な位置にレーザー光を照射し、適当な間隔で配置された電極上に回収しなければならない。なお電荷交換や中性ウラン原子の電極への付着のため、一段だけの回収では廃棄材濃度を下げることができない。このため未回収ウラン原子に再度レーザー光を照射し、これを回収する。このように何段も励起・電離・回収を繰り返すことにより、廃棄材濃度を著しく下げることが可能となる。

2.3 光源の種類

前述したように原子法 LIS モジュールは、蒸発部、光反応部、回収部、その他ユーティリティ設備より構成されるが、中でも光反応部の設計評価が複雑である。これには、マスターコントロールコンソール、レーザー安定化装置、ポンプレーザー、ダイレーザー、プローブレーザー、レーザーアンプ、ビームコンビネーション、レーザーコントロール等が含まれている。使用可能なレーザーとしては、銅蒸気レーザー、ハロゲン化銅レーザー、ダイレーザー、 CO_2 レーザー、エキシマーレーザー、第 2 高調波 Nd・YAG レーザーがある。それらを概観すると以下のようなになる¹⁾。

i) 銅蒸気レーザー

コスト見積りは本レーザーに類似した製品 (例えばメタルハライドランプなど) のコスト依存性やレーザー開発経験に基づくコストの変遷より実施しうる。レーザーキャビティをシールドタイプにして価格を下げることも可能である。これは Ar レーザーで同様のことを行った場合コストが 26% 低減していることより類推できる。スケールアップについては作動温度条件が同一であるメタルハライドランプより類推が可能である。高圧電源について特に問題点はないが、サイクロトロンについては高いアノード加熱係数を持つものが必要である。

ii) 銅ハライドレーザー

スケールアップはフラッシュランプで類推したが、これは、銅蒸気レーザーが 1600°C であるのに対し、 $450 \sim 625^\circ\text{C}$ の範囲である故十分成立する。

iii) ダイレーザー

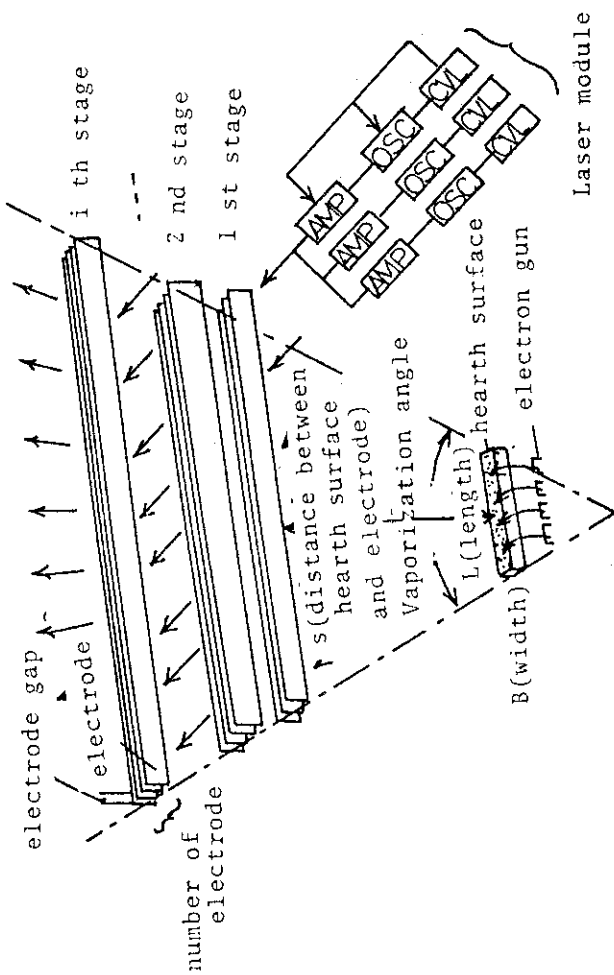
1977年度の価格ではダイレーザーメーカーのうちS P社(Spectra Physics Inc.)のダイレーザーは\$4150, MOLECTRON社は\$9370, またS-Cube社は\$2940となっている。損傷の最も著しいのは, 光学系であるがMOLECTRON社のDL-600で15000 hrsは稼動しうる。

iv) YAGレーザー

高繰返し数のQスイッチレーザーはCWランプを用いるため500~1000 hrsの寿命を持つ。Qスイッチ寿命は約1年といわれている。現状ではHugheのものが最適といわれる。

v) 光学系等

ビームコンバイナー, ミラー, コーティング, マウント, エクспанダー, ダイクロイックエレメント, ビームアライメント, 波長コントローラー, チェンバーウィンドウ, フレーム等がこの範ちゅうに入る。ミラーおよびコーティングは5000 hrs以上もつ。CO₂レーザーを用いる場合にはウィンドウとして75 cm直径のZn Seを用いるものとする。



Details of electrodes

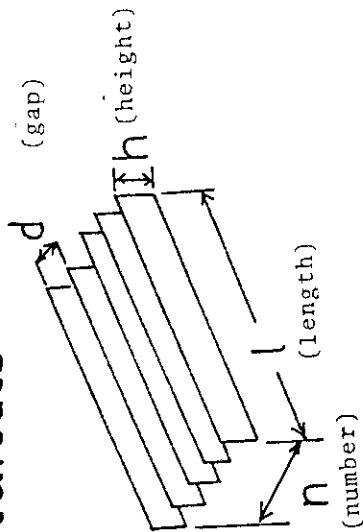
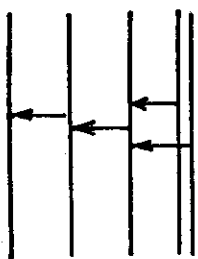


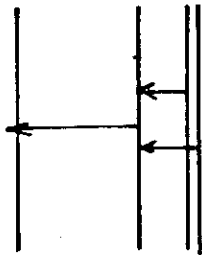
Fig. 2 Figure of electrode configuration

1. Copper Vapor Laser System



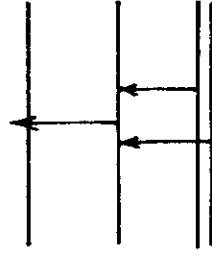
3-Step Photoionization

2. Copper Vapor Laser-Rare Gas Halide Laser System



2-Step Photoionization

3. Rare Gas Halide Laser System



2-Photon Photoionization

Fig. 1 Excitation scheme

3. 基本計算式

3.1 レート方程式

レート方程式については既に JAERI-M 83-135 (レーザー濃縮モジュールの設計概要) において導出したものを用いる。これらは、2段階選択励起・電離、3段階選択励起・電離に関するものであり、いずれも ^{235}U 濃度は非常に小さいものと仮定してある。この方程式系では ^{235}U , ^{238}U それぞれに対する擬似的な2群のレート方程式が構成されており、これらを解くことにより、電離される場合、濃縮度 (光電離状態において) が計算される。

3.2 照射条件に関する基本式

まず蒸気発生についてみると、ウラン蒸気速度 v_T (cm/s) および蒸気圧力 P_T (Torr) は次式で示される。

$$v_T = \sqrt{2 \kappa T N_0 / M} \quad (1)$$

$$\log_{10} P_T = C_1 / T + C_2 + C_3 \log_{10} (T) \quad (2)$$

ここに、

$$C_1 = -27330$$

$$C_2 = 17.3$$

$$C_3 = -2.0$$

である。従って密度 ρ (cm^{-3}) およびフラックス ϕ ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) は、

$$\rho = \frac{P_T}{760} \times \frac{273.15}{T} \times \frac{N_0}{22400} \quad (3)$$

$$\phi = \rho \cdot v_T \quad (4)$$

となる。ここに M はウラン原子量、 N_0 はアボガドロ数、 K はボルツマン常数、 T は温度 (K) である。衝突に伴う衝突平均寿命 τ_0 は、

$$\tau_0 = 1 / \sigma_0 \cdot \rho \cdot v_R \quad (5)$$

で示される。 σ_0 は U 原子間の衝突断面積、 v_R は衝突原子間の相対速度である。U には基底状態の他に準安定状態があるが、これら準安定準位のうち 620 cm^{-1} から選択的に励起を行うものとする、励起対象原子の占める割合は概略

$$X_v = (D_0 + D_1) / \sum_{i=0} \sum_{i=0} D_i \quad (6)$$

のように見積れる。ここに、

$$D_0 = 1$$

$$D_1 = 1.06 \exp(-620 c \cdot h / \epsilon T)$$

$$D_2 = 4.2 \exp(-3801 c \cdot h / \epsilon T)$$

$$D_3 = 4.5 \exp(-7006 c \cdot h / \epsilon T)$$

で、 c は光速、 h はプランク定数である。ここでは 620 cm^{-1} 、 3801 cm^{-1} 、 7006 cm^{-1} の下部三準位が考慮の対象となっている。次に照射部分の形状を考えると、原子ビームの流れに沿う方向に切れ目なしに原子にレーザー光を照射することを考えると、その高さ H (cm) は、

$$H = v_T / R_P \quad (7)$$

となる。ここに R_P はレーザーの毎秒パルス繰り返し数である。原子ビームの拡がりを考え、照射部分のレーザー照射方向長さ L と電極方向長さ B を求めると、

$$L = R_Z \cdot L_0 \quad (8)$$

$$B = R_Z \cdot B_0 \quad (9)$$

となる。ここに L_0 、 B_0 はルツボの形状である。 R_Z は原子ビーム拡大率を R_A として、

$$R_Z = \sqrt{R_A} \quad (10)$$

で与えられる。このときルツボ面から照射部分までの高さは、蒸発開き角を α とすれば、

$$R_0 = (R_Z - 1) B / 2 \tan(\alpha / 2) \quad (11)$$

で与えられる。多段で処理を行う場合には、さらに各段の原子ビーム幅の拡大率は、 n を段数として、

$$R_{Z,n} = \frac{R_0 + R_m + n H}{R_m} \quad (12)$$

$$R_m = B / 2 \tan(\alpha / 2)$$

で示される。全蒸発量 W は、

$$W = B \cdot L \cdot \phi / N_0 \cdot M \quad (13)$$

となる。光はレーザーの進行に従って減衰するのでここでは平均強度として入射光強度との比、

$$\varphi = \frac{1 - \exp(-\sigma L \rho x_F \cdot x_v)}{L \rho x_v x_F} \quad (14)$$

を平均減衰率として考慮することにする。

3.3 選択励起特性

^{235}U と ^{238}U に対する選択励起確率 W_1 , W_1' は次式で示される。

$$W_1 = \frac{\sigma_1 I_1}{h \nu_L} \phi_1 \quad (15)$$

$$W_1' = \frac{\sigma_1 I_1}{h \nu_L} \phi_1' \quad (16)$$

ここに、

σ_1 ; ^{238}U (単一スペクトル)に対する励起断面積

I_1 ; 単位断面積当りの励起レーザー光強度

$$\phi_1 = \int d\omega' \int d\omega \int g_D(\omega' - \omega_A) g_A(\omega' - \omega) g_L(\omega - \omega_L)$$

$$\phi_1' = \int d\omega' \int d\omega \int g_D'(\omega' - \omega_A') g_A'(\omega' - \omega) g_L(\omega - \omega_L)$$

$\omega_A = 2\pi\nu_1$; ^{235}U の共鳴周波数

$\omega_A' = 2\pi\nu_1'$; ^{238}U の共鳴周波数

$\omega_L = 2\pi\nu_L$; レーザー角周波数

$$g_D(\omega) = \frac{1}{\Delta\omega_D} \sqrt{\frac{\ell n_2}{\pi}} \exp\left\{-\left(\frac{\omega - \omega_A}{\Delta\omega_D}\right)^2 \ell n_2\right\} \quad ; \text{ドップラー拡がり} (^{235}\text{U})$$

$$g_D'(\omega) = \frac{1}{\Delta\omega_D} \sqrt{\frac{\ell n_2}{\pi}} \exp\left\{-\left(\frac{\omega - \omega_A'}{\Delta\omega_D}\right)^2 \ell n_2\right\} \quad ; \text{ドップラー拡がり} (^{238}\text{U})$$

$$g_L(\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta\omega_A}{(\omega - \omega_L)^2 + \Delta\omega_L^2} \quad ; \text{レーザー発振ラインの拡がり}$$

$$g_A(\omega) = \frac{1}{N} \sum_j \frac{1}{\pi} \frac{\Delta\omega_A}{(\omega - \Delta\omega_{iS} + j\Delta\omega_{\text{HFS}})^2 + \Delta\omega_A^2} \quad ; ^{235}\text{U} \text{のスペクトル}$$

$$g_A'(\omega) = \frac{\Delta\omega_A}{(\omega - \omega_A')^2 + \Delta\omega_A^2} \quad ; ^{238}\text{U} \text{のスペクトル}$$

N ; ^{235}U の超微細構造数

$\Delta\omega_{\text{HFS}}$; 超微細構造の間隔(等間隔で分布しているもの)とする。

$\Delta\omega_{iS}$; 同位体シフト

$\Delta\omega_D$; ドップラー巾

$\Delta \omega_A$; 原子スペクトルの自然巾
 j ; レーザーの照射される超微細構造のピーク位置
 である。

3.4 濃縮作業量

励起・電離されたウランイオンは電荷交換を行いながら電極上へと回収される。このとき中性原子の電極への付着を考えねばならない。最収的な回収イオンの濃縮度は、

$$X_P = \frac{A_5}{A_8 + A_5} \quad (17)$$

で示される。ここに、

$$A_8 = x_F \cdot x_v \cdot x_R \cdot F \{ (1 - x_{P_0}) (1 - z) + (1 - x_{P_0}) z (1 - x_F) + x_{P_0} z (1 - x_F) \} + F \cdot (1 - x_F) (Y + Y_a)$$

……回収 ^{238}U 量

$$A_5 = x_F \cdot x_v \cdot x_R \cdot F \{ x_{P_0} \cdot (1 - z) + (1 - x_{P_0}) z \cdot x_F + x_{P_0} \cdot z \cdot x_F \} + F \cdot x_F (Y + Y_a)$$

……回収 ^{235}U 量

x_F …… 供給 ^{235}U 濃度 (多段にする場合には各々の入口濃度)

x_v …… 基底状態および 620 cm^{-1} に存在する原子の密度の割合

x_R …… 供給 ^{235}U のうち光学的に電離される割合

F …… 供給量 (多段にする場合には各々の入口流量)

x_{P_0} …… 光学的に電離された状態での ^{235}U 同位体濃度

z …… 電荷交換割合 (< 1)

Y …… 熱電離度

Y_a …… 中性U原子付着量

である。このとき全回収量 P は、

$$P = \frac{x_F \cdot x_v \cdot x_R \cdot F}{x_{P_0}} + F (Y + Y_a) \quad (18)$$

で示される。但し、ここでは電子とイオンとの再結合は無く、電荷交換はするものの全イオン量が回収されるものと仮定した。廃棄量 W は、

$$W = F - P \quad (19)$$

であるので、その濃度 x_W は、

$$x_W = \frac{F \cdot x_F - P \cdot x_P}{W} \quad (20)$$

で与えられる。従って分離作業量 S は、

$$S = P \cdot F_v(x_p) + W \cdot F_w(x_w) - F \cdot F_f(x_f) \quad (21)$$

で示される。なおここに述べた熱電離イオンの割合 Y は、

$$Y^2 = 5.0 \times 10^{-4} \frac{\pi_i}{\pi_a} \frac{T^{2.5}}{P} e^{-\frac{11600 V_i}{T}} \quad (22)$$

で計算される。ここに、

- π_i …… イオンの分配関数
- π_a …… 原子の分配関数
- P …… 圧力 (Torr)
- T …… 温度 (K)
- V_i …… イオン化ポテンシャル (eV)

である。

3.5 最適化

コストに影響を与える設計・操作パラメーターとしては、温度、ルツボの巾、ルツボの長さ、パルス繰返し数、電極間隔、蒸発角度、選択励起レーザー波長巾、パルス長さ、励起光の強さ、電離光の強さが考えられる。これらパラメータをコストが最小となるように決定すれば良い。これらの計算を各レーザーシステム処理段数、生産量、原料ウラン同位体比、製品ウラン濃縮度熱電離イオンを除去するかしないかなどの条件の下に行い比較することができる。なおレーザー波長、励起状態寿命、電離状態寿命、電極板厚さ、回収電圧、衝突断面積、同位体シフト、濃縮プラント全体の寿命、金利、各種機械・電気装置の効率、年稼働率、ポンプレーザーおよび電離レーザーの1台当りの最大出力、ダイ変換効率、真空排気系の配置等の物性値および一般的機器に対する値は固定したものと取り扱う。

このような多変数関数の最適点を見出すには Symplex 法が適しているが、変数が多く収束に時間を要するので次のような手法により初期設定値を求めた。まず多変数関数を

$$f = c(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (23)$$

とすると、或る点、 $x_1 = x_1^*$, $x_2 = x_2^*$ …… における f の各変数に関する感度は、

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{x_i = x_i^*} = c'_i(x_1^*, x_2^*, \dots, x_i^*, \dots, x_n^*) \quad (24)$$

と示される。ここに c'_i は i 成分に対する偏微分係数である。従って最も勾配の急となる増分は

$$\frac{\partial f / \partial x_i}{\partial f / \partial x_1} = \frac{\Delta x_i}{\Delta x_1} \quad (25)$$

で示される。ここに Δx_i は x の最大傾斜面に沿う増分である。最適計算の概略フローシート

をFig.3に示した。まず各パラメーターの初期値を設定し各段についての設計計算（モジュール形状，レーザー光強度，1台当りの分離作業量など）を行い最終的に得られるモジュールからの製品濃度を求め，これが所定の濃度に達すればモジュール当りの分離作業量よりモジュール台数を求めコストの計算を行い，まず初期コストを得る。次に注目するパラメーターのみを増加させそのパラメーターのコストに与える感度を求める。これを各パラメーターについて各々行い次に最大勾配を Δ だけ増大させて新たなコスト設定を行う。これを初期コストと比較して小さくなっているようであれば，以上に述べた計算を繰り返し最小となる点にて計算を停止し打出しを行うようになっている。ただしこうした計算では真の最小値でなく単なる極小値しか得られない場合もあるので，再度 Symplex 法を用いて真の最小値を求める。

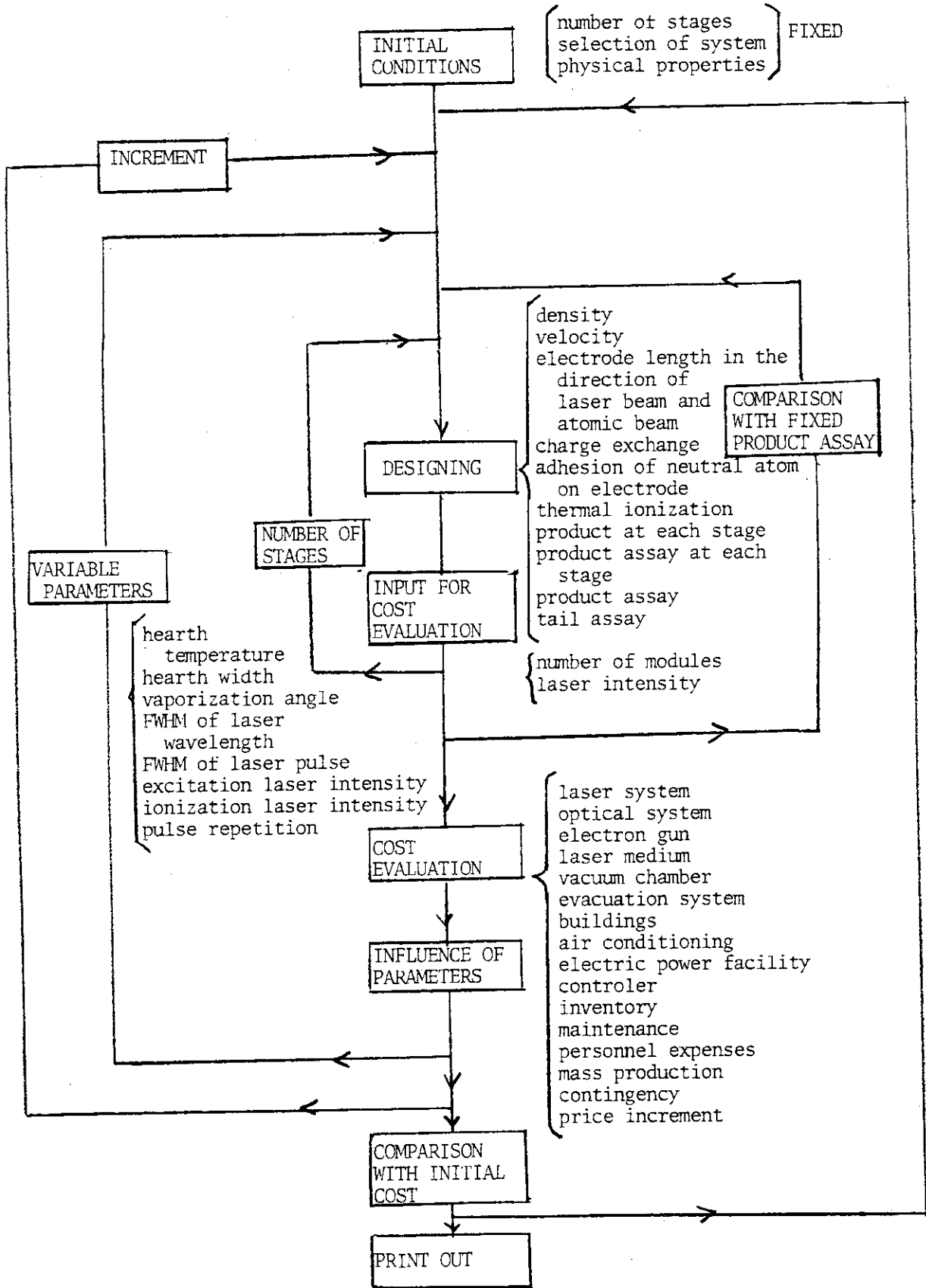


Fig. 3 Flow chart for calculation

4. コストの算出¹⁾

先に述べたように主要機器としては、レーザー装置、レーザー媒質、光学系、電子銃、真空セル、真空排気系、プラント建屋、空調設備、変電設備および制御機器が含まれる。その他に、インベントリー、運転維持費、人件費、大量生産効果、減価償却、年次価格変動を考慮して全コストを算出する。なおコスト算定は1978年を基準としてあるが価格の年次スライドもできるようになっている。これらコスト見積りの対象となるものをTable 1にまとめた。

4.1 レーザー装置

(1) レーザーコンポーネント

i) 銅蒸気レーザー (CVL)

費用見積りの内訳については、レーザーヘッド関係として、レーザーキャビティ、オプティクス、構造体、組立て作業を、また電源関係として、高圧電源、サイラトロン、パルス回路網、機械構造体、組立て作業を考えその他に総合組立て作業および検査を考える。

◦ レーザーキャビティの初期製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{LC} = 0.404 (P / \eta_v)^{0.6} \quad (26)$$

ここに、

P ; レーザー出力 (W)

η_v ; レーザーエネルギーの体積効率 (W / CC)

である。

◦ オプティクスの初期製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{OP} = 2.4 \quad (\text{オシレーターの場合}) \quad (27)$$

$$= 0 \quad (\text{アンプの場合})$$

◦ 構造体初期製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{ST} = 1.04 (P / \eta_v)^{0.33} \quad (28)$$

◦ 組立コスト (K \$ / 台)

$$C_{IH} = 0.25 (C_{LH} + C_{OP} + C_{ST}) \quad (29)$$

各製作コストの25%を考慮した。

◦ 高圧電源初期製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{HV} = 0.08 P e^{0.29} V^{0.38} \quad (30)$$

ここに,

P_e ; 電源出力電力

V ; 電源出力電圧

である。

- サイラトロン初期製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{TH} = 0.016 F_a^{0.25} P_v^{0.97} 1.84^{D_v} \quad (31)$$

ここに,

F_a ; サイラトロンアノード加熱係数 ($10^9 V \cdot A / S$)

P_v ; サイラトロンピーク電圧 (KV)

$D_v = 1$ (水冷サイラトロン)

$= 0$ (冷却なし)

である。

- パルス回路網初期製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{PF} = C_e + 0.104 S_e^{0.44} N_c \quad (32)$$

ここに,

C_e ; 電子部品コスト (0.45 K \$)

S_e ; 回路網中に貯えられるエネルギー (J)

$N_c = 2^{\log_{10}(L \cdot P_r / 278)}$; キャパシタ-数

L ; キャパシタ-の寿命 (hrs)

P_r ; パルス繰返し数 (Hz)

である。

- 機械構造体初期製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{ME} = M_e \quad (33)$$

ここに, $M_e = 1.4$ K \$ は電源機械部品のコストである。

- 電源組み立てコスト (K \$ / 台)

$$C_{IP} = 0.10 (C_{HV} + C_{TH} + C_{PF} + C_{ME}) \quad (34)$$

ここでは10%と見た。

- 総合組立て作動テストコスト (K \$ / 台)

$$C_{AT} = 0.15 (C_{LC} + C_{OP} + C_{ST} + C_{IH} + C_{HV} + C_{TH} + C_{PF} + C_{ME} + C_{IP}) \quad (35)$$

全体の15%と見た。

次に上記部品の交換費用について考えてみると,

- レーザーキャビティ交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{LC} = C_{LC} \quad (36)$$

全て交換するものとする。ただし交換台数は、レーザー台数に比べて、

$$q_{LCR} = Lf / L_{LC} \quad (37)$$

倍となるので大量生産効果により価格てい減が見込まれる。ここに、

L ; プラントの寿命 (hr)

f ; 年間プラント稼働率 (-)

L_{LC} ; レーザーキャビティの寿命 (5000 hr)

である。

○ オプティクス交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{OP} = 0.75 C_{OP} \quad (\text{オシレーター}) \quad (38)$$

$$= 0 \quad (\text{アンプ})$$

初期製作費の75%とする。交換数は初期台数に比べて、

$$q_{LCR} = Lf / L_{OP} \quad (39)$$

ここに、

L_{OP} ; オプティクスの寿命 (18,000 hr)

である。

○ 構造体交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{ST} = 0 \quad (40)$$

プラントの全寿命に渡り交換は不要である。

○ 高圧電源交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{HV} = C_{HV} \quad (41)$$

全て交換するものとする。交換数は初期設置数の

$$q_{HV} = Lf / L_{HV} \quad (42)$$

倍だけ必要となる。ここに

L_{HV} ; 高圧電源寿命 (75,000 hr)

である。

○ サイラトロン交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{TH} = C_{TH} \quad (43)$$

交換台数は初期設置数の

$$q_{TH} = Lf N_{TH} / L_{TH} \quad (44)$$

倍となる。ここに

$$L_{TH} ; \text{サイラトロン寿命 (1,000} \cdot N_{TH} \text{ hr)}$$

である。

○パルス回路網交換費用 (K \$ / 台)

電子部品に対しては初期設置数に対して

$$R_{EC} = C_e \quad (45)$$

$$q_{EC} = Lf / L_{EC} \quad (46)$$

倍となる。ここに、

$$L_{EC} ; \text{電気部品の寿命 (65,000 hr)}$$

である。キャパシター部については、

$$R_{CV} = C_{CV} (= 0.104 S_e^{0.44} N_c) \quad (47)$$

で、交換比率は初期設置数に対して

$$q_{CV} = Lf / L_{CV} \quad (48)$$

となる。ここに

$$L_{CV} ; \text{キャパシターの寿命 (hr)}$$

である。

○機械構造体交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{ME} = C_{ME} \quad (49)$$

交換比率は初期設置数に対して

$$q_{ME} = 0.05 \quad (50)$$

と見積る。

ii) ダイレーザー (DL)

ダイレーザーは銅蒸気レーザー、希ガスハロゲンレーザー、Nd : YAGレーザーによりポンピングされる。見積り項目の内訳は、レーザーヘッド (ダイセル, オプティクス, コントローラー, グレーティング, マウント, 電源, ダイ循環システムなど) とその交換費用である。これをさらに細分化することやオシレーターとアンプの違いを考慮するなどの努力はここでは行わない。

○レーザーヘッド製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{LH} = 3.0 \quad (51)$$

○レーザーヘッド交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{LH} = C_{LH} \quad 52$$

すなわち全てを交換するわけであるが、この場合の交換比率は初期設置数に比して、

$$q_{LH} = Lf / L_{LH} \quad 53$$

となる。ここに

L_{LH} ; ダイレーザーヘッド寿命 (15,000 hr)

である。これ以外の費用は不要である。

iii) 希ガスハロゲンレーザー (RGH)

コスト見積りの内訳は、レーザーヘッド関係および、電源関係として、高圧電源、サイラトロン、パルス回路網、機械構造体、組み立て、さらに総合組立て作動試験があるが、レーザーヘッド関係以外は銅蒸気レーザーと同じであるとする。

○レーザーヘッド製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{LH} = 4.83 P^{0.512} \quad 54$$

○レーザーヘッド交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{LH} = 0.75 C_{LH} \quad 55$$

75%を交換するわけであるが、この場合の交換比率は初期設置数に対し

$$q_{LH} = Lf / L_{LH} \quad 56$$

となる。ここに

L_{LH} ; 希ガスハロゲンレーザーの寿命 (10,000 hr)

である。

iv) Nd : YAGレーザー (YAG)

コスト見積りの内訳は、レーザーヘッド関係として、レーザーキャビティ、オプティカルポンプおよび電源、熱交換器であり、その他Q-スイッチ関係、ダブリングクリスタル関係、総合組立ておよび作動検査である。

○レーザーキャビティ製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{LC} = 0.86 (P / \eta_D)^{0.49} \quad 57$$

ここに、

η_D ; YAGレーザーのダブリングクリスタル効率 (0.4)

である。

○オプティカルポンプおよび電源製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{PM} = 0.50 (P / \eta_D)^{0.49} \quad 58$$

- 熱交換器製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{HE} = 0.65 (P / \eta_D)^{0.49} \quad 59$$

- Qスイッチ製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{QS} = 5.5 N_{QS} \quad 60$$

ここに,

N_{QS} ; Qスイッチの数 (1又は2)

である。

- ダブリングクリスタル製作コスト (K \$ / 台)

$$C_{DC} = 5.0 \quad 61$$

- 総合組立て作動試験 (K \$ / 台)

$$C_{AT} = 0.15 (C_{LC} + C_{PM} + C_{HE} + C_{QS} + C_{DC}) \quad 62$$

次に上記機器の交換費用は,

- レーザーキャビティ交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{LC} = C_{LC} \quad 63$$

交換比率は

$$q_{LC} = L \cdot f / L_{LH} \quad 64$$

ここに,

L_{LH} ; Nd : YAGレーザー寿命 (13,000 hr)

である。

- オプティカルポンプ交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{PM} = 0.8 C_{PM} \quad 65$$

交換比率は

$$q_{PM} = L \cdot f / L_{PM} \quad 66$$

ここに,

L_{PM} ; オプティカルポンプ寿命 (1,000 hr)

である。

- 熱交換器交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{HE} = 0 \quad 67$$

熱交換器には故障はないものとする。

○ Q スイッチ交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{QS} = C_{QS} \quad (68)$$

交換比率は

$$q_{QS} = L \cdot f / L_{QS} \quad (69)$$

ここに,

L_{QS} ; Q スイッチ寿命 (8,000 hr)

である。

○ ダブリングクリスタル交換費用 (K \$ / 台)

$$R_{DC} = C_{DC} \quad (70)$$

交換比率は

$$q_{DC} = L \cdot f / L_{DC} \quad (71)$$

ここに,

L_{DC} ; ダブリングクリスタル寿命 (3,000 hr)

である。

なお以上の交換費用は、全プラントに要した費用から初期設備として用いたものを差し引いて求めるものとする。

(2) レーザーシステム

1) 3 ステップ励起法

選択励起はポリメチン系の色素を用いて行われ、効率を η_{DY} とする。レーザー発振ライン幅をエタロンで絞る場合の効率としては概略ではあるが、

$$\eta_{BD}^{-1} = a_{BD} \left(b_{BD} + \frac{1}{\Delta\nu_L} \right) (\Delta\nu_L < 1 \text{ GHz}) \quad (72)$$

とする。ここに $\Delta\nu_L$ はレーザー半値幅 (GHz), a_{BD} , b_{BD} は定数である。モジュール 1 台当りの必要レーザー台数は、 P_N を銅蒸気レーザー 1 台当りの出力として、

$$N_{L1} = \frac{P_{O1}}{P_N \eta_{DY} \eta_{BD}} \quad (\text{YAG, CVL および DL})$$

$$N_{L2} = \frac{P_{O2}}{P_N \eta_{DY} \eta_{BD}} \quad (\text{YAG, CVL および DL}) \quad (73)$$

$$N_{L3} = \frac{P_{O3}}{P_N \eta_{DY} \eta_{BD}} \quad (\text{YAG, CVL および DL})$$

で示される。ただしここでは全てポンプレーザー (アンプなし) 1 台に付ダイレーザー (ア

ンプ1段) 1台と仮定した。また $P_{O1 \sim O3}$, $N_{L1 \sim L3}$ は各々1段~3段目の励起にかかわる必要レーザー入力とレーザー台数である。各段についてみると、各々CVL群、DLオシレーター群およびDLアンプ群で構成されており、それぞれのレーザー出力は、ポンプレーザーのダイレーザーオシレーターおよびダイレーザーアンプへの光の分配を考えると、レーザー1台当たり、

$$P_{i1} = \frac{P_{O_i} \left(1 + \frac{1}{R_\alpha}\right)}{N_{L_i} \cdot \eta_{DY} \cdot \eta_{BD}} \quad (i \text{ 段目 YAG, CVL 1 台当りの出力})$$

$$P_{i2} = \frac{P_{O_i}}{N_{L_i} \cdot R_\alpha} \quad (i \text{ 段目 DL オシレーター 1 台当りの出力}) \quad (74)$$

$$P_{i3} = \frac{P_{O_i}}{N_{L_i}} \quad (i \text{ 段目 DL アンプ 1 台当りの出力})$$

となる。ここに $i = 1 \sim 3$ であり、 R_α はダイレーザーの増幅率である。このレーザー出力に基づいて各レーザーコストが算出される。

ii) 2光子励起法

色素を用いずに、エタロンを用いて必要波長を狭いバンド幅で取り出して選択励起光として用いるが、この効率は $\eta_{et} = 0.6$ とする。レーザー台数は、

$$N_L = \frac{P_{O1} + P_{O2}}{P_N \cdot \eta_{et} \cdot \eta_{BD}} \quad (RGH) \quad (75)$$

となる。ここに P_{O1} は励起の為に必要なレーザー光入力、 P_{O2} は電離の為に必要なレーザー光入力である。1台当りのレーザー出力は、

$$P = \frac{P_{O1} + P_{O2}}{N_L} \quad (RGH \text{ 1 台当りの出力}) \quad (76)$$

で与えられる。

iii) 2ステップ励起法

YAGやCVLでDLオシレーターおよびDLアンプをポンピングして得られた励起光で原子を照射し、EXL (希ガスハロゲンレーザー; エキシマーレーザー) で電離を行う方法である。各ステップにおけるレーザー台数は、

$$N_{L1} = \frac{P_{O1}}{P_N \cdot \eta_{DY} \cdot \eta_{BD}} \quad (77)$$

$$N_{L2} = \frac{P_{O2}}{P_N}$$

となる。ここに P_{O1} , P_{O2} は必要とする励起レーザーおよび電離レーザーの強度である。但し N_{L1} はポンプレーザーの台数である。一方これは DL オシレーター, DL アンプの数でもある。レーザー 1 台当りの出力は,

$$P_{11} = \frac{P_{O1} \left(1 + \frac{1}{R_\alpha}\right)}{N_{L1} \cdot \eta_{DY} \cdot \eta_{BD}} \quad (\text{CVL, YAGレーザー1台当りの出力})$$

$$P_{12} = \frac{P_{O1}}{N_{L1} \cdot R_\alpha} \quad (\text{DL オシレーター1台当りの出力})$$

(78)

$$P_{13} = \frac{P_{O1}}{N_{L1}} \quad (\text{DL アンプ1台当りの出力})$$

$$P_2 = \frac{P_{O2}}{N_{L2}} \quad (\text{RGH1台当りの出力})$$

となる。

4.2 光学系

ここではレーザー光を真空セルまで導くのに必要な光学系についてそのコストを見積る。見積り項目の内訳としては、ビームコンバイナーおよび回転機構として、ミラー、コーティング、マウント、ビームエクパンダー、ダイクロイック素子があり、ビームアライメントシステムとしては、検出器、ジンバル機構、電子機器があり、波長コントロール関係ではデータ処理機とコントローラーがある。この他タイミング調整関係およびウィンドウ関係或は架台も含まれる。これら初期設備費と部品交換費用について記述する。

(1) 初期設備コスト (K \$ / 個)

○ミラー

$$C_{MI} = 6.22 \times 10^{-3} D_M^{1.615} \quad (79)$$

ミラーの個数は,

$$N_{MI} = N_{MW} \cdot N_{LT} \quad (80)$$

である。ここに,

D_M ; ミラー直径 (cm)

N_{MW} ; レーザートレイン当りのミラー数

$N_{LT} = N_{SC} \cdot N_W$; レーザートレイン数

$N_{SC} = N_{ST} \cdot N_{MOD}$; 真空セルの数

N_{ST} ; モジュール当りの段数

N_{MOD} ; プラント中のモジュール数

N_W ; 使用波長数

である。

○ コーティング

$$C_{OD} = 0.286 \times 10^{-3} D_M^{1.89} \quad (81)$$

コーティングの数は N_{MI} に同じである。

○ マウント

$$C_{MT} = 0.015 D_M^{0.9} \quad (82)$$

マウントの数は N_{MI} に同じである。

○ ビームエキスパンダー

$$C_{EX} = 0.17 D_A^{1.37} \delta_{DC} \quad (83)$$

ビームエキスパンダーは炭酸ガスレーザーを用いる場合に必要となるので炭酸ガスレーザーを用いない場合には $\delta_{DC} = 0$ とする。

D_A ; CO_2 レーザー用エキスパンダー出口スリット径 (cm)

数量は, N_{SC} である。

○ ダイクロイック素子

$$C_{DI} = 0.1 D_D^2 \delta_{DC} \quad (84)$$

D_D ; ダイクロイック素子の径 (cm)

数量は, N_{SC} である。

○ 検出器

$$C_{SE} = 3.7 \quad (85)$$

数量は N_{LT} である。

○ ジンバル機構

$$C_{GM} = 1.8 \quad (86)$$

数量は N_{LT} である。

○ 電子機器

$$C_{EL} = 0.6 \quad (87)$$

数量は N_{LT} である。

○ 波長結合器

$$C_{AC} = 117 \quad (88)$$

数量は,

$$N_{AC} = N_{LT} / N_{AS} \quad 89$$

である。ここに、

N_{AS} ; 波長結合器 1 台当りのレーザートレイン数
である。

○ コントローラ

$$C_{OL} = 21 \quad 90$$

数量は N_{LT} である。

○ タイミング機構

$$C_{TC} = 10.6 \quad 91$$

数量は、 N_{DL} (ダイレーザー数) である。

○ ウィンドウ

$$C_{WD} = 7.1 (0.07 + 0.93 \delta_D) \quad 92$$

数量は、

$$N_{WD} = N_{CW} \cdot N_{SC} \quad 93$$

である。ここに、

N_{CW} ; 真空セル 1 台当りのウィンドウ数 (12 個)

○ 架 台

$$C_{FR} = 29.6 \quad 94$$

数量は N_{SC} である。

(2) 交換部品に要する費用

以上光学部品の交換費用は各々次のようになる。

○ ミラー

$$R_{MI} = C_{MI} \quad 95$$

初期生産量に対する比率 q_{MI} は、

$$q_{MI} = L \cdot f / L_{MI} \quad 96$$

である。ここに、

L_{MI} ; ミラーの寿命 (15,000 hr)

である。

○ コーティング

$$R_{CO} = C_{CO} \quad 97$$

初期生産量に対する比率は,

$$q_{CO} = L \cdot f / L_{CO} \quad 98$$

である。ここに,

L_{CO} ; コーティング寿命 (15,000 hr)

である。

○ マウント

$$R_{CO} = 0$$

○ ビームエキスパンダー

$$R_{EX} = 0.5 C_{EX} \quad 99$$

初期生産量に対する比率は,

$$q_{EX} = L \cdot f / L_{EX} \quad (100)$$

である。ここに,

L_{EX} ; ビームエキスパンダー寿命 (15,000 hr)

である。

○ ダイクロイック素子

$$R_{DI} = C_{DI} \quad (101)$$

である。初期生産量に対する比率は,

$$q_{DI} = L \cdot f / L_{DI} \quad (102)$$

である。ここに,

L_{DI} ; ダイクロイック素子の寿命 (15,000 hr)

である。

○ 検出器

$$R_{SE} = C_{SE} \quad (103)$$

初期生産量に対する比率は,

$$q_{SE} = L \cdot f / L_{SE} \quad (104)$$

である。ここに,

L_{SE} ; 検出器の寿命 (8,000 hr)

である。

○ ジンバル機構

$$R_{GM} = C_{GM} \quad (105)$$

初期生産量に対する比率は,

$$q_{GM} = L \cdot f / L_{GM} \quad (106)$$

である。ここに,

L_{GM} ; ジンバル機構の寿命 (15,000 hr)

である。

○ 電子機器

$$R_{EL} = C_{EL} \quad (107)$$

初期生産量に対する比率は,

$$q_{EL} = L \cdot f / L_{EL} \quad (108)$$

である。ここに,

L_{EL} ; 電子機器の寿命 (15,000 hr)

である。

○ 波長結合器

$$R_{AC} = 0.5 C_{AC} \quad (109)$$

初期生産量に対する比率は,

$$q_{AC} = L \cdot f / L_{AC} \quad (110)$$

である。ここに,

L_{AC} ; 波長結合器の寿命 (4,000 hr)

である。

○ コントローラー

$$R_{CL} = 0.5 C_{CL} \quad (111)$$

初期生産量に対する比率は,

$$q_{CL} = L \cdot f / L_{CL} \quad (112)$$

である。ここに,

L_{CL} ; コントローラー寿命 (4,000 hr)

である。

○ タイミング機構

$$R_{TC} = 0.5 C_{TC} \quad (113)$$

初期生産量に対する比率は、

$$q_{TC} = L \cdot f / L_{TC}$$

である。ここに、

L_{TC} : タイミング機構の寿命 (8,000 hr)

である。

○ ウィンドウ

$$R_{WD} = 0.5 C_{WD} \quad (114)$$

初期生産量に対する比率は、

$$q_{WD} = L \cdot f / L_{WD} \quad (115)$$

である。ここに、

L_{WD} : ウィンドウ寿命 (15,000 hr)

である。

○ 架 台

$$R_{WD} = 0 \quad (116)$$

である。

4.3 レーザー媒質

ここではレーザー発振に必要となる媒質、およびその循環系についての費用見積りを考える。

(1) 媒質循環器

1) 銅蒸気レーザー

本レーザーには銅試料の他 He ガス、冷却水およびそれらの循環系が必要である。He ガス流量は、

$$Q_g = 5.0 \times 10^{-6} P \quad (\text{Atm} \cdot \text{m}^3 / \text{min}) \quad (117)$$

冷却水量は、

$$Q_w = 0.1 P \quad (\ell / \text{min}) \quad (118)$$

He ガス排出用メカニカルプースター容量は、

$$Q_{mc} = 2.11 \times 10^{-5} P \quad (\text{m}^3 / \text{hr}) \quad (119)$$

である。ここに P はレーザー出力(W)である。銅の使用量は微かなのでここでは無視した。従って費用を見積ると、He ガスに対しては、10%を交換して使用するとして

$$C_g = 8.57 \times 10^{-3} Q_g \times 8760 \times 60 \times 0.1 \quad (\text{K \$ / レーザー / 年}) \quad (120)$$

となる。メカニカルブースターは

$$C_{mc} = 0.139 Q_{mc}^{0.592} \quad (\text{K \$ / レーザー}) \quad (121)$$

で与えられる。

ii) 希ガスハロゲンレーザー

この場合の見積りとしては Xe F レーザーを基本に行う。ガスとしては F_2 , He, Xe の 3 種混合ガスが使用される。He ガス量は,

$$Q_{g1} = 0.987 Q_g \quad (\text{atm} \cdot \text{m}^3 / \text{min}) \quad (122)$$

Xe ガス量は,

$$Q_{g2} = 0.01 Q_g \quad (\text{atm} \cdot \text{m}^3 / \text{min}) \quad (123)$$

F_2 ガス量は,

$$Q_{g3} = 0.003 Q_g \quad (\text{atm} \cdot \text{m}^3 / \text{min}) \quad (124)$$

である。ここに,

$$Q_g = 7.98 \times 10^{-5} R \cdot P \quad (\text{atm} \cdot \text{m}^3 / \text{min}) \quad (125)$$

P ; レーザー出力(W)

R ; パルス繰返し数(Hz)

である。従ってガス使用量は, 10%を交換して使用するとして,

$$C_g = 0.0667 Q_g \times 8760 \times 60 \times 0.1 \quad (\text{K \$ / レーザー / 年}) \quad (126)$$

となる。循環用ブロアーの流量は作動圧を P_L (2,500 Torr) とすると

$$Q_B = Q_g \cdot 760 / P_L \quad (\text{atm} \cdot \text{m}^3 / \text{min}) \quad (127)$$

であるからブロアーの製作費用は,

$$C_B = 0.139 \cdot Q_B^{0.592} \quad (\text{K \$ / レーザー}) \quad (128)$$

となりその消費動力は,

$$P_B = 3.36 \times 10^{-3} Q_B^{1.027} \quad (\text{kW / レーザー}) \quad (129)$$

で与えられる。

iii) YAGレーザー

冷却水の循環のみであり全体コストにほとんど影響を与えないので見積りは行わない。

IV) ダイレーザー

ダイレーザーでは波長に応じたレーザー用色素が循環される。ダイ循環量は、ポンプレーザー出力を $P(W)$ とすると

$$Q_D = 0.5489 \cdot P + 0.5678 \quad (\ell / \text{min} / \text{レーザー}) \quad (130)$$

で与えられるので、循環ポンプ製作費は、

$$C_P = 0.15 Q_D \quad (\text{K \$} / \text{レーザー}) \quad (131)$$

となる。色素は劣化するのでこれを補うために

$$C_{DR} = \gamma_{DR} \cdot P \delta_{DR} \quad (\text{K \$} / \text{yr}) \quad (132)$$

が運転費として必要となる。ここに、劣化色素補てん費は、

$$\gamma_{DR} = 0.657 \quad (\text{K \$} / \text{yr} \cdot W) \quad \dots\dots\dots \text{低ゲイン色素} \quad (133)$$

$$8.213 \times 10^{-4} \quad (\text{K \$} / \text{yr} \cdot W) \quad \dots\dots \text{高ゲイン色素} \quad (134)$$

である。ここに

$$\delta_{DR} : \text{色素のフィルター透過率} (0.1)$$

である。またインベントリーを $Q_{inv} (5 \ell)$ とすると初期投資費用は

$$C_{inv} = \epsilon_D \cdot Q_{inv} \quad (135)$$

で与えられる。ここに、 ϵ_D は色素の費用で

$$\epsilon_D = 3.0 \times 10^{-3} \quad (\text{K \$} / \ell) \quad \dots\dots \text{ポリメチン系以外} \quad (136)$$

$$1.8 \times 10^{-4} \quad (\text{K \$} / \ell) \quad \dots\dots \text{ポリメチン系}$$

である。なおガス体に対する初期投資は全循環量に対してを見積った。

(2) 循環系のシステム

3ステップ, 2ステップ, 2フォトンの各方式に応じて各ステップおよびオシレーター, アンプに分けてレーザー種類, レーザー波長, レーザー出力, 繰返し数を与えて各コンポーネントについての費用を見積る。

4.4 真空セル

真空セルの内部には主として電子銃, ルツボ, 電極が入るので, これらの大きさにより内部形状, 容積が決定される。真空セルの形状をシリンダー状として見積る。真空セルの直径 D_C および長さ L_C は

$$D_C = K_D \cdot R_0 + \delta \quad (137)$$

$$L_C = K_L \cdot \text{MAX} \{ B, L \} + \delta \quad (138)$$

で与えられる。ここに、

- K_D ; 直径方向の余裕度
- K_L ; 長手方向の余裕度
- R_0 ; ルツボ蒸発面から電極部までの距離
- B, L ; 電極の形状 (縦・横)
- δ ; スペース

である。シリンダー壁の厚さを強度計算より求めると、

$$t_D = \frac{\Delta P \cdot D_C}{2 \sigma \cdot \alpha \cdot \eta} + \epsilon \quad (139)$$

となる。上・下端部を鏡板状とし鏡板部の形状係数をMとすると上・下端面の厚さは、

$$t_L = \frac{\Delta P \cdot D_C \cdot M}{2 \sigma \cdot \alpha \cdot \eta} + \epsilon \quad (140)$$

となる。ここに、

- ΔP ; 真空セル内部・外部の圧力差
- D_C ; 真空セルの直径
- σ ; 材料の引張強さ (SUS, $3,000 \text{ kg/mm}^2$)
- η ; 溶接効率
- ϵ ; くされ代

である。真空セル重量は、シリンダー部および鏡板部分は

$$W_D = \pi t_D (D_C + t_D) L_C \rho \quad (141)$$

$$W_L = 4 \pi D_C^2 \cdot t_L \rho \quad (142)$$

となり総重量は、

$$W_C = W_D + W_L \quad (143)$$

となる。ここに

- ρ ; 材料の密度 (7.85 g/cm^3)

である。また体積 V_C は、

$$V_C = \frac{\pi}{4} D_C^2 \left[L_C + D_C \cdot (2 K_m)^2 \left(1 - \frac{K_m}{3} \right) \right] \quad (144)$$

であるから、これらをm単位で示せば真空セル製作費用として

$$C = 2.33 W_C + 3.037 V_C^{1.95} \quad (\text{K \$}) \quad (145)$$

が得られる。

4.5 真空排気系

真空排気系では作動圧力を決定し、主排気・補助排気の仕様および製作コストを計算する。作動圧力は原子の散乱を防止するため励起・電離部における処理圧力の1/100を実現するものとして

$$P_e = \frac{P_r}{100 \rho_v} \quad (\text{Torr}) \quad (146)$$

を考える。ここに、

ρ_v ; 蒸発面と反応部における密度の比

P_r ; 蒸発面における平衡圧力 (Torr)

である。必要排気量は、

$$S = A \left(\frac{S_D}{0.629 P_e} \right)^{1.03} \quad (\ell/s) \quad (147)$$

となる。ここに、

$$S_D = \pi D_C L_C \cdot D_G \quad (\ell/s) \quad (148)$$

D_C, L_C ; 真空セル直径および高さ (m)

D_G ; 脱ガス量 ($2 \times 10^{-4} \cdot \text{Torr} \ell/s \cdot \text{m}^2$)

0.629 ; バルブやバッフル等の損失係数

A ; 余裕度 (1.5)

である。設備費は拡散ポンプを用いるものとする。Fig. 4のプロットより

$$C_P = C_{P1} + C_{P2} + C_{P3} + C_{P4} + C_{P5} \quad (\text{K\$ / 台}) \quad (149)$$

となる。ここに

$$C_{P1} = 0.013 S^{0.671} \quad \dots\dots\dots \text{拡散ポンプ本体} \quad (150)$$

$$C_{P2} = 0.0641 S^{0.491} \quad \dots\dots\dots \text{ゲートバルブ} \quad (151)$$

$$C_{P3} = 0.049 S^{0.434} \quad \dots\dots\dots \text{コールドトラップ} \quad (152)$$

$$C_{P4} = 2.09 \times 10^{-3} S^{0.609} \quad \dots\dots\dots \text{コンフラットフランジ類} \quad (153)$$

$$C_{P5} = 0.0184 S^{0.42} \quad \dots\dots\dots \text{水冷バッフル類} \quad (154)$$

である。次に拡散ポンプの消費動力をFig. 5のプロットより求める。主たる消費電力は加熱用ヒーターであり、

$$P_D = 5.83 \times 10^{-3} S^{0.767} \quad (\text{kW / 台}) \quad (155)$$

で示される。また冷却水の量は、

$$Q_D = 0.0132 S^{0.751} \quad (\ell / \text{min} / \text{台}) \quad (156)$$

となる。次に補助排気系として用いられるメカニカルブースターは数台の拡散ポンプをまとめて排気するものとする。必要容量は、

$$S_M = 2.3 \frac{N_v \cdot V_c}{\Delta T} \log_{10} \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (\text{m}^3 / \text{hr}) \quad (157)$$

となる。ここに、

N_v ; 1台のメカニカルブースターがうけもつ拡散ポンプ数

V_c ; セルの体積 (m^3)

ΔT ; 真空到達時間 (hr)

P_2 ; 吐出圧力 (760 Torr)

P_1 ; 吸込圧力 (10^{-3} Torr)

である。製作費用は、

$$C_M = 0.139 S_M^{0.592} \quad (\text{K\$ / 台}) \quad (158)$$

となる。メカニカルブースター全所要動力は、Fig. 6

$$P_M = 3.36 \times 10^{-3} S_M^{1.027} \quad (\text{kW / 台}) \quad (159)$$

で示される。

4.6 電子銃

ウランが蒸発するために必要なエネルギーは、

$$W_1 = W_s + W_m + W_e + W_v + W_g \quad (\text{W / cm}^2) \quad (160)$$

で示される。ここに

$$W_s = 2.9 \times 10^{-4} (T_m - T_a) \rho_H \times 1.6 \times 10^{-19} \quad (\text{W / cm}^2)$$

…融点まで加熱するために必要な蒸発表面積当りのエネルギー

$$W_m = 0.088 \rho_H \times 1.6 \times 10^{-19} \quad (\text{W / cm}^2)$$

…蒸発表面当りの融解熱

$$W_e = 2.89 \times 10^{-4} (T - T_m) \rho_H \times 1.6 \times 10^{-19} \quad (\text{W / cm}^2)$$

…溶融したウランを作動温度にまで加熱するために必要な蒸発面単位面積当りのエネルギー

$$W_v = 4.81 \rho_H \times 1.6 \times 10^{-19} \quad (\text{W / cm}^2)$$

…蒸発に必要なエネルギー

$$W_g = 2.77 \times 10^{-4} (T - T_m) \rho_H \times 1.6 \times 10^{-19} \quad (\text{W / cm}^2)$$

…蒸気を作動温度にまで上げるために必要となるエネルギー

T_m ; 溶融温度 (K)

T_a ; 周囲温度 (K)

T ; 作動温度 (K)

ρ_H ; 蒸発面における蒸発密度 (g/cm^3)

である。熱輻射損失は、

$$W_2 = \epsilon \sigma_B (T^4 - T_a^4) \quad (\text{W}/\text{cm}^2) \quad (161)$$

で示される。ここに、

ϵ ; 熱輻射係数 (0.3)

σ_B ; ステファンボルツマン常数 ($5.669 \times 10^{-12} \text{ erg}/\text{cm}^2 \text{ K}$)

である。熱伝導による損失は、

$$W_3 = h_1 (T - T_w) \quad (162)$$

で示される。ここに、

$$h_1 = \frac{K_u \cdot N_u}{\delta} \quad (\text{kcal}/\text{m}^2/\text{s}/\text{k})$$

…液体金属ウランの熱伝達率

K_u ; ウラン液体の熱伝導度 ($6.98 \times 10^{-3} \text{ kcal}/\text{m}/\text{c}/\text{s}$)

$N_u = 0.56 \left(\frac{G_R}{P_R} \right)^{0.25}$; ウラン液体のヌセルト数

$G_R = g \beta \theta \delta^3 / \nu^2$; ウラン液体のグラスホフ数

$P_R = \frac{\mu \cdot C_P}{K_u}$; ウラン液体のプラントル数

$\nu = \mu / \rho_H$; ウラン液体の動粘度 (m^2/s)

C_P ; ウラン液体の比熱 ($0.028 \text{ kcal}/\text{kg}$)

g ; 重力加速度 ($980 \text{ cm}/\text{s}^2$)

β ; ウラン液体の熱膨張係数 ($10^{-5}/\text{°C}$)

$$\delta = \frac{3.93 \left(P_R + \frac{20}{21} \right)^{0.25} \times^{0.25}}{\left(\frac{g \beta \theta}{\nu^2} \right)^{0.25} P_R^{-0.5}}$$

$\theta = T - T_w$, …… 温度差

$x = L/2$; 境界層の発達する長さ (m)

$$T_w = \frac{h_{1m} T + (1 + h_{1m}) h_{2m} T_w}{h_{2m} + h_{1m} (h_{2m} + 1)} ; \text{ルツボ壁面温度 (K)}$$

$$h_{1m} = h_1 / h_m$$

$$h_{2m} = h_2 / h_m$$

$$h_2 = 0.332 k_w \left(\frac{u}{\nu_w y} \right)^{1/2} P_{Rw}^{0.333} ; \text{水の熱伝達係数 (kcal}/\text{m}^2/\text{s}/\text{k})$$

$$h_m = \frac{1}{\frac{t_T}{k_T} + \frac{\ell_u}{k_u}}$$

u ; 冷却水流量 (5 m/s)

$y = L/2$; 冷却水側での増界層の発達する長さ (m)

L ; ルツボ冷却方向長さ (m)

t_T ; タンタルハース厚さ (3×10^{-3} m)

ℓ_u ; ウラン金属部分の厚さ (1×10^{-3} m)

k_T ; タンタルの熱伝導度 (6.98×10^{-3} kcal/m/c/s)

ν_w ; 冷却水の動粘度 (10^{-6} m²/s)

k_w ; 水の熱伝導度 (0.55 kcal/hr/°C)

$P_{Rw} = \mu_w / k_w C_{Pw}$; 冷却水のプラントル数

$\mu_w = \nu_w \cdot \rho_w$; 冷却水の粘性係数 (kg·s/m²)

ρ_w ; 水の密度 (1 kg/m³)

C_{Pw} ; 水の比熱 (1 kcal/kg)

である。従って蒸発の為に費される熱エネルギーは、

$$W_0 = (W_1 + W_2) BL + 2 W_3 D (L + B) \quad (W) \quad (163)$$

となる。ここに

B ; ルツボの巾 (m)

$D = B/4$; ルツボ内液体ウランの深さ (m)

である。次に電氣的必要エネルギーであるが、必要ジュール加熱エネルギーは次式で与えられる。

$$W_e = W_j \cdot L \quad (W) \quad (164)$$

ここに、

$$W_j = W_{RD} + W_{EM} \quad (W/cm)$$

$$W_{RD} = \epsilon_f s \sigma_B (T_f^4 - T_a^4)$$

ϵ_f ; タングステンフィラメントからの熱輻射係数 (0.3)

T_f ; フィラメント温度 (2600 K)

$S = I_e / J$; フィラメント表面積 (cm²)

$I_e = W_0 / \eta / E$; 熱放出電子

$$\eta = 1 - \eta_B$$

$$\eta_B = (1 - \cos \theta_t) / 2$$

$$\theta_t = \tan^{-1} \frac{2.2 r (1+r)}{(1+2r-0.2r^2)}$$

$$r = 0.187 Z^{0.667}$$

Z ; 原子番号 (92)

E ; 加速電圧 (10 kV)

J ; 熱電子放出率 (A/cm^2)

$$W_{EM} = 0.224 I_e$$

である。フィラメントの抵抗 R_w とフィラメント電流 I_f は次のように与えられる。

$$R_w = \frac{4}{\pi d^2} R_{w0} \{ 1 + \alpha_e (T_f - T_a) \} \quad (165)$$

$$I_f = \frac{W_j}{\sqrt{R_w}} \quad (166)$$

ここに,

$$d = \frac{S}{\pi} ; \text{フィラメント直径}$$

R_{w0} ; $T_a = 273.15^\circ K$ におけるタングステンの比抵抗 ($4.89 \times 10^{-6} \Omega \cdot cm$)

α_e ; 抵抗の温度係数 ($5.1 \times 10^{-3} / ^\circ C$)

である。従って全電力は,

$$P_{wa} = W_o + W_e \quad (W/\text{台}) \quad (167)$$

となる。 P_{wa} をkW単位で表わすと電子銃製作費用は,

$$C = 2.98 \times 10^{-5} P_{wa}^{2.344} + 2.556 P_{wa}^{0.722} + 0.136 P_{wa}^{1.368} + 22.481 \quad (K\$/\text{台}) \quad (168)$$

で与えられる。ここに第1項目はフィラメントブロック, 第2項目は電源, 第3項目はルツボ加熱部分, 第4項目は液体ウラン供給用の補助電子銃であり, これは電源, 電子銃部分, スイープユニット, スイープ用コイル電源より成立っている。但し主電子銃にはスイープユニットは設けられていないが, 電子の掃引は回収装置の磁場によって行われる。なおコスト算出には市販電子銃の出力をベースとして, Fig. 7のようなプロットから一般式を作成し, 利用した。

4.7 回収装置

回収装置は, 回収電極, 回収磁極に分かれる。

(1) 回収電極

回収電極には回収電極板, 回収用電源が含まれる。回収されるウラン原子のうちイオン化したもの, すなわち熱電離したものと光電離したものの割合を λ とすると流れる電流 I_R は電子によるものとイオンによるものを併せて

$$I_{Re} = 2 N_{av} \cdot C \frac{P_i \lambda}{M} \quad (\text{A / モジュール}) \quad (169)$$

となる。ここに

N_{av} ; アボガドロ数 (6.02×10^{23})

C ; 1価イオンのクーロン数 (1.6×10^{-19} c / 個)

P_i ; 回収ウラン原子量 (g/s/段)

M ; ウラン原子量 (238 g/mol)

である。電極にかかる電圧を E (Volt/cm) とすると必要電圧および電力は、

$$V_{Re} = E \cdot D_e \quad (\text{V}) \quad (170)$$

$$P_{Re} = I_{Re} \cdot V_{Re} \quad (\text{W}) \quad (171)$$

となる。ここに、 D_e は電極間隔である。このような直流電源の製作費用は、

$$C_{Re1} = 0.02 P_{Re}^{0.709} \quad (\text{K\$ / 台}) \quad (172)$$

となる。ここに製作数は N_{TH} (段数) である。なお回収要極コスト算出には Fig. 8, 9, 10 を利用した。また電極板の費用は

$$C_{Re2} = 0.032 (B \cdot L \cdot H)^{0.711} \quad (\text{K\$ / 枚}) \quad (173)$$

で示される。製作数は $N_{pol} \cdot N_{TH}$ である。ここに、

N_{pol} ; 電極数

B ; 回収部幅 (cm)

L ; 回収部長さ (cm)

H ; 回収部高さ (cm)

である。なお電極はイオン回収時の熱を電極末端部に設けられた冷却液体リザーバーに接触させて冷却されるようになっている。

(2) 回収磁極

回収磁極は電磁石およびマグネット供給電源に分けられる。電源はレーザーパルスと同期した高い周波数で作動する。回収磁極を用いる理由としてはイオンシースや電荷交換、再結合の問題を回避することがあげられる。例えばイオンシースについてはイオンシース厚さの目安としてデバイ長をとると、

$$\lambda_d = \left(\frac{k T_i}{4 \pi n_{io} e^2} \right)^{1/2} = 6.9 \sqrt{\frac{T_i}{n_{io}}} \quad (\text{cm}) \quad (174)$$

で示される。ここに、

T_i ; イオン温度 (K)

n_{io} ; イオン密度 (cm^{-3})

である。このような回収条件においてはイオン温度が低いためデバイ長は小さく、このため

極板よりこれ以上離れたイオンには静電界が及ばず回収できなくなってしまう。さて電場と磁場が同時に作用する場合に必要な磁界の強さおよび電極の大きさは大略、

$$B = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{2 m V}{e}} \quad (175)$$

$$H = \frac{A}{k^2} \{ k \cdot \Delta t - \sin(k \cdot \Delta t) \} + v_T \cdot \Delta t \quad (176)$$

となる。ここに

B ; 磁界の強さ

d ; 電極間距離

V ; 印加される電圧

$$k = \frac{e B}{m}$$

$$A = \frac{e V}{m}$$

$$\Delta t = \cos^{-1} \left(1 - \frac{k^2 d}{A} \right); \text{回収時間 (イオンが電極に到達するまでの時間)}$$

v_T ; イオンの熱運動速度

H ; 原子ビーム進行方向に測定した電極長さ

である。なお回収磁極のコスト算出には Fig.11を利用した。

4.8 プロセス建家

まず床面積を見積る必要がある。主たる構成機器であるレーザー、光学系、セルおよびそれらの台数に従ってこれを求めると、全床面積は、

$$A_{BDG} = L_{BDG} \cdot B_{BDG} \quad (177)$$

となる。ここに、

$$L_{BDG} = (L_{LSL} + L_{OPT} + L_{CEL}) k_L \frac{N_{mod}}{2} \quad (\text{長さ})$$

$$B_{BDG} = (B_{LSL} + B_{OPT} + B_{CEL}) k_B \times 2 \quad (\text{幅})$$

L_{LSL} , B_{LSL} ; レーザーの長さ と 幅

L_{OPT} , B_{OPT} ; 光学系の長さ と 幅

L_{CEL} , B_{CEL} ; 真空セルの長さ と 幅

k_B , k_L ; 幅および長さの余裕度

N_{mod} ; モジュールの数

である。建家の高さをHとすると、建家体積は、

$$V_{BDG} = k_H \cdot H \cdot A_{BDG} \quad (178)$$

となる。ここに k_H は高さ余裕である。またコストは、

$$C = 0.814 V_{BDG}^{0.381} + 0.0227 V_{BDG} \quad (179)$$

と示される。

4.9 その他

(1) 空調設備

建家の必要空調エネルギーは、

$$P_w = P_{w1} + P_{w2} \quad (\text{kW}) \quad (180)$$

と示される。ここに、

$$P_{w1} = \frac{U_{BDG} \cdot A_{BDG} (T_{BDG} - T_0)}{860.4} \cdot \frac{1}{\eta} \quad (\text{kW}) \quad (181)$$

(建家からの放熱エネルギー)

$$P_{w2} = \frac{1}{102} \frac{V_A}{3600} \frac{T_{BDG}}{273} \cdot \Delta P_{BDG} \frac{1}{\eta_c} \quad (\text{kW}) \quad (182)$$

(送風機所要動力)

であり、また、

U_{BDG} ; 放熱量 ($20 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$)

$A = (2 + k_{BDG}) \cdot A_{BDG}$; 放熱面積

A_{BDG} ; 床面積 (m^2)

k_{BDG} ; 余裕 (0.8)

η ; 効率

T_{BDG} ; 室温 (293 K)

T_0 ; 外部気温 (273 K)

$V_A = N_{BDG} \cdot V_{BDG}$

V_{BDG} ; 建家の体積

ΔP_{BDG} ; 送風機ヘッド (100 mm Aq)

η_c ; 送風機の効率

N_{BDG} ; 換気回数 (5回/hr)

である。従って設備費は、

$$C = 1.8 \times 10^{-9} V_{BDG}^{2.34} + 1.63 \times 10^{-3} V_{BDG} \quad (\text{K\$}) \quad (183)$$

となる。ここに、

V_{BDG} ; 建家体積 (m^3)

である。

(2) 受電施設

設備費は次式で示される。

$$C = 9.136 \times 10^4 \exp(1.8 \times 10^{-4} P_A) \quad (\text{K\$}) \quad (184)$$

ここに、

P_A ; プラント全電力 (MW)

その他の設備はプラント全設備の3%, また保守安全には5%を見積もる。

(3) ウラン装荷量

装荷ウラン全重量は、

$$G_u = B \cdot L \cdot D \cdot N_{\text{mod}} \cdot \rho_u \quad (\text{K\$}) \quad (185)$$

となる。ここに

B ; ルツボの幅

L ; ルツボの長さ

D ; ルツボの深さ

N_{mod} ; モジュール数

ρ_u ; ウラン比重 (13.9 ton/m³)

である。従ってコストは、

$$C = k_u \cdot G_u \quad (186)$$

となる。ここに k_u (K\$ / ton) はウランの単価である。

(4) 測定, 制御機器

真空計, 膜厚計, 温度計, シャッター, U液面コントローラー, 回収量モニターなどが含まれる。

$$C = k_M \cdot N_{\text{mod}} \quad (\text{K\$}) \quad (187)$$

ここに、

$$k_M = 24.72 \text{ K\$ / module}$$

とする。

(5) 人件費, 運転維持費

人件費は、

$$C = k_{\text{MAN}} \cdot M \quad (\text{K\$}) \quad (188)$$

で示される。ここに

$$k_{MAN} = 50 \text{ K\$ / yr} \cdot \text{man} \quad (188)$$

$$M = k_M \cdot N_{mod} \quad (190)$$

k_M ; 1 モジュール当りの必要人員 (1 人)

である。運転維持にはプラント全建家コストの一定割合 (2%) をあてる。

(6) 減価償却率

$$\rho_{DEP} = R_i \left(\frac{1}{(R_i + 1)^m - 1} + 1 \right) \quad (191)$$

(7) 大量生産効果

$$\rho_{MSP} = C \cdot N^a \quad (192)$$

ここに,

C ; 資本費

N ; 台数

a ; 定数

である。

(8) 年次価格上昇率

$$\rho_P = \Delta y^C \quad (193)$$

ここに,

Δy = 年次 - 1978年

C ; 定数

である。Cは機器によって異なるが、0.27 ~ 0.67を選定した。

Table 1 Details of cost estimation for LIS uranium enrichment plant

CAPITAL COST

- PLANT SITE
- PROCESS BUILDINGS
 - AIR CONDITIONING SYSTEM
 - CLEAN ROOM
- AUXILIARY BUILDINGS
 - SUBSTATION
 - REPAIR AND ASSEMBLY FACTORY
 - MATERIAL PREPARING FACTORY
- SEPARATOR
 - VACUUM CHAMBER
 - EXCITER WITH OPTICS
 - IONIZER WITH OPTICS
 - VAPORIZER
 - EXTRACTOR
- AUXILIARY INSTALLMENTS
 - VACUUM SYSTEM
 - COOLING TOWER
 - LASER MEDIUM CIRCULATOR

POWER COST

- SEPARATOR
 - EXCITER.....POWER, REACTION LENGTH
 - IONIZER.....POWER, REACTION LENGTH
 - VAPORIZER....TEMPERATURE, REACTION WITH
 - EXTRACTOR....ELECTRODE GAP
- AUXILIARY INSTALLMENTS
 - DYE CIRCULATOR
 - VACUUM SYSTEM
 - COOLING TOWER

RUNNING COST

- SEPARATOR
 - WAVELENGTH ADJUSTMENT
 - CHANGE OF LASER OPTICS
 - ION EXTRACTOR
- AUXILIARY INSTALLMENTS
 - DYE PREPARATION
 - MAINTENANCE OF VACUUM SYSTEM

OTHERS

- INTEREST
- PERSONNEL EXPENSES

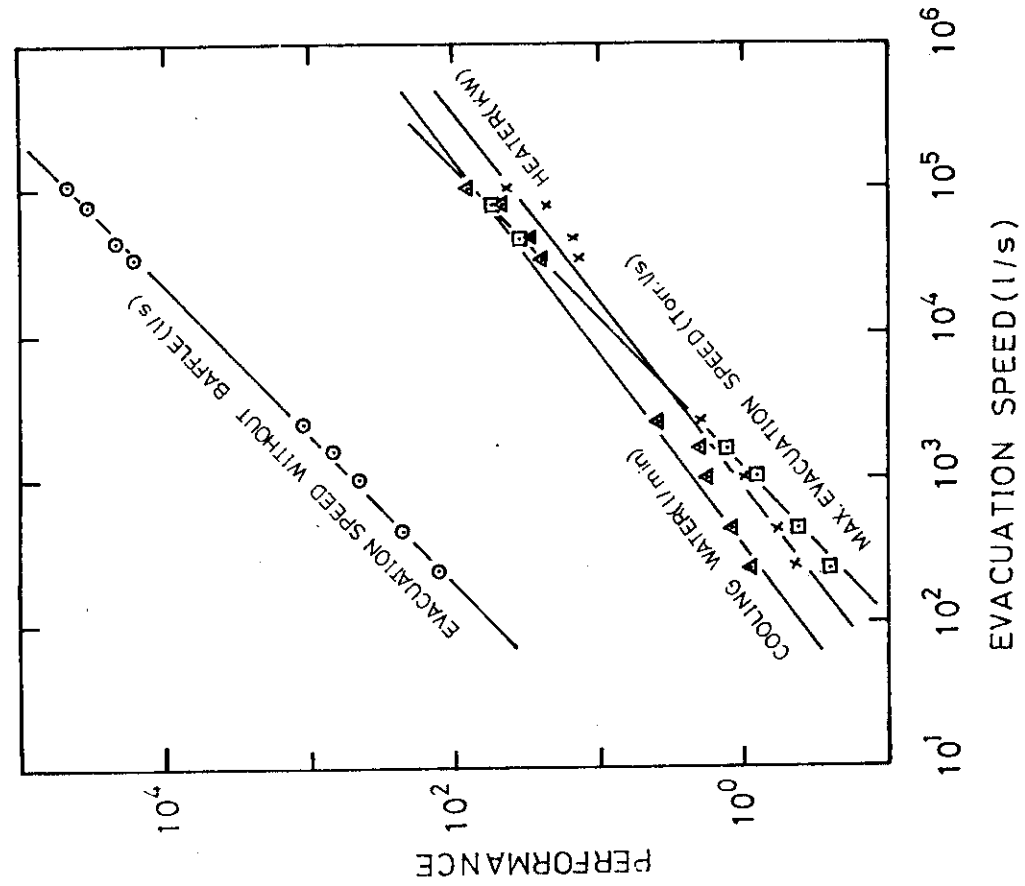


Fig. 5 Performance estimation of diffusion pump

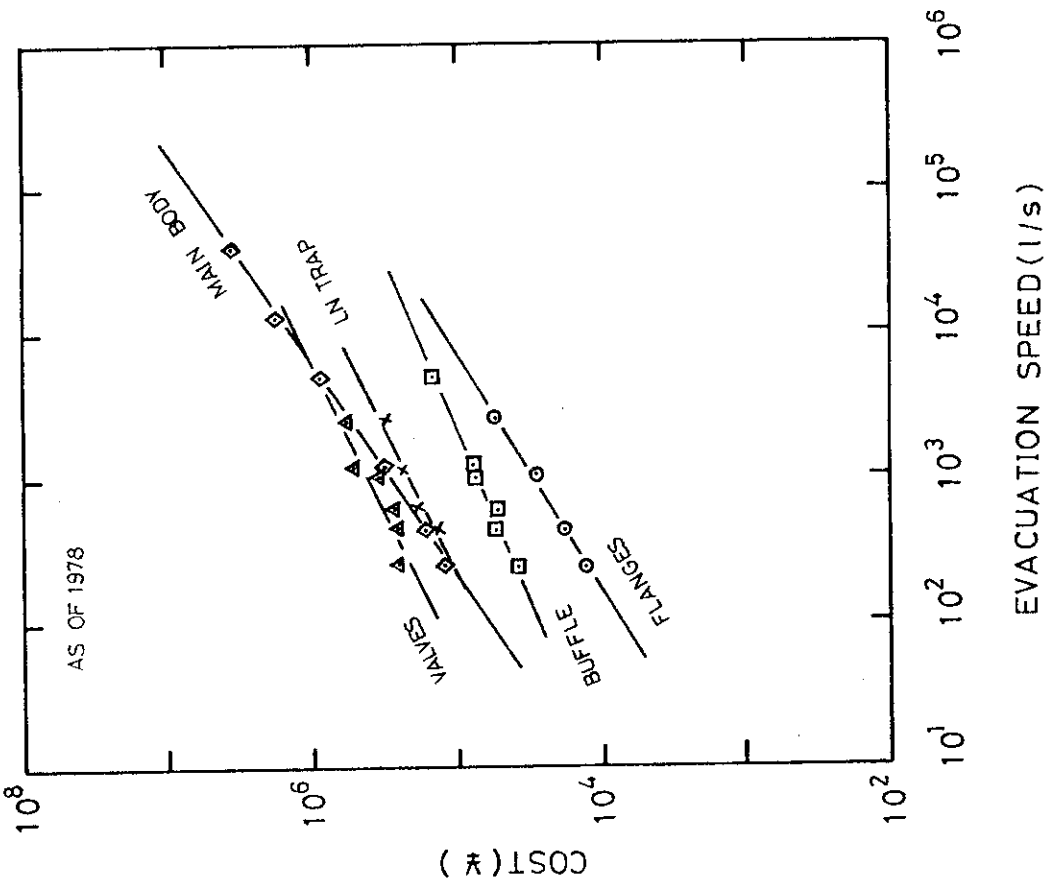


Fig. 4 Cost estimation of diffusion pump

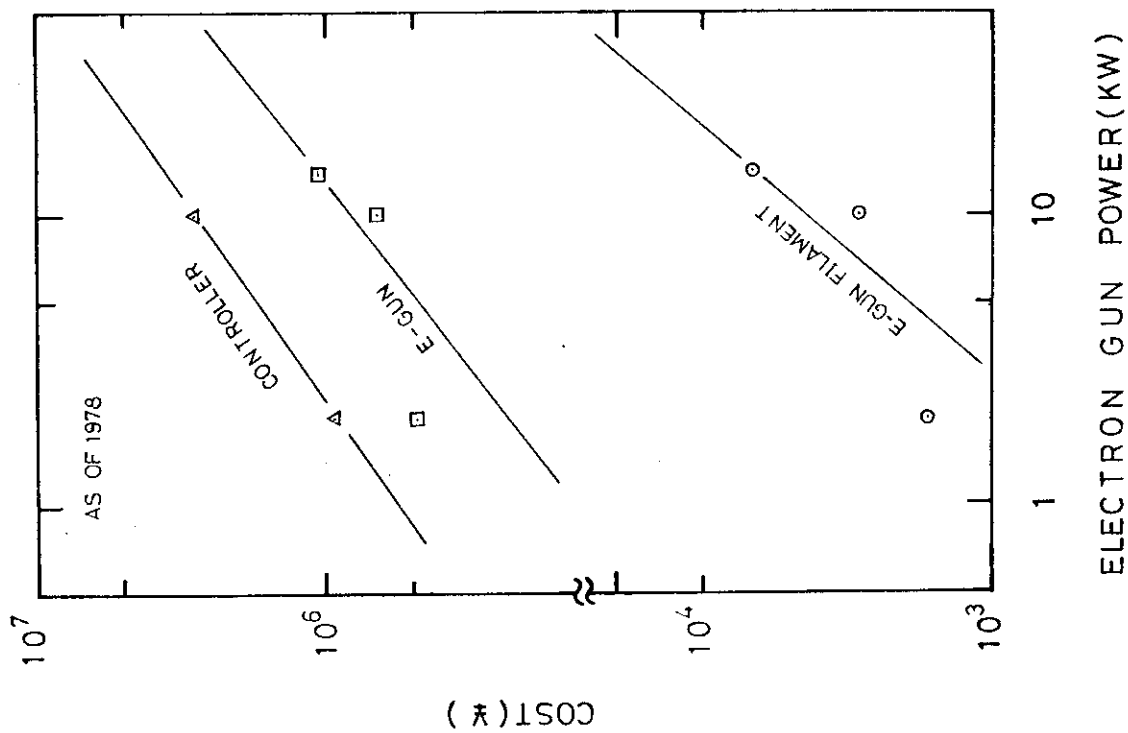


Fig. 7 Cost estimation of electron gun

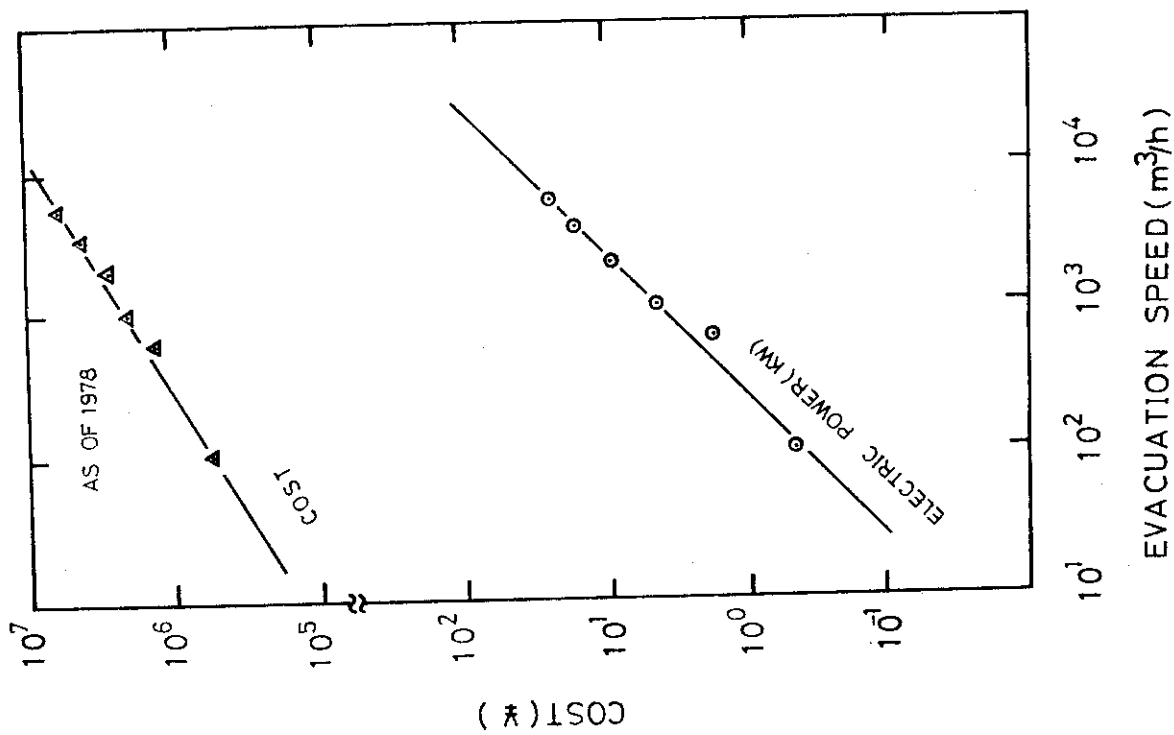


Fig. 6 Cost estimation of mechanic

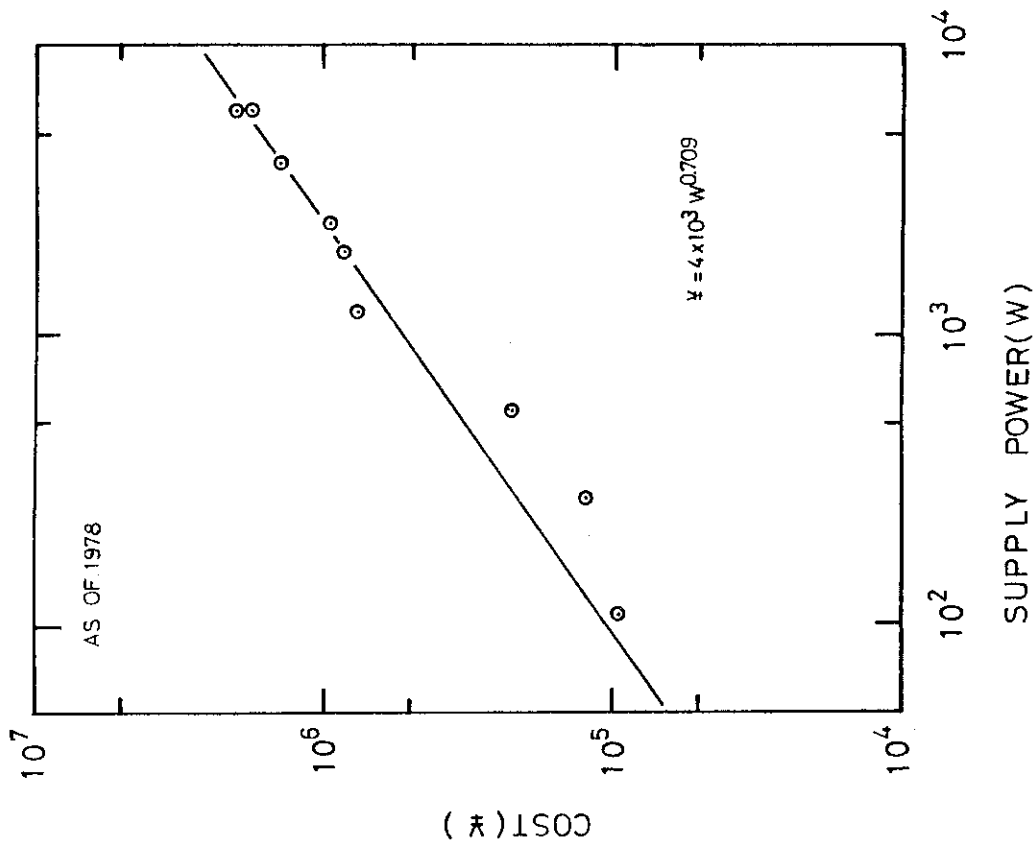


Fig. 9 Cost estimation of power supply for general use

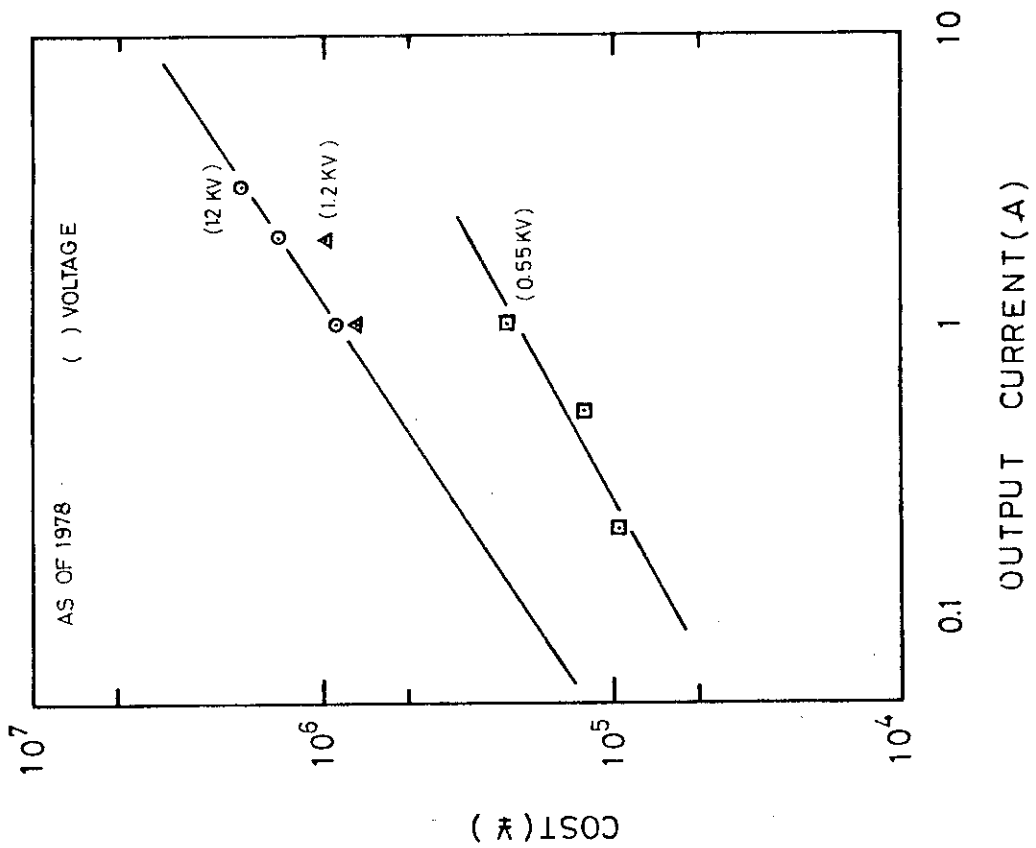


Fig. 8 Cost estimation of ion extraction power supply

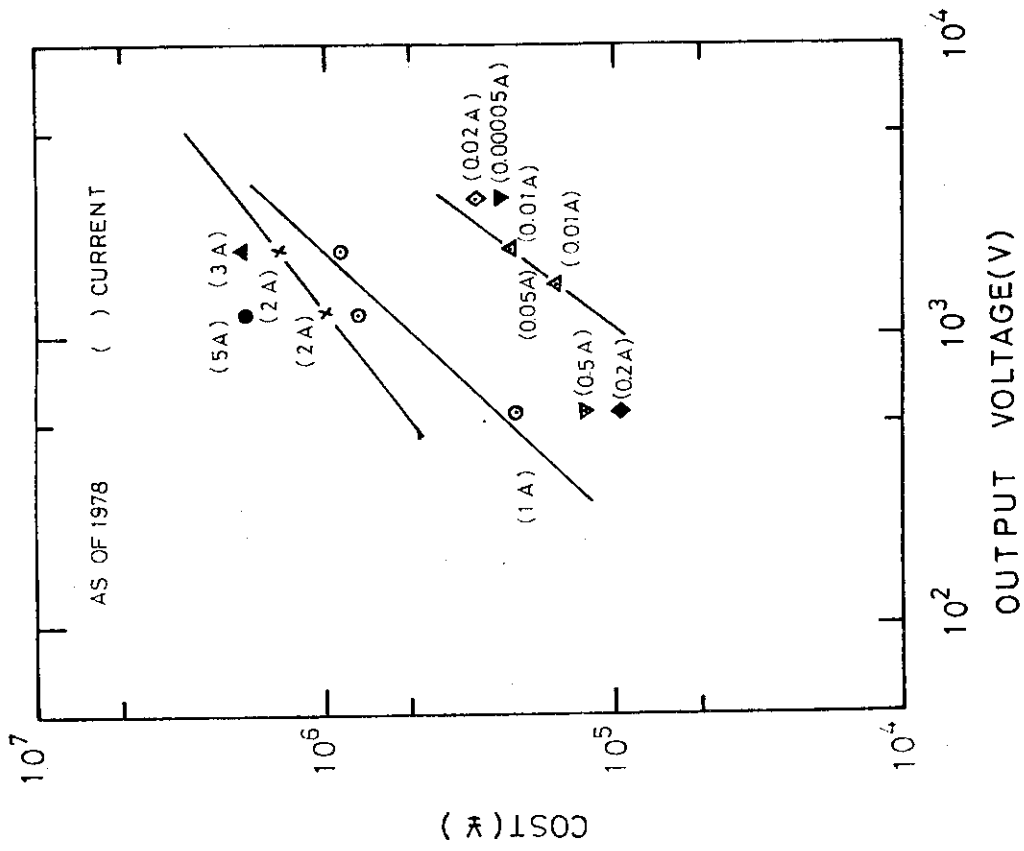


Fig. 11 Cost estimation of power supply for ion extraction electro-magnet

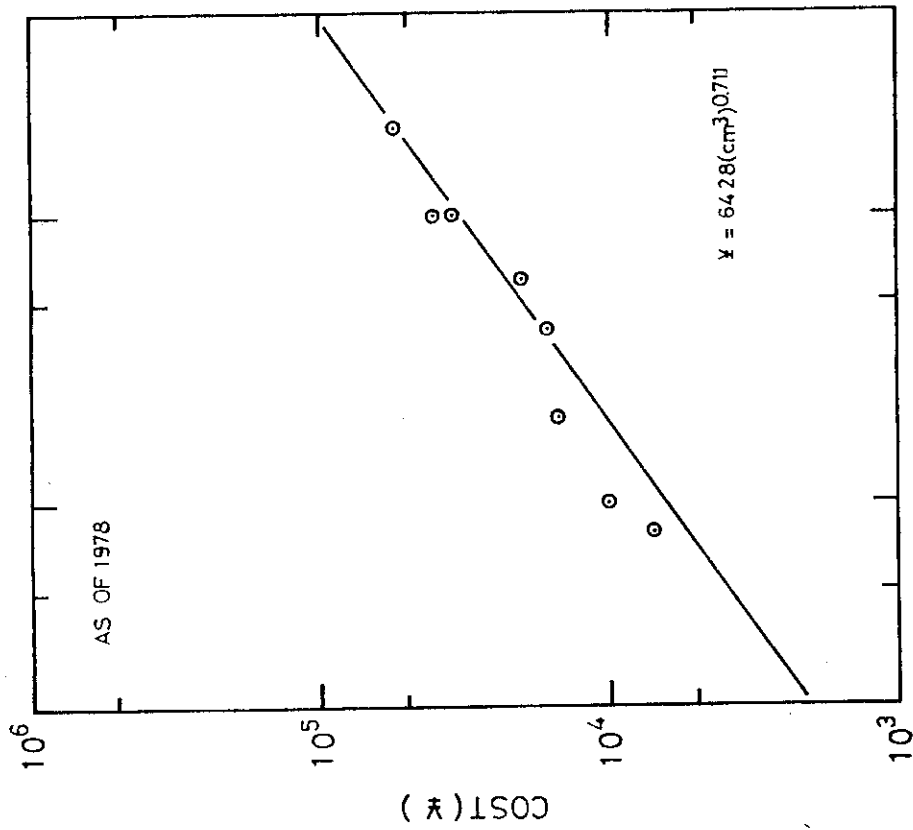


Fig. 10 Cost estimation of tantalum sheet

5. 最適化計算

まず本計算プログラム ELUEP (Economic Evaluation of Laser Uranium Enrichment Plant) に含まれるサブルーチンを以下に示す。(アルファベット順)

MAIN PROGRAM

CONTRL (コントロール)
 ADHES (電極への中性原子, イオンの付着)
 ALPH (準安定状態比率, 原子速度, 密度, 光の吸収)
 APLOT (準位密度の時間変化出力用コム)
 BPLOT (準位密度のレーザー波長依存性出力用コム)
 BDWIDTH (ダイレーザーバンド幅)
 CAPLSL (CVL, RGHL, DLなどの基本コスト)
 CAPMED (レーザー媒質基本コスト)
 CERALL (全評価プログラムの統轄)
 CERBGD (プロセス建家の評価)
 CERMAN (人件費の評価)
 CERCEL (真空セルの評価)
 CERCRL (制御・測定機器評価)
 CEREGN (電子銃加熱機の評価)
 CEREX (建家換気系の評価)
 CERINS (保険評価)
 CERINV (インベントリー評価)
 CERLSR (レーザーシステム評価)
 CERMED (レーザー媒質システム評価)
 CEROPT (光学システム評価)
 CERREC (回収電磁極部評価)
 CERST (受電設備評価)
 CERVAC (排気系評価)
 CHARG (電荷交換)
 CONST (定数類)
 DEP (減価償却)
 DYEFF (ダイ変換効率)
 ELTRD (電極長さ)
 FIN T (スペクトル強度)
 FS W U (分離作業量)
 F V (価値関数)

M S P R (大量生産効果)
 O U T (出力プリント)
 P A R A M (遷移確率)
 P R Y (年次価格変動)
 R A T E (レート方程式)
 R E P L C E (変数変換)
 S I G M A (吸収断面積)
 S P E C (H F S 考慮)
 S T E E P (S T E E P 法による最適化)
 V A P (蒸発形状)
 Y I O N (熱電離)

さてレーザー法 (Laser Separation) によるウラン濃縮を工業的に行うためには経済効率良く濃縮ウランを得ることを考える必要がある。このような考察は、分離器の詳細なる仕様を決定し、かつそれらの配電、生産コスト、生産工程、プラント規模、設置面積、ユーティリティ機器、運転方法等が明らかになって初めて可能となる。しかし現時点では確度の高いデータが得られないため、ここでは分離器、しかも単純な構造の分離器を考え、その最適化を行うことにより分離器の基礎的設計資料として役立つことを目的として計算を行うことにする。従ってここでの最適化の意味するものは一般的な分離器あるいは一般的なプラントの最適化ということではなく、ここに与えるような特定の分離器の基本的な運転を考えた場合の試算であることに注意してほしい。

先にも述べたようにレーザー同位体分離濃縮プラントに要する費用を概ね、次の様に分類する。すなわち大略、設備投資、消費電力、運転費に分けて考えてみる。設備投資には、建設用地、分離プラント建家、補助設備建家、分離器、補器に関する費用が含まれる。本プラントにおいては、重量物や高回転物体が含まれないために床荷重に注意を払う必要はないが、光学系は振動をきらうので十分な注意が必要である。なお、光学路の配置は自由に選べるため、ある程度の空調換気系やクリーンルームを設定する以外には特殊な建家構造を必要とせず、たとえば2～3階建てのプラントも可能となるかも知れない。補助設備建家には大量の電力を供給するための変電設備、分離セルやレーザー関係の定常的な修理や組立てを行うための工場、処理物質となる設備、たとえばウラン金属を適当な大きさに加工するような設備、および得られた製品をブレンディングして希望の濃度を得るための設備等が必要となる。プラントの中心となる分離器としては分離器本体(真空セル)、選択励起するための励起用レーザー、選択励起原子を電離するための電離レーザー、これらに原料を供給するための蒸発器、および得られたイオンを回収するための回収器より成立っている。さらに以上の装置を円滑に運転する目的で補機が設けられるが、これにはレーザー媒質循環器(ダイレーザーを使用する場合には劣化色素を回収し新しい色素を補充する必要がある)、分離器本体を高真空に維持するための真空排気装置、レーザーや分離器などを冷却するための冷却水循環器などが含まれている。一方分離機および補機についてはその消費電力を考えねばならない。分離器において電力を消費する部分は、励起用レーザー、電離用レーザーおよび蒸発器用の熱源とイオンを回収するための回収器

消費電力である。補器では色素循環器、真空排気装置、冷却水およびレーザー媒質循環器にかなりの電力を要す。なお、その他には分離プラント建家の空調・換気系などでも電力が消費される。次に運転費についてであるが、これには分離器・補器の保守・調整が含まれる。このうち分離器に対しては励起用レーザー波長調整、レーザー・光学系の交換、ウランのバッチ回収などが含まれよう。また補器については、色素の調整・交換、真空装置の保守などが含まれる。

以上は2段階光電離法を用いたプラントに関する費用の見積りを概略述べたものであるが、この他にも金利などが含まれる。概観すると、本プラントを構造的な面から見ると、次の点がガス拡散や遠心分離或いはノズル分離法と比べて有利と思われる。

- ① 重量物・高回転物体を含まないので、プラント全体をコンパクトにできる為に建設面積が少なくて良く、この為都市近郊や電力事情の良い場所にプラントを容易に設置しうる。
- ② 原理的に消費電力が少く、このため受電設備なども小さくなり特別の発電設備を設ける必要がなくなる。
- ③ 分離器が全体とは別個の分離されたモジュールとなり、それらが互に光によって結合されているために個別の保守や調整が容易にできる。

ただし、次のような短所も忘れてはならない。

- ① 金属ウランを用いる場合、原料の供給および製品の回収は UF_6 を用いる場合に比べ、複雑で費用もかかる。このためなるべくモジュール当りの処理量を大きくするような設計としなくてはならない。
- ② 色素などのレーザー部品の劣化が激しい場合にはこれらの使用量が多くなり、媒質の価格、循環のための消費電力などが増大し全体のコスト高につながるおそれがある。

以上の点も含めてレーザーウラン濃縮プラントの特性を明らかとするために、以下に示すような計算を行った。

5.1 2段階光電離法

さて2段階光電離法による濃縮プラントと一口に言ってもその構造及至幾何学的形状には種々のものが考えられる。ここではその中でも最も単純で基本的な分離器となる Fig.2 と同様の単位分離器を考えよう。同図の場合には、真空セル（分離器）内で高温で蒸発するウラン原子の直上に、2種類の連続発振レーザー光を照射することにより ^{235}U を選択的に電離し、静電界によって生じたイオンを回収しようとするものである。長さ L 、幅 B のルツボより均一に蒸発するウラン原子の直上に幅 B 、高さ H の短形状の連続発振レーザー光を同一光路で蒸発長さ L だけ照射するものとする。実際の装置では、複数のモジュールを1ユニットとしてフォトンの有効利用の計れる装置が作られる。しかしここでは簡単のために L の長さ照射される光のみが利用されるものとした。従って、実際の消費電力等を正確に把握することよりも、それらに各パラメーターが与える影響を見るのがここでの計算の目的となる。このようにして光電離された ^{235}U は、その場所に同時に作用する電界の作用により回収されることとなる。なお、このような計算においては上に述べた形状のほか励起レーザー出力 W_1 、電離レーザー出力 W_2 、蒸発温度 T などのパラメーターを変化させた場合の特性を求め、最終

的にはそれらのパラメーターに関し最適化を行った。

① パラメータスタディ

ここではパラメーターが濃縮性能にどのような影響を与えるか、あるいはエネルギー最適点にはどのようにして到達するかを説明する。

まず、Fig. 12は電極への付着を考えない場合の濃縮度の変化を温度に対してプロットしたものである。全ての条件が一定で温度だけを変えた場合には、特定温度以上になるとその濃縮度は急激に下ることが分る(この場合は2500K)。これは密度上昇に伴う電荷交換損失の増大によるものである。Fig. 13は電極の幅に対する濃縮度の変化を見たものであるが、電極幅が広くなると電荷交換が増大するために、やはり濃縮度は下る。

次に収量とエネルギー効率との関係を考える。Fig. 14に示すように、収量を温度により変える場合には、いずれの励起レーザー出力に対しても最適点があることが分る。これは電離レーザー出力を変えた場合にも言えることであるが(Fig. 15)、励起レーザー光には図中の範囲では強度をいくら高くしてもそれ以上効率を上げ得ない点が出現することが分る。電離レーザー、励起レーザー光を変化させた場合のエネルギー効率をFig. 16に示す。この図から、電離レーザー光を強くして収量を増大させる場合、励起レーザー光もある程度強くなくては意味のないことが分る。Fig. 17には電極の高さ H と幅 D_0 を変えて収量を変えた場合のエネルギー効率を示した。この図から H が一定であっても収量の同一となる点は D_0 に対して2個存在し、幅の狭い方がエネルギー効率の良いことが分る。これは電荷交換の影響によるものと思われる。Fig. 18はルツボ長さ Z を変えた場合の特性であるが、 Z が短かすぎても長すぎてもエネルギー効率が悪くなる。また Z が長くなると吸収が大きくなるため、余り長くしてもそれ以上収量の増大することは無い。

評価関数の1例としてエネルギー全体効率を選んで示した。これは特に、エネルギー効率と収量との積で示したものである。Fig. 19は、蒸発温度と励起レーザー出力の2つをパラメーターとして、ルツボ長さ Z を変えた場合の特性を示す。各々の山となる部分はその条件での最適点である。この中から最も全体効率を高くするものが真のエネルギー最適点となる。

こうして得た最適点をプロットしたものがFig. 20である。この例ではレーザー出力を高くするほど最適点は高温側へずれている。Fig. 21には励起レーザー光を変えた場合の全体効率を示した。励起レーザー光が或る程度の出力に達すれば全体効率はほとんど変わらないことが分る。

② 最適値

先にパラメータスタディを行ったが、ここでは最適点でのふるまいを見てみよう。この計算の初期条件は先のものとは異なり、Table 2に示すようなものである。Fig. 22には初期資本費、消費動力、減価償却、保守費の最適点近辺の変動を、ルツボ長さを変化させて求めてある。この中では投資費用の変化が最も大きいことが分る。Fig. 23には同様にルツボの幅を変化させた場合を示したが、この時消費電力は単調に増大する。Fig. 24は、最適値からのずれを各パラメーターの変動に対して求めたいわゆるパラメーター感度を示した。これによると電極間距離が大きな影響を与えることが分る。これに対して供給濃度は余り影響を与えないことから低品位ウランからの濃縮にとっては都合が良いといえる。

Fig. 25にも同様に同様にレーザー光強度とレーザーライン幅を変化させた場合のパラメータ変化を示したが、いずれも最適点において最も低いコストを与えていることが分る。Fig. 26にも同様のパラメータ変動を、ルツボ温度、ルツボ幅、ルツボ長さ、電極位置について示した。ルツボ長さを除いてはいずれも最適点でのコストが最も低くなる。特にルツボ温度がコストに与える影響は大きい。

続いて最適点において各部分の占めるコストの割合を見てみよう。Fig. 27には資本費と運転費を示した。資本費のうちレーザーがほとんどを占め、次に電子銃が占めていることが分る。運転費は毎年必要となる費用であるが、レーザーと電子銃を加えると50%以上を占めることになる。Fig. 28には操作費を示した。これは運転費に動力消費を加えたものである。これによると減価償却の部分が50%以上で、保守が35%程度、動力費が15%程度であり、設備投資費が大きすぎるのがうかがえる。さらに動力消費を細分化してみると、実に電子銃による加熱費用が75%を占め、レーザーは20%程度に過ぎないことが分る。このことから先にも述べたように蒸発に関する部分がコストに与える影響は大きい。次にレーザーに関するコストをFig. 29に示した。これによると電離レーザーには60%の費用を要するが、ダイレーザーにはたかだか数%に過ぎないことが分る。レーザーのうちダイレーザーポンプ用レーザーについてはFig. 30に示したように電源とヘッドの交換部品がそのほとんど（併せて80%くらい）を占めることが分る。ダイレーザーについてもやはりレーザーヘッドの交換部品に費用のかかることが分る。電離レーザーについてはFig. 31に示すように電源の交換だけで75%を占めている。最後に光学系については波長コントローラーに50%を要し次にアライメント関係で20%を占めていることが分る。

0.25%の劣化ウランからの濃縮プラントについて得られた最適点の結果をTable 3に示す。

5.2 3段階光電離法

銅蒸気レーザー(CVL)で励起されるダイレーザーオシレーター(OSC)を増幅して(AMP)原子ビームに照射する状況をFig. 2に示してある。ルツボは1台で表面積は $L \times B$ で加熱は電子銃にて行うものとする。電極の構造は長さ l 高さ h のタンタルシートが n 枚、 d の間隔で並んでいるものとする。この電極の一群を1段と呼ぶ。まず第1段にて選択電離が行われるが、全原子が電離されるわけではなく、また電荷交換により損失分もあるので、これは2段以降での処理にまかされる。このようにして数段で回収を行う場合各段の濃縮度は異なるので、全てを併せることによって規定の濃度が得られるよう配慮される。

Table 4には計算の初期条件を示した。初期パラメータとしては、励起確率、励起状態寿命、供給ウラン濃度、プラント容量、段数、励起レーザー波長が与えられている。Fig. 32, 33には段数によるパラメータ値の変化を示す。所定濃縮度を得るには、段数が少ない場合には電極間隔をせまくして電極数を増大しなくてはならないが、或る程度段数が増加すると収量を増大しなくてはならないため、電極枚数が増大する。これに応じて電荷交換率も変化する。段数が増加すると、もちろんレーザー台数と必要な人員は増大するが廃棄材濃度は下げることが可能である。また動力消費は段数が少ないと処理量が少なくなるため、

蒸発温度を高くして蒸気密度を上げねばならず蒸発コストが高くなるが、段数が多いとレーザー消費電力が高くなるため最小点が存在することになる。その結果濃縮コストにも最適点が存在する。この議論は結局以下のように考えることにより理解されよう。

○蒸発温度が高くなると、

- i) 準安定原子数が多くなり励起対象原子が少なくなる。その結果廃棄材濃度が上がり分離作業量は低下する。
- ii) 蒸気密度が高いので反応域と蒸発面との距離を大きく取る必要がある。
- iii) その代り電極構造を大きくしても付着中性原子の量は少なくなる。
- iv) 蒸気密度が高いと電荷交換が多くなるので電極間距離を小さくしなければならない。
- v) 電極間距離を小さくすると付着中性原子の比率が大きくなり濃縮度は低下する。

すなわち分離作業量は、濃縮度、付着中性原子、電荷交換蒸発温度により左右されるが、これは、電極構造を介して決まるパラメーターである。

Fig. 34 には段数を5段とした時の各段におけるパラメーター変化を示した。分離係数は後段になるほど上昇するが各段ともほぼ類似の性能を有していることが分る。

Fig. 35, 36 には段数5段で、プラント容量がそれぞれ100, 1000 ton・SWU/y の場合の特性を示した。これは“レーザー原子法が高濃縮を得やすいために核拡散上問題がある”といわれていることに対する説明とも言える。すなわち3%の商用プラント(図の設計点)において蒸発温度を上げると電荷交換が多くなって濃縮度は低下するし、温度を下げると電荷交換は少なくなるために濃縮度は多少は上がるものの、電極付着原子が存在するため高濃縮ウランとはなり得ないことが分る。

Fig. 37, 38 には蒸発温度の分離作業に与える影響を示した。前者は最適点(2700 K), 後者はこれからずれている場合の特性である。

Fig. 39 にはプラント容量(生産規模)と濃縮ウランコストとの関係を示した。もちろんプラント規模が増大すればコストは低下する。コストが40 \$/kg・SWU(1978年時の推定濃縮ウランコスト)以下で経済性があるとすれば、約3000 ton・SWU/yrが最小経済規模ということになる。

Table 5 には段数1の場合に計算した1000 ton・SWU/yr プラントの最適値を示す。

Table 6 はコストおよびその内訳を示してある。Table 7 は3段の各段について最適値を求めたものである。

Fig. 40 には、このようなモジュールを3台用いた時のプラントの1ブロック構成を示す。各モジュールは廃棄材濃度を下げるために用いられており、製品としての3%ウランは各モジュールから取り出すことが可能である。いずれにしろ、天然ウランを供給して廃棄材濃度を0.1%以下としうることが分る。

6. そ の 他

こうした経済評価のほか、レーザーウラン濃縮プラントに対する環境、安全、健康、社会利益に関し検討も重要である。

原子法では光電離や化学反応による回収が考えられるがその主要要素については前述したように概ね次のように規定される。

原料供給は金属棒やパウダーの形で行い、蒸気源はEビームや抵抗加熱を考える。レーザーにはNd・YAGのSHGまたはCVLを利用する。回収はMHDや化学反応を行う。ダイレーザーはVISレーザーでポンプする高線返し数、オシレータ・アンプ方式のものを用いるが、アンプ等についての開発は終了しており、最適ポンプレーザーとしてCVLの開発が待たれる。MHD回収においてはMはeをとじ込めるために利用されている。すなわちeの易動度は電場方向に対して小さくなり電導度は悪くなる。つまりeを加熱することなくプラズマを通してEを作用することができる。なお製品回収はインゴットとして行う。

このようなプラントに対しては以下のような問題点について解決を図る必要がある。

- VIS, UVレーザーによる被曝
- ダイ, フッ素化合物, オゾンなどによる化学的影響
- 回収電磁極による磁場の影響
- 使用される化合物
- 核 拡 散
- X線・電子線による効果
- レーザー用のCu, フッ化カーボン等の影響
- 廃棄物の影響
- 立地場所の影響
- 保償問題

などである。これらに関係する法規としては、

- 清浄空気に関する法律
- 水質汚染に関する法律
- 労働衛生法
- 有害物質に関する法律
- ALAPの考え方
- ウラン核燃料サイクル規則
- 放射線障害防止法

などがある。

Table 2 Initial Condition

PARAMETER	VALUE	PARAMETER	VALUE
EXCITATION CROSS SECTION	$1 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$	ELECTRODE INTERVAL	1 CM
IONIZATION CROSS SECTION	$1 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$	ELECTRODE THICKNESS	50 MICRON
LIFE TIME	200 NSEC	PRODUCT ASSAY	3%
EXCITATION WAVELENGTH	6000 A	FEED ASSAY	0.25%
IONIZATION WAVELENGTH	3000 A	LIFE TIME OF PUMP LASER	5000 HRS
PLANT CAPACITY	10000 TSWU/Y	LIFE TIME OF IONIZER	10000 HRS
NUMBER OF HFS	8	PLANT LIFE TIME	15 YRS
CENTER POSITION OF HFS	3RD.		

Table 3 LIS plant specification (Depleted U stripper)

PARAMETER	VALUE	PARAMETER	VALUE
PULSE DURATION	123 nsec	TEMPERATURE	2870 K
HEARTH WIDTH	14 CM	SEPARATIVE WORK	0.00314 KG-SWU/S/MODULE
HEARTH LENGTH	1 CM	FEED	0.00508 KG/S/MODULE
PUMP LASER	1041 W (570)	TAIL ASSAY	0.12 %
DYE LASER	72 W (1140)	INITIAL COST	1.9 B\$
IONIZER	970 W (1482)	PRODUCT COST	38 \$/KG SWU
HEARTH TO REACTION ZONE INTERVAL	74.5 CM	NUMBER OF MODULES	114
VAPORIZER ANGLE	11		

Table 4 Initial condition

PARAMETERS	SYMBOLS	VALUES
EXCITATION CROSS SECTION (FOR ^{238}U)	σ_1	10^{-13} cm^2
	σ_2	10^{-13} cm^2
	σ_3	10^{-13} cm^2
LIFE TIME OF EXCITED STATE	τ	200 nsec
^{235}U CONCENTRATION (FEED)	x_F	0.711%
PLANT CAPACITY	T_{SWU}	100 ton.SWU/Y
NUMBER OF STAGES	n	5
EXCITATION WAVELENGTH	λ_1	6000 A
	λ_2	6000 A
	λ_3	6000 A

Table 5 Optimized values

V A P O R I A T I O N		
ATOMIC VELOCITY		4.37×10^4 cm/s
BEAM PRESSURE		2.07 Torr
TEMPERATURE		2701 K
VAPORIZATION RATE		1.77×10^{-2} Kg/s/mod
WIDTH OF HEARTH		24.8 cm
LENGTH OF HEARTH		5.64 cm
FRACTION OF ATOMS TO BE EXCITED		73.2 %
FLUX ATO REACTION REGION		1.03×10^{19} /cm ² s
L A S E R		
ABSORPTION OF LASER BEAM		25.8 %
PULSE WIDTH		351 ns
PULSE REPETITION RATE		20000 Hz
LINEWIDTH OF SELECTIVE EXCITER		1.06 GHz
EXCITATION PROBABILITY	W_1	3.45×10^5 /s
	W_2	2.65×10^6 /s (235U)
	W_3	2.74×10^6 /s
	W_1	4.07×10^3 /s
	W_2	3.03×10^4 /s (²³⁸ U)
	W_3	2.8×10^4 /s
LINEWIDTH OF EXCITER	$\Delta \nu_2, \Delta \nu_3$	0.5GHz

Table 5 (continued)

E L E C T R O D E	
CHARGE EXCHANGE CROSS SECTION	$2.05 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$
CHARGE EXCHANGE RATIO	30.6 %
ATOMIC BEAM DIVERGENCE	28.7 times greater
LENGTH OF ELECTRODE	134 cm
WIDTH OF ELECTRODE	30.5 cm
DISTANCE FROM HEARTH	247 cm
ATOMIC BEAM DIVERGENCE(ANGLE)	7.12 deg.
NUMBER OF ELECTRODES	91
ELECTRODE SPACING	3.26 mm
I O N R E C O V E R Y	
THERMAL IONIZATION	0.11 %
SEPARATION FACTOR	α β 4.88(changing in 1.12 every stage)

Table 6 Results of cost estimation

	INITIAL INVESTMENT (%)	RUNNING COST (%)	POWER COST (%)
LASER	51	32.6	2.8
LASER MEDIUM	15.5	12.4	
OPTICS	2.1	1.4	
VACUUM CHAMBER	2.12	0.08	
ELECTRON GUN	23.5	17.9	95.0
VACUUM SYSTEM			0.07
CONTROL SYSTEM	1.32	0.2	
PROCESS BUILDING	1.2		
AIR CONDITIONING		0.07	2.14
POWER STATION		0.04	
INVENTORY	3.4	2.1	
PERSONEL EXPENDITURE		2.1	
INSURANCE		31.0	
TOTAL (PLANT)	1.37×10^5 K\$	2.21×10^4 K\$/Y	13MW
NUMBER OF MODULES	1		
NUMBER OF LASERS	423		

Table 7 Optimized value for 3-stage-recovery module

PARAMETERS	SYMBOL	VALUES (STAGE)		
		1ST.	2ND.	3RD.
ELECTRODE HEIGHT	h cm	10	5	5
ELECTRODE LENGTH	l cm	230	255	260
DISTANCE FROM HEARTH	s cm	128	148	157
NUMBER OF ELECTRODES	n	190	208	220
ELECTRODE SPACING	d cm	1		
HEARTH	L cm	50		
	B cm	1		
TEMPERATURE	T K	2600		

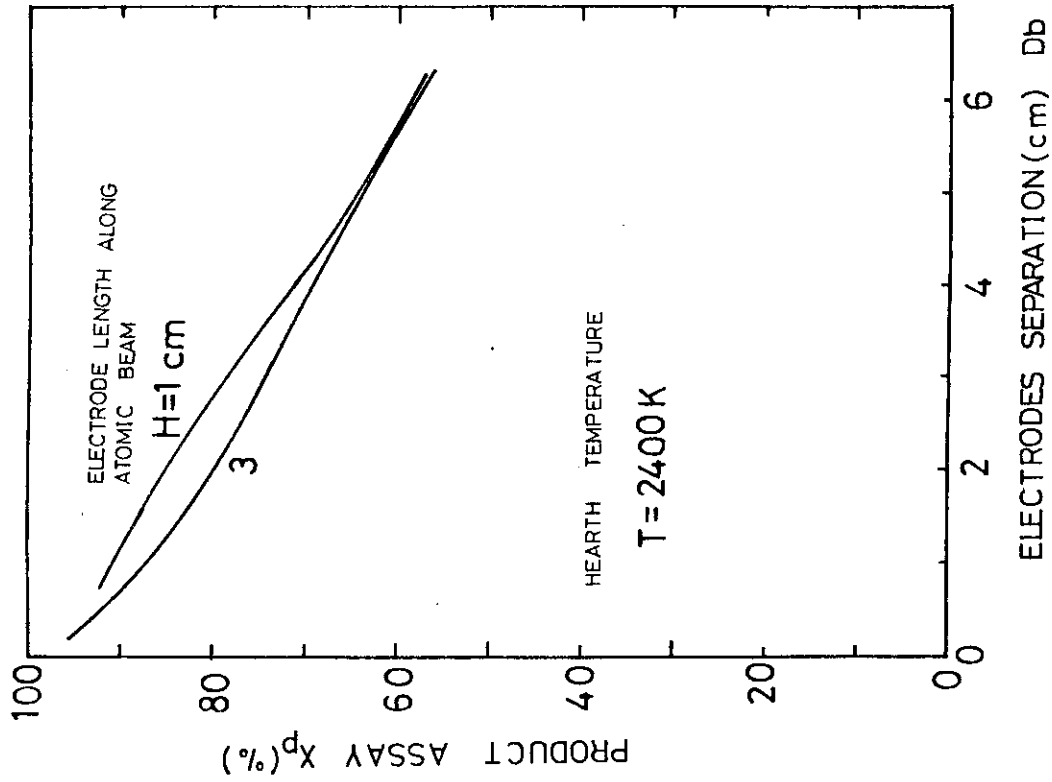


Fig. 13 Decrease of product assay with increasing electrode gap

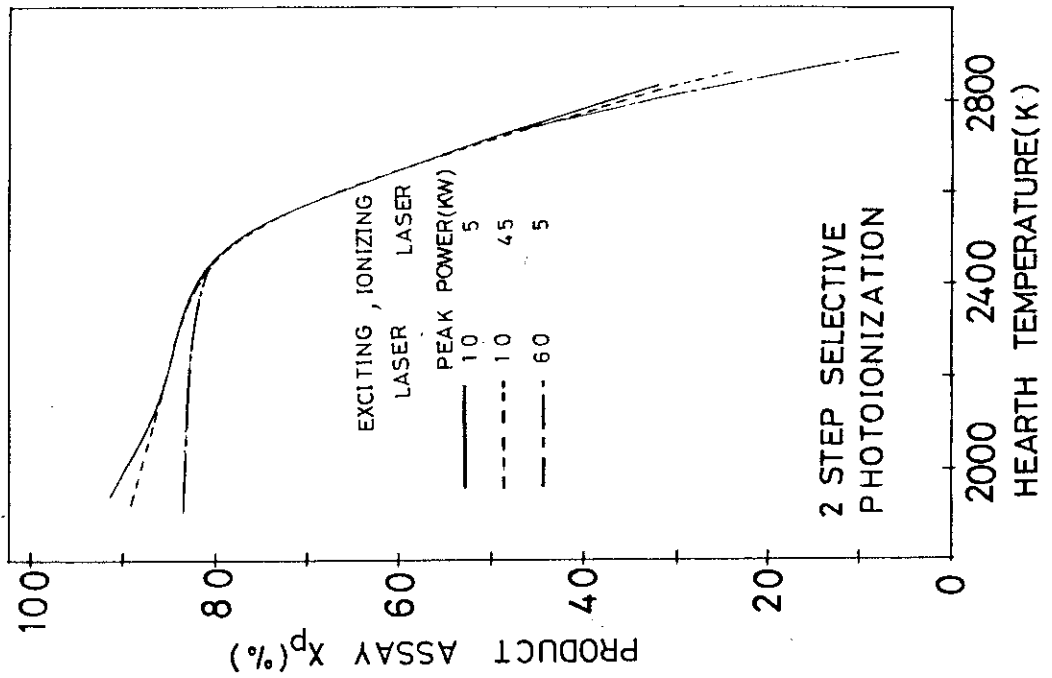


Fig. 12 Decrease of product assay with hearth temperature rise

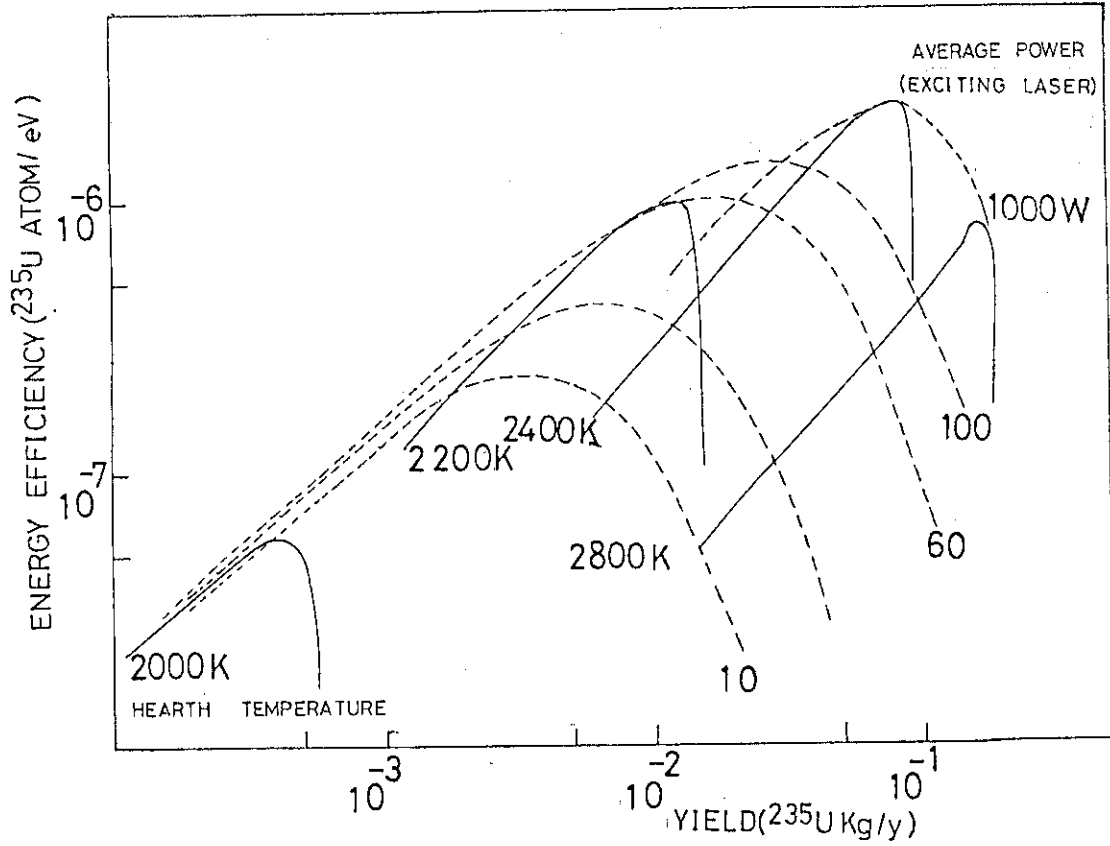


Fig. 14 Energy efficiency-Yield chart
(hearth temperature, exciting laser power)

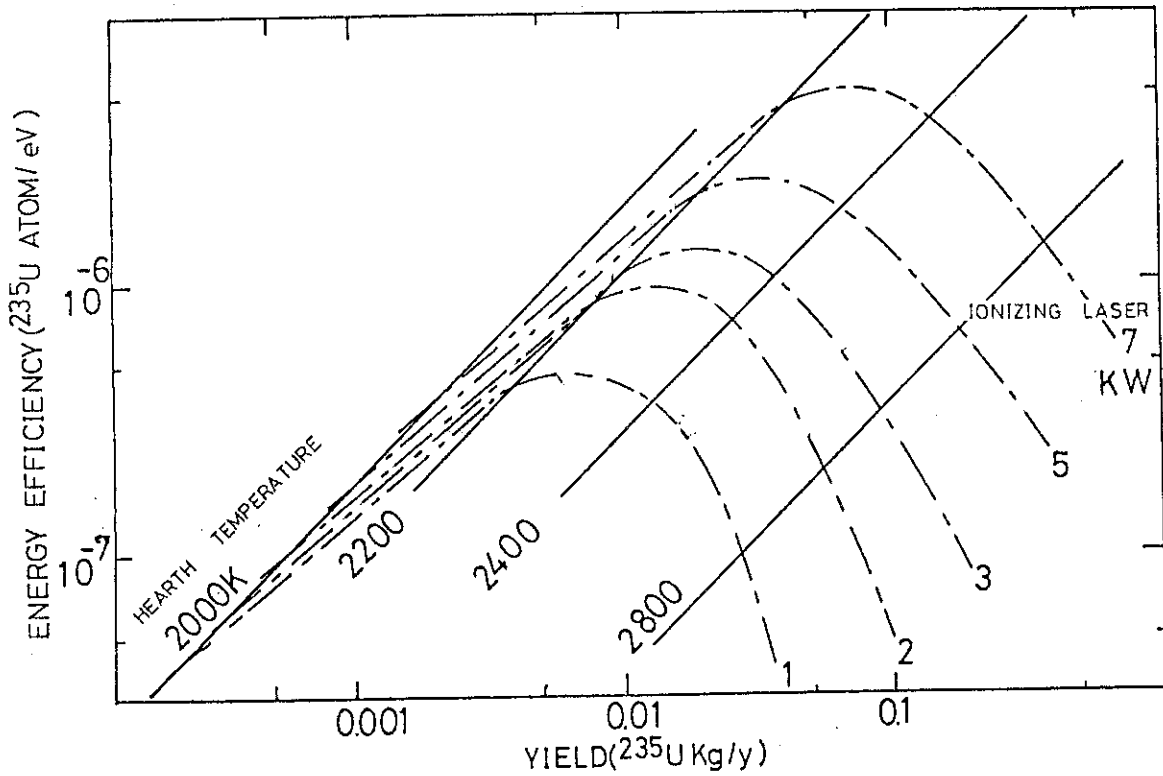


Fig. 15 Energy efficiency-Yield chart
(hearth temperature, ionizing laser power)

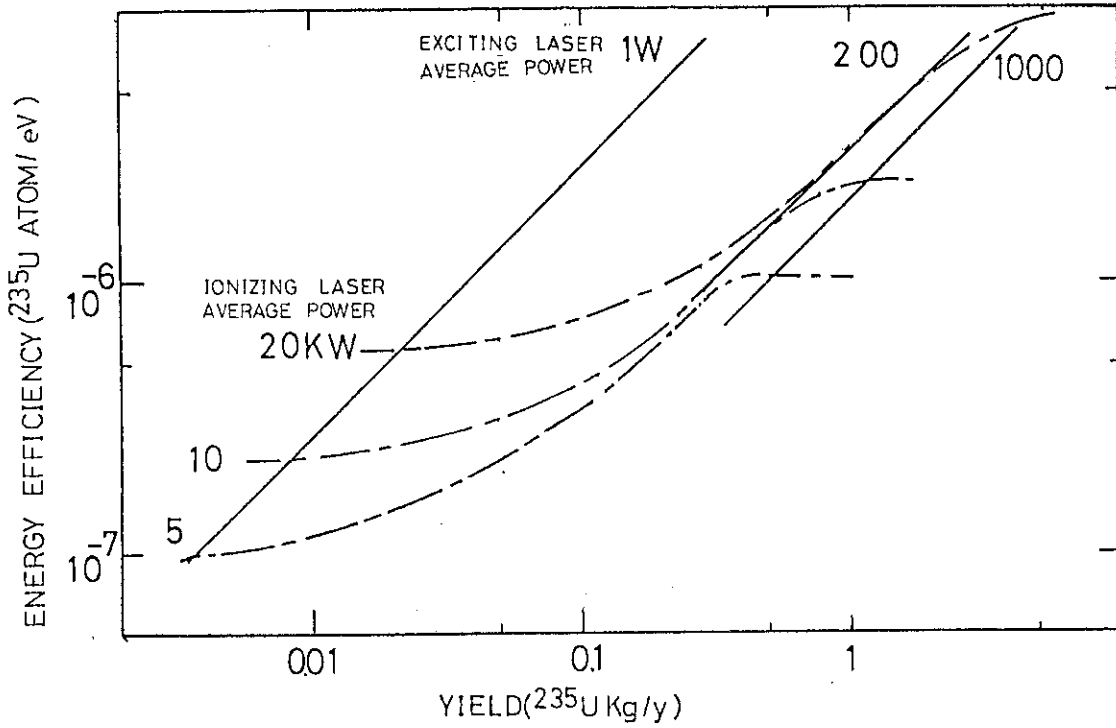


Fig. 16 Energy efficiency-Yield chart
(ionizing laser power, exciting laser power)

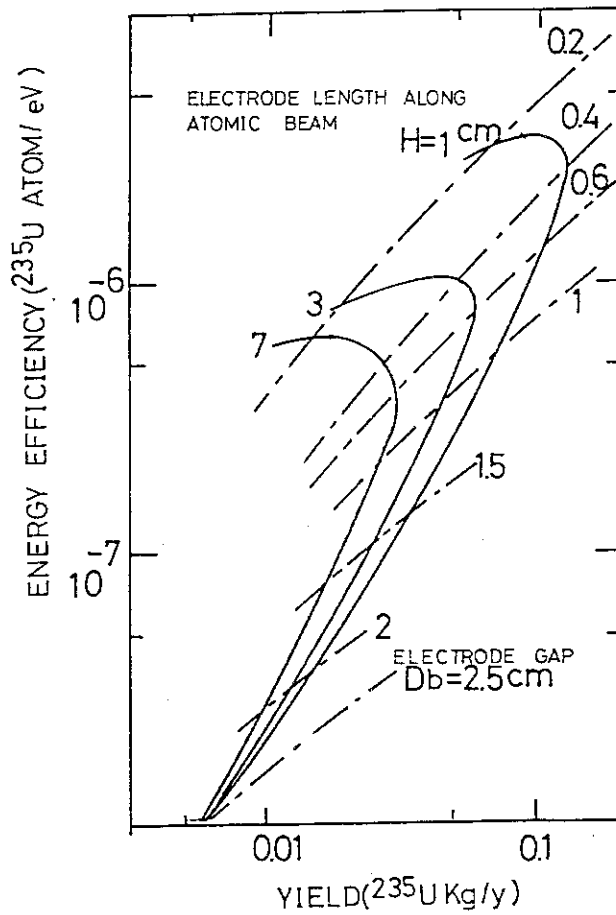


Fig. 17 Energy efficiency-Yield chart
(electrode length along atomic beam, electrode gap)

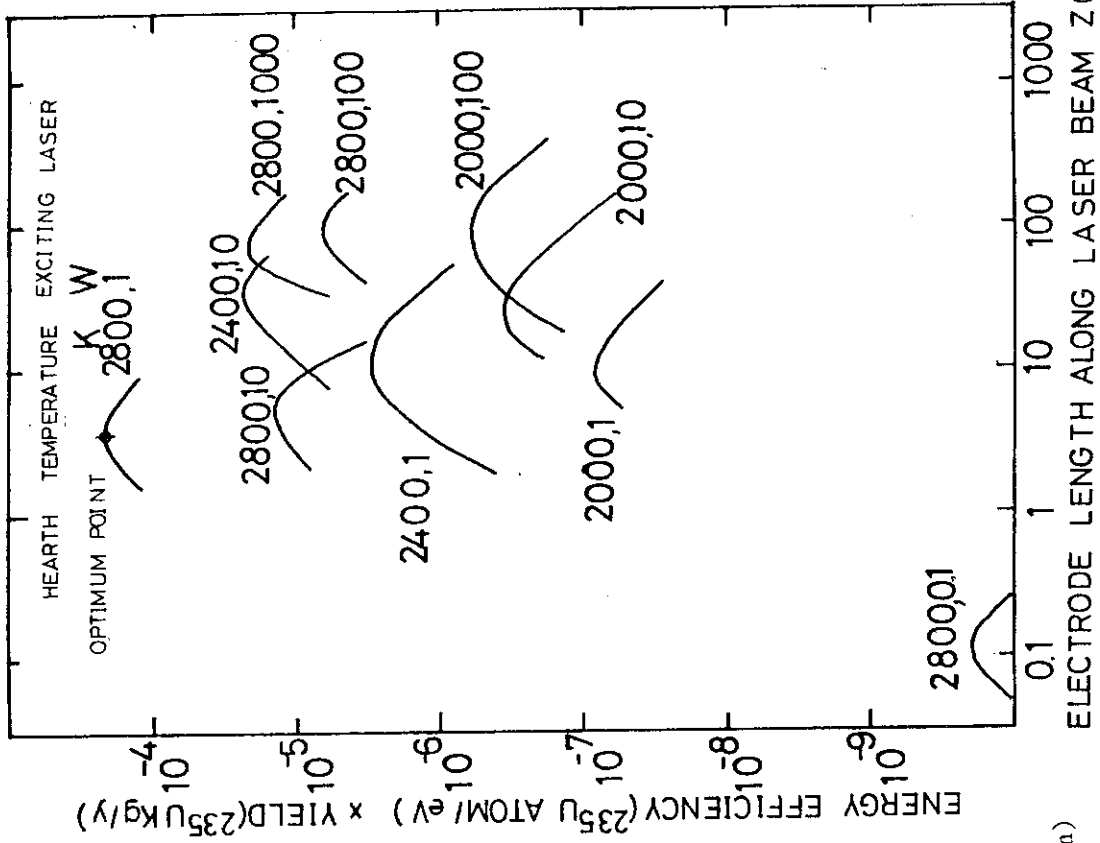


Fig. 18 Energy efficiency-Yield chart
(hearth temperature, electrode length along laser beam)

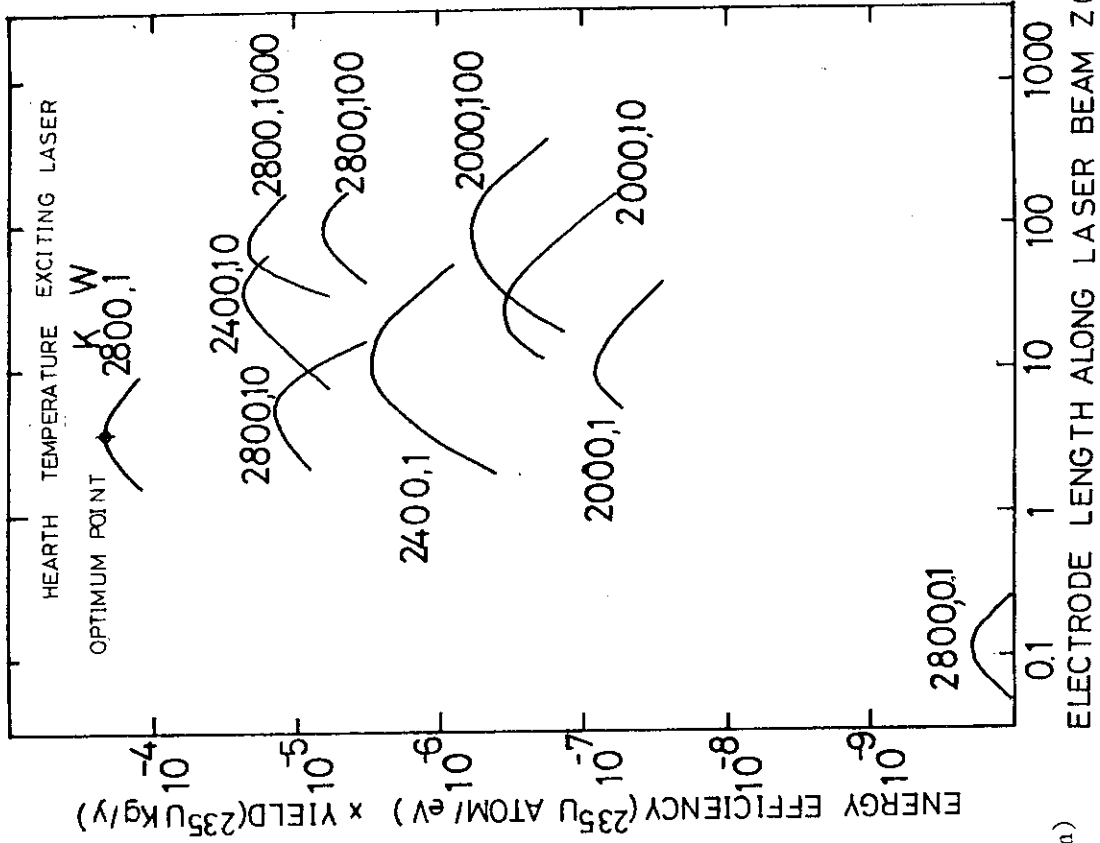


Fig. 19 Approaching optimum point

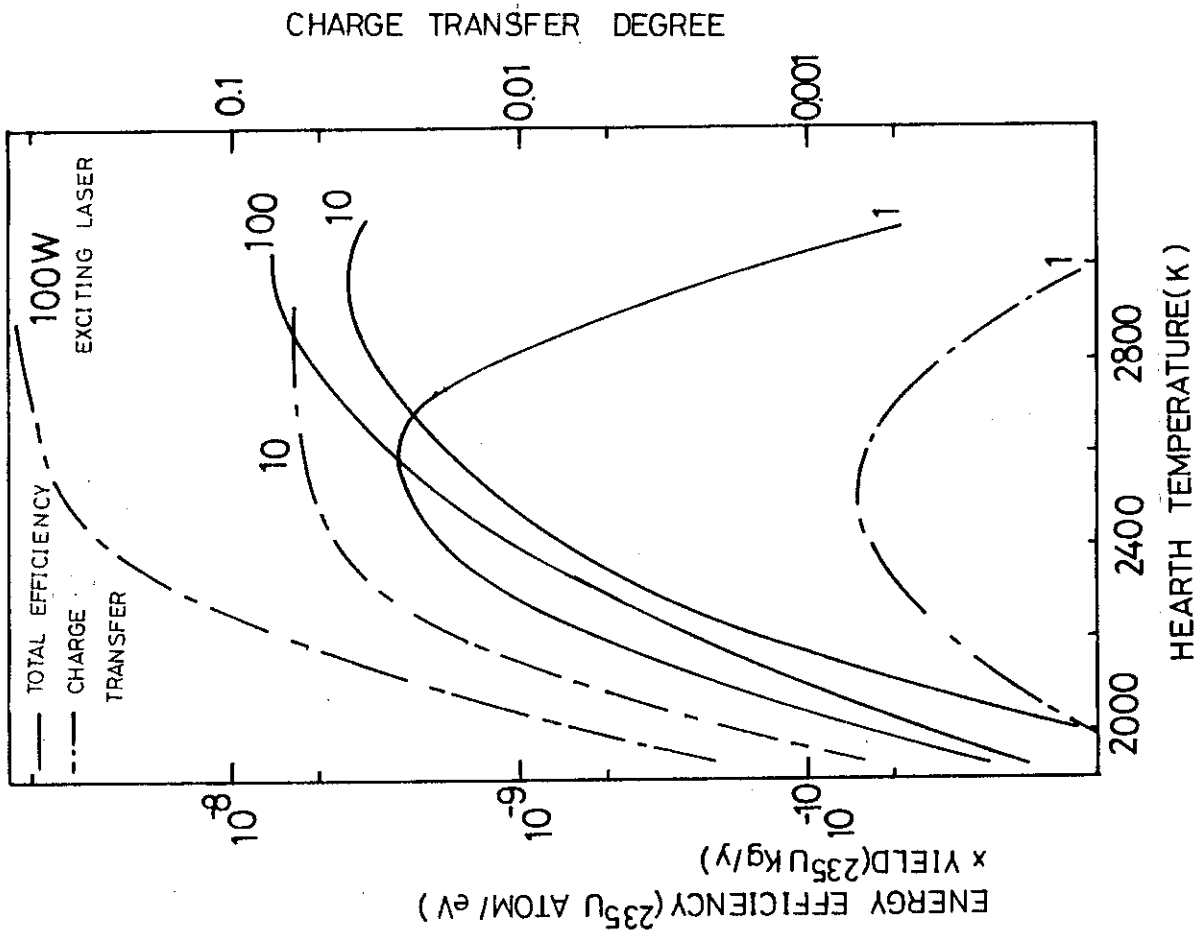


Fig. 20 Total efficiency dependence on hearth temperature

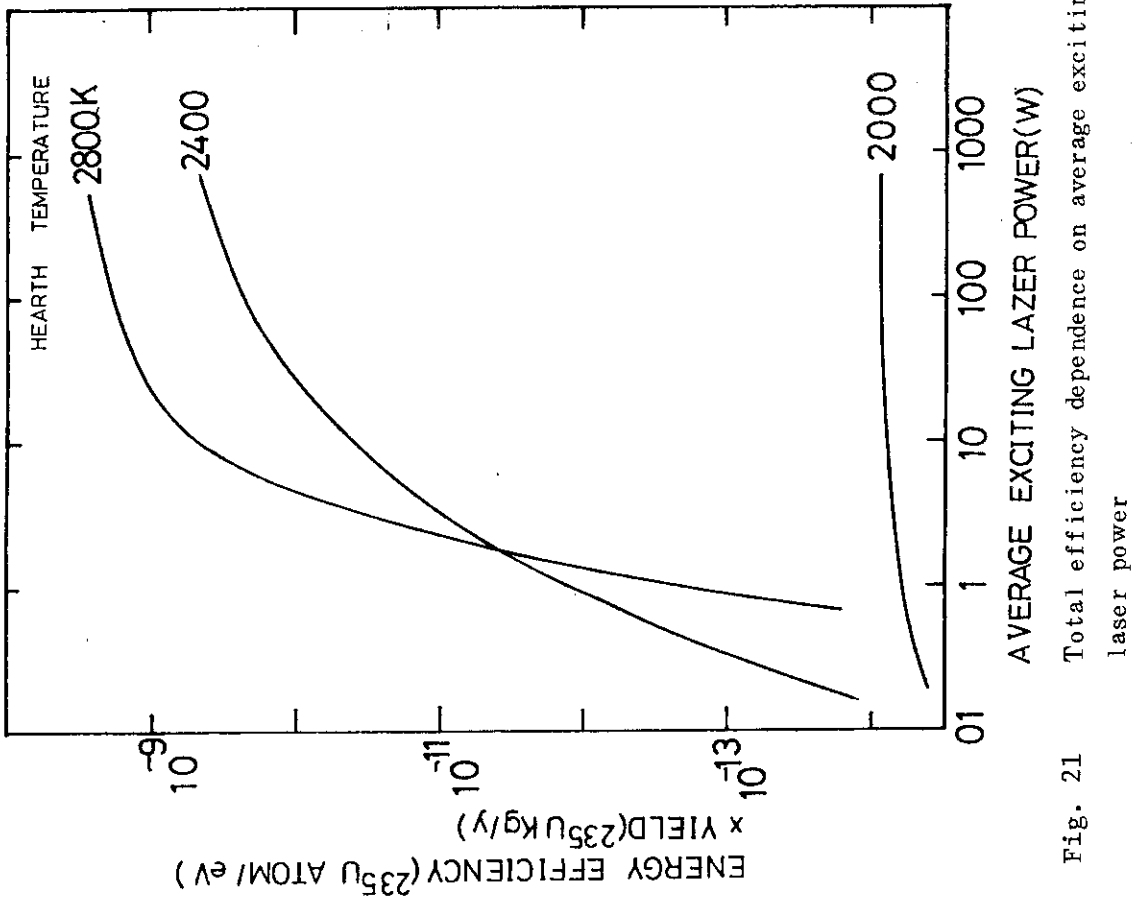


Fig. 21 Total efficiency dependence on average exciting laser power

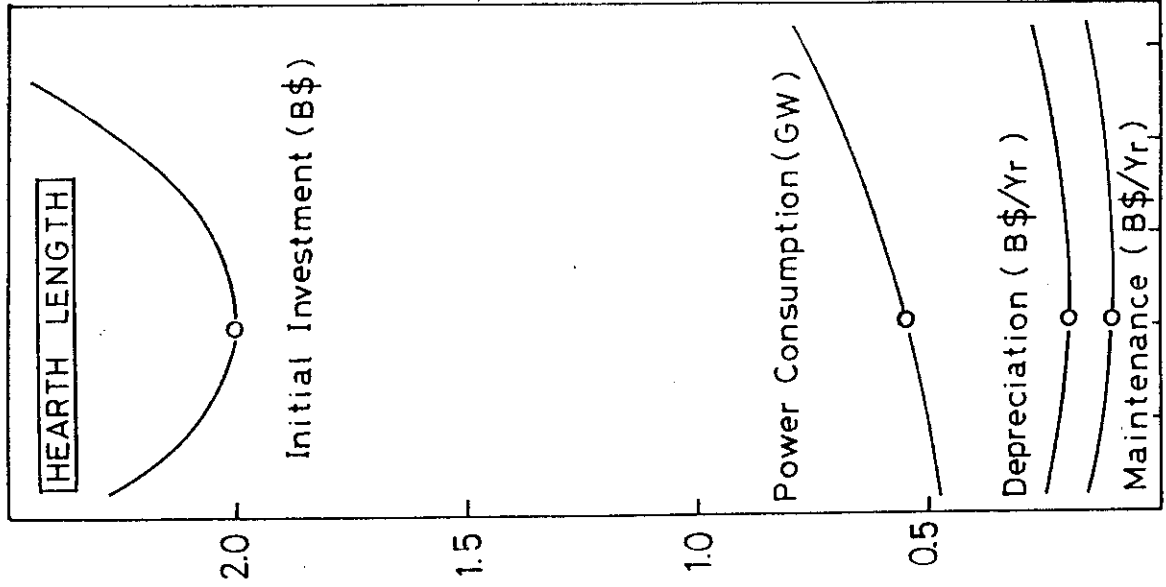


Fig. 23 Deviation from optimized hearth width

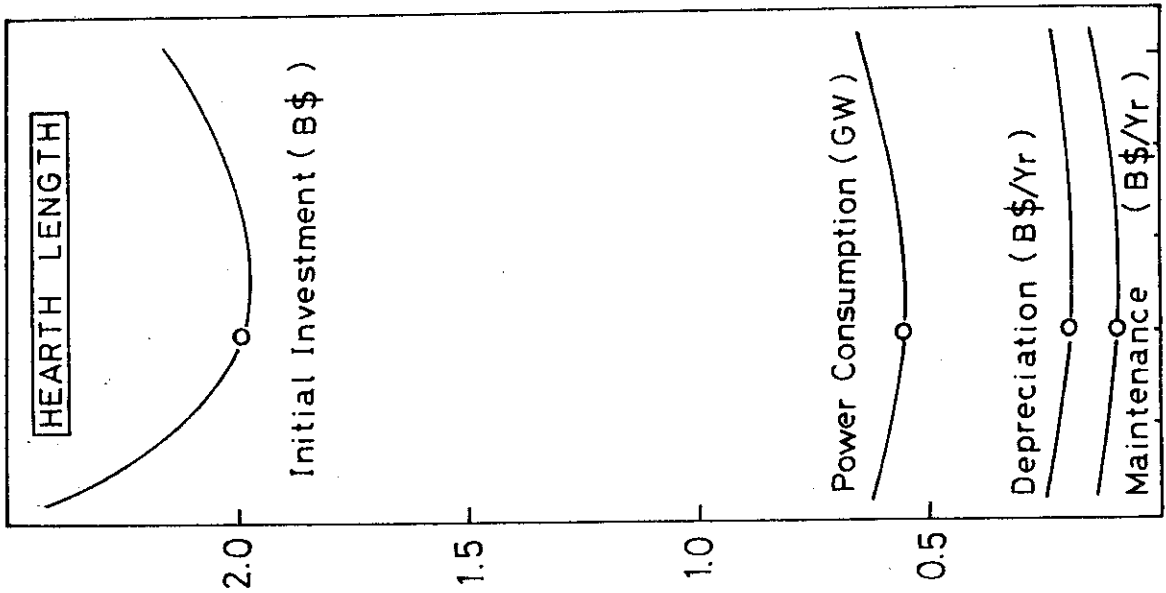


Fig. 22 Deviation from optimized hearth length

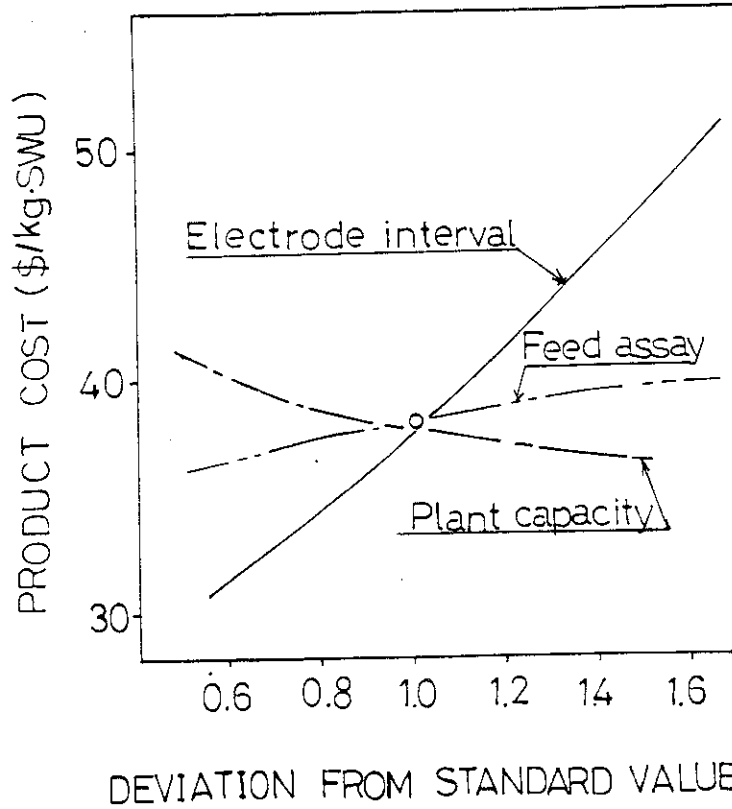


Fig. 24 Dependence of product cost on deviation from standard value

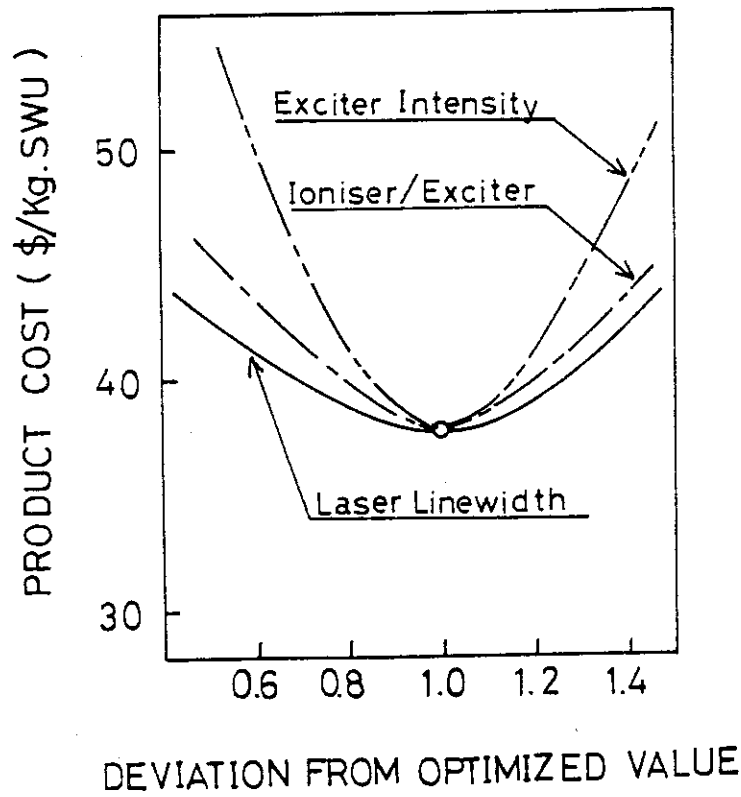


Fig. 25 Dependence of product cost on deviation from standard value

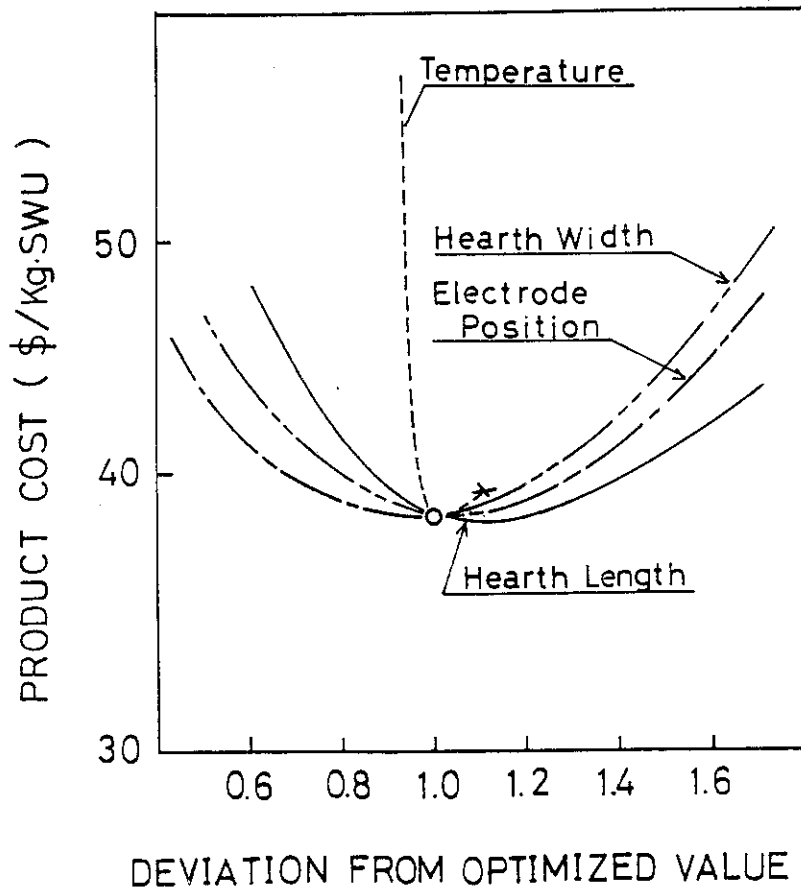


Fig. 26 Dependence of product cost on deviation from standard values

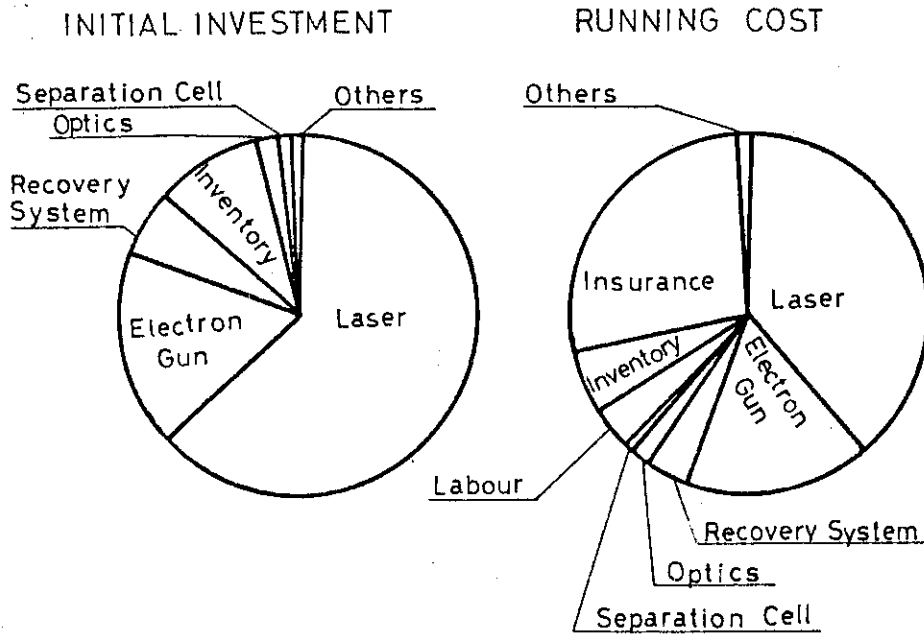


Fig. 27 Details of initial investment and running cost

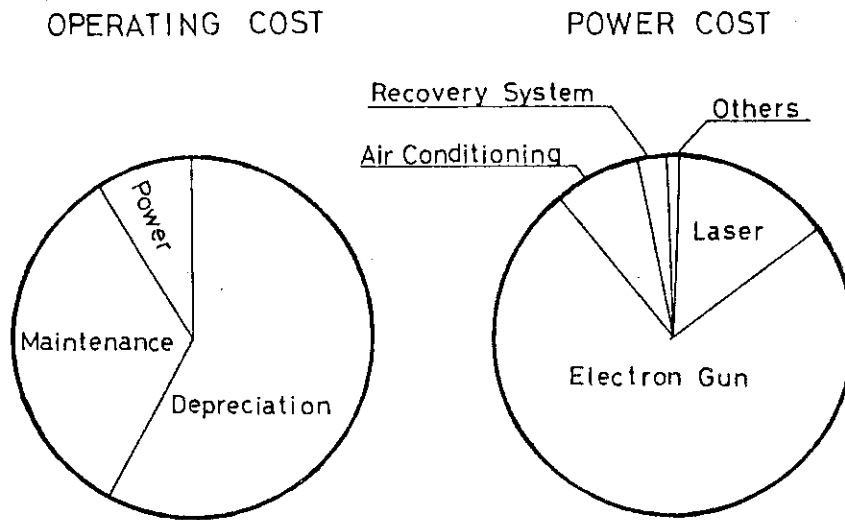


Fig. 28 Details of operating cost and power cost

LASER

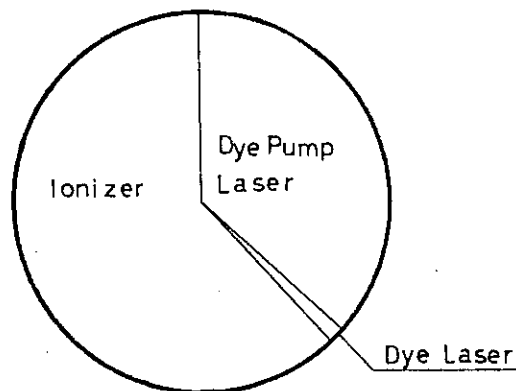


Fig. 29 Details of laser cost

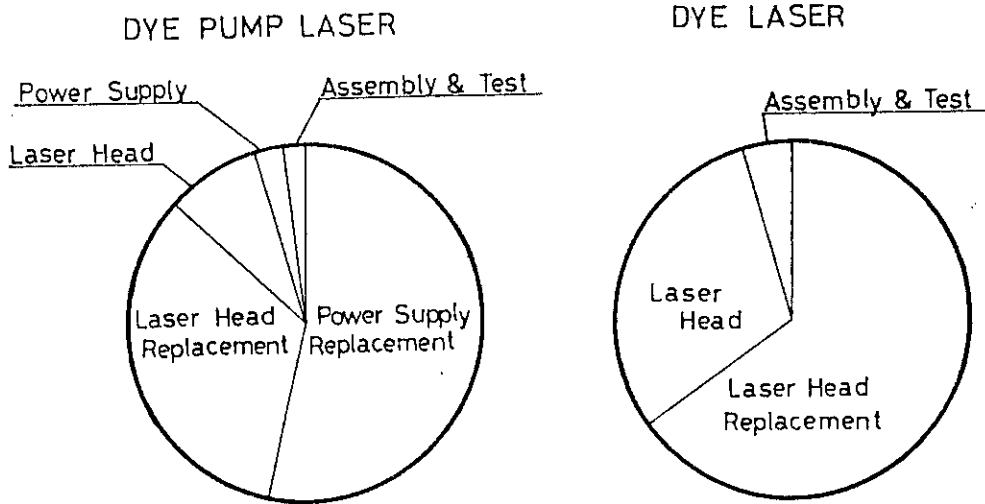


Fig. 30 Details of dye and dye pump laser cost

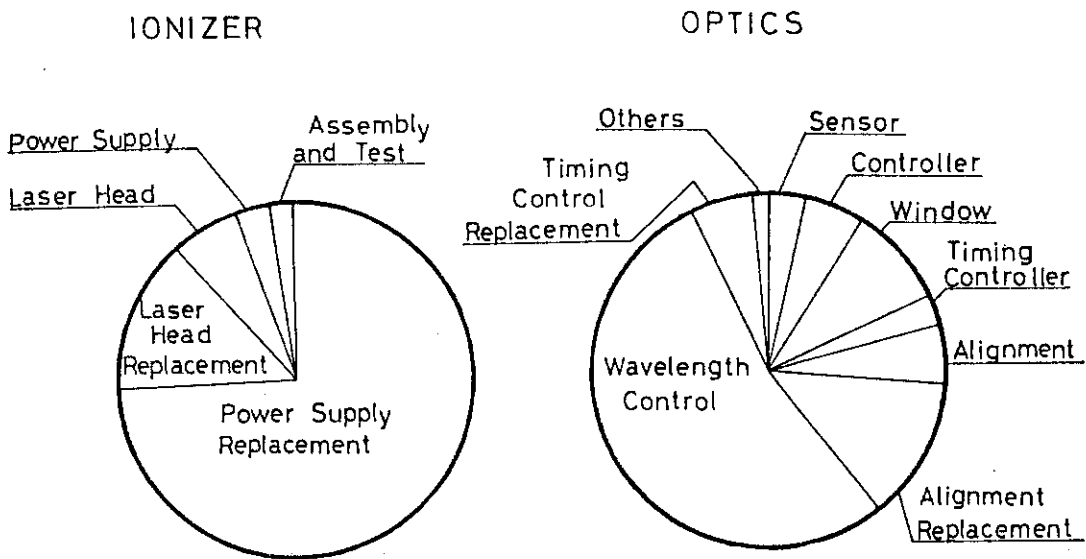


Fig. 31 Details of ionizer and optics cost

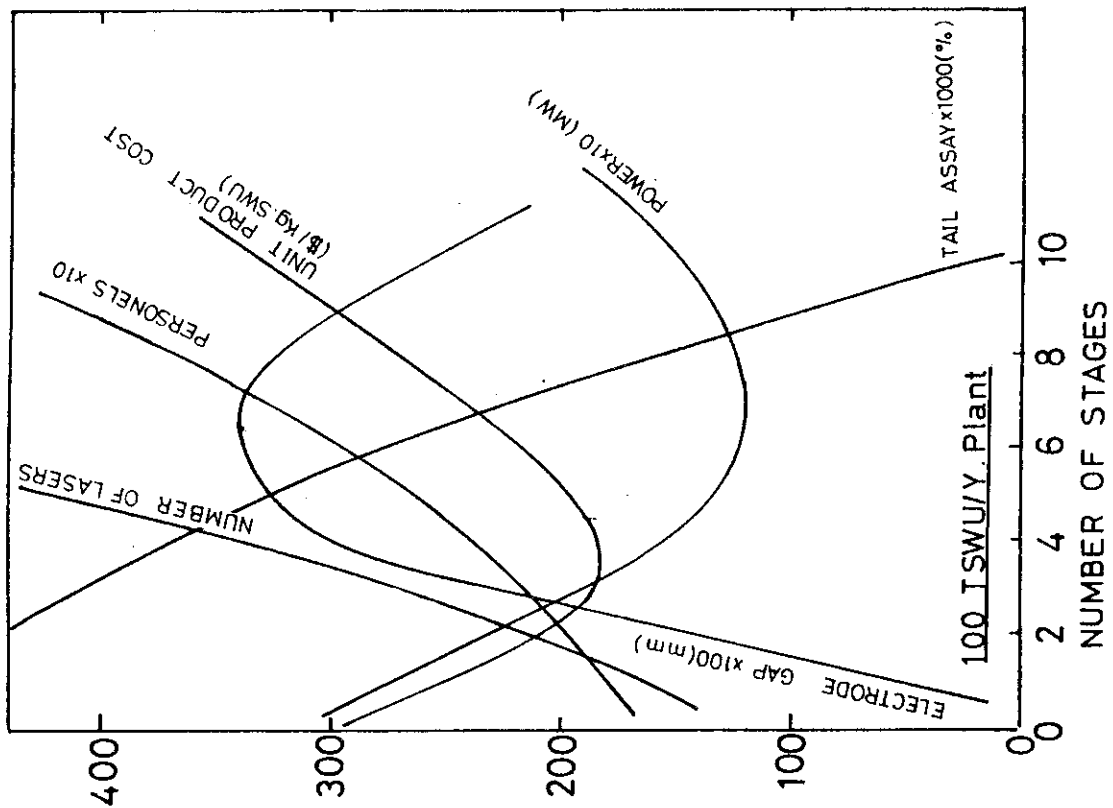


Fig. 33 Optimized values for 100 Ton SWU/y plant

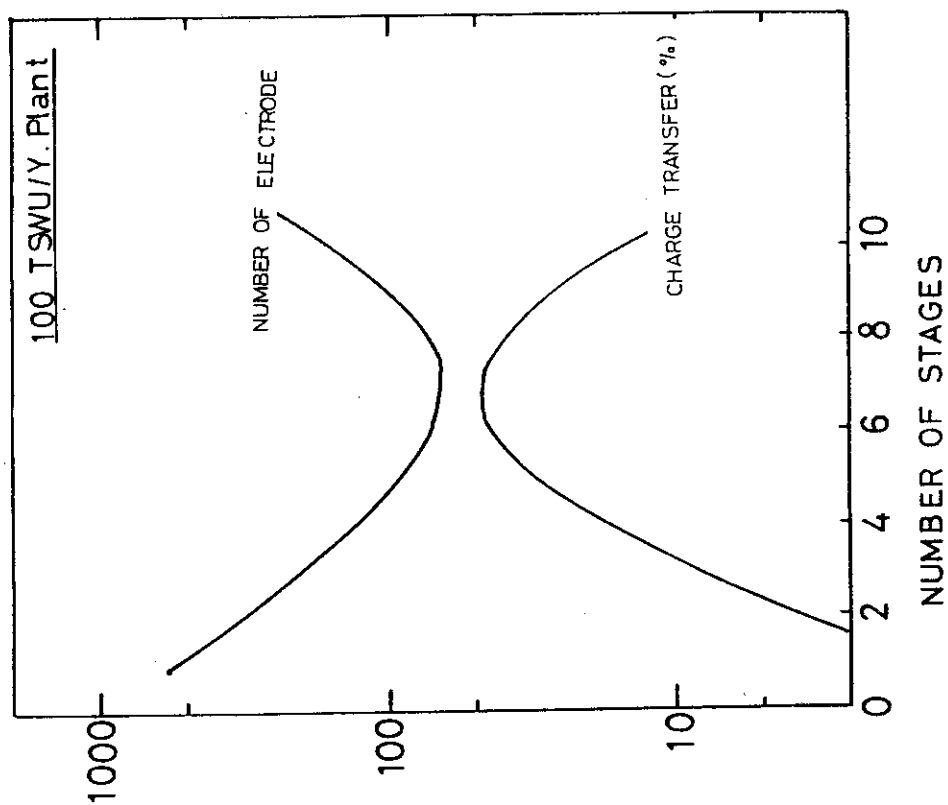


Fig. 32 Number of electrodes (100 Ton SWU/y plant)

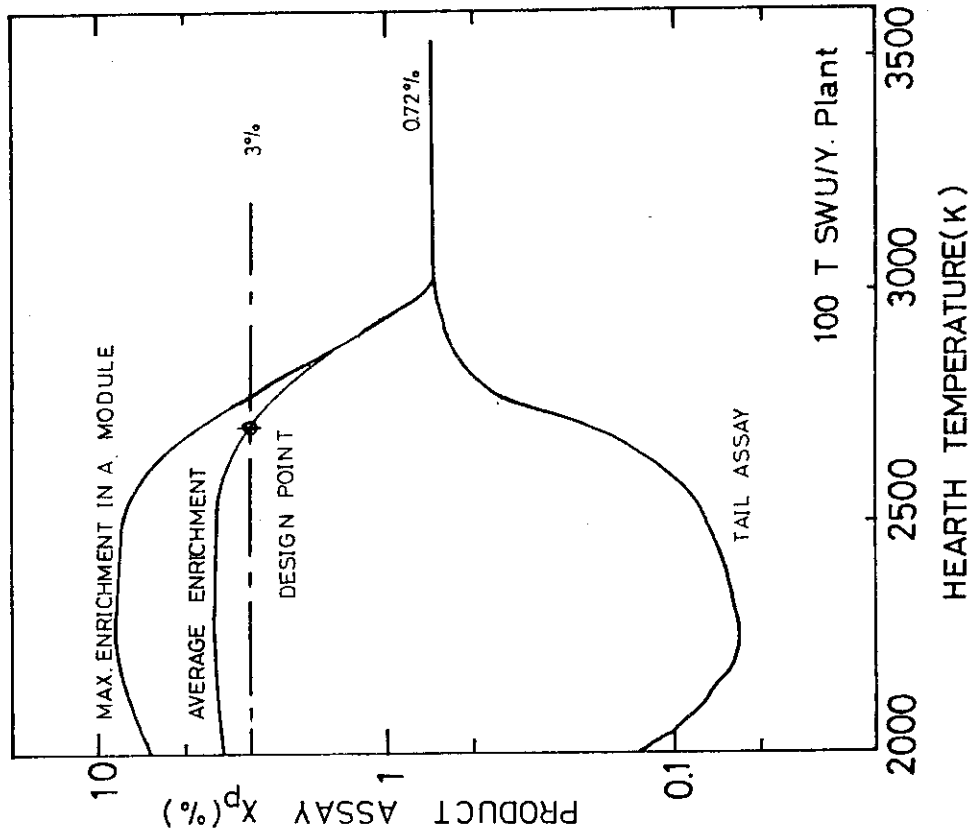


Fig. 35 Dependence of product assay in real plant on hearth temperature (100 Ton SWU/y plant)

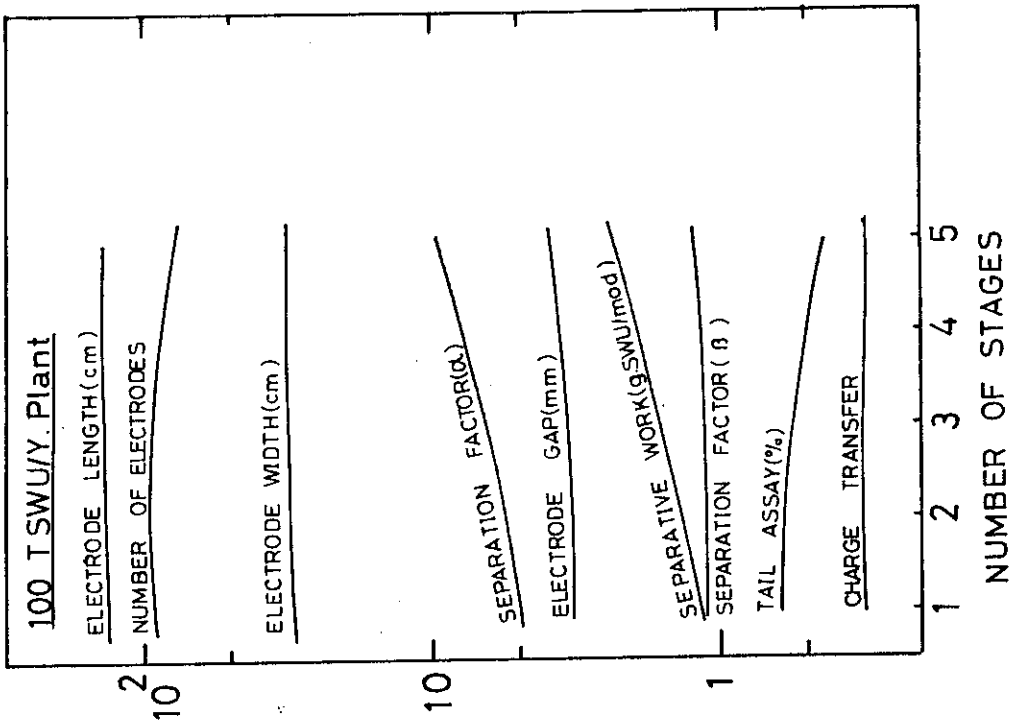


Fig. 34 Optimized values in each stage

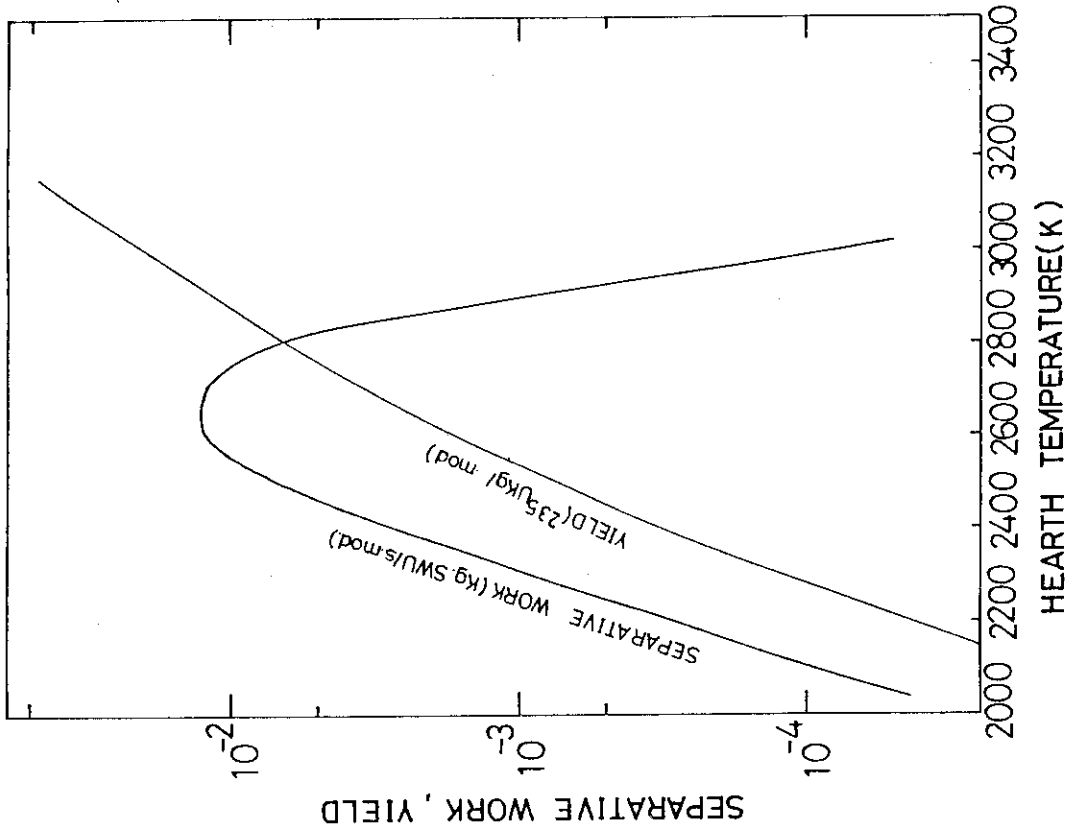


Fig. 37 Dependence of separative work and yield on hearth temperature (optimization)

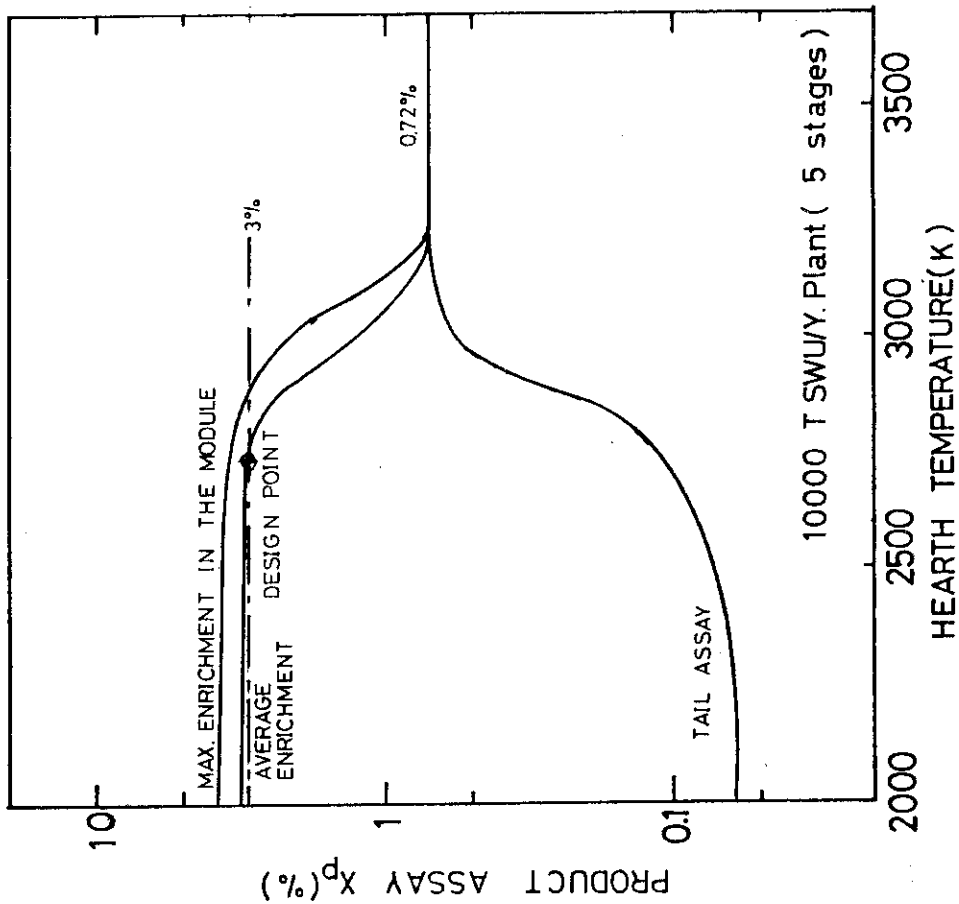


Fig. 36 Dependence of product assay in real plant on hearth temperature (10000 Ton SWU/y plant)

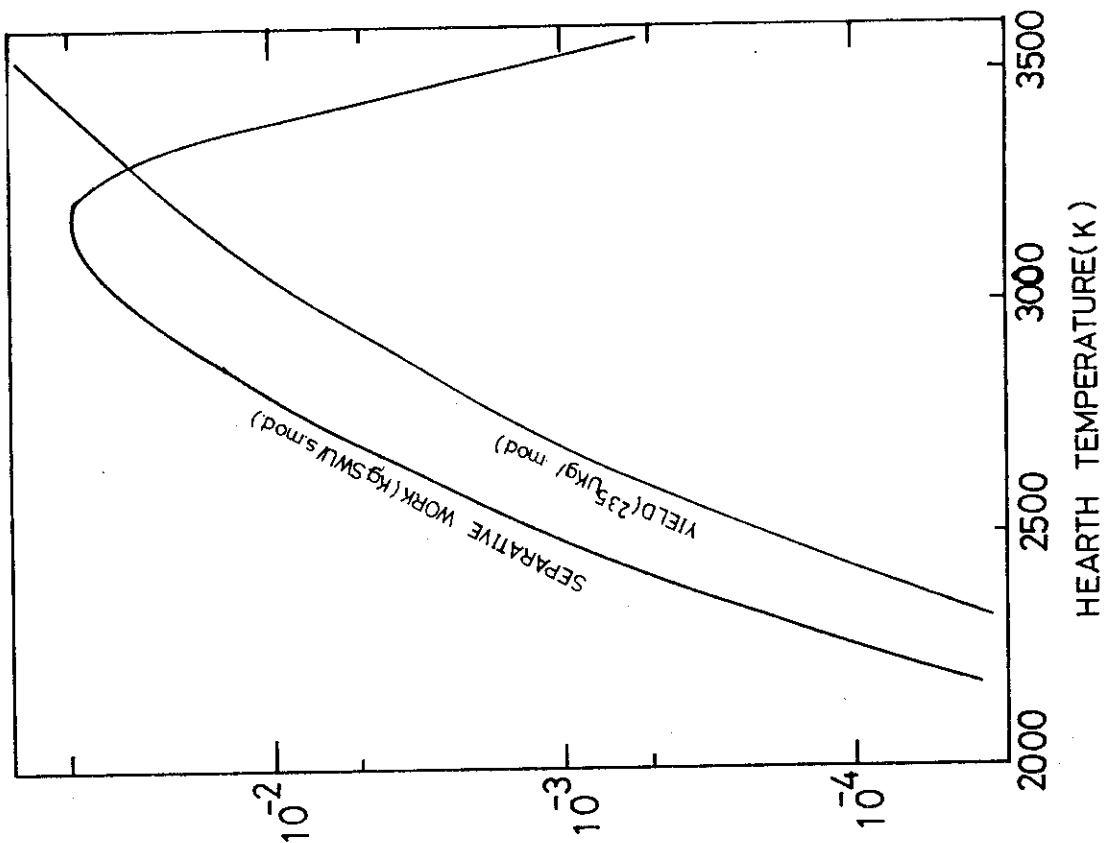


Fig. 38 Dependence of separative work and yield on hearth temperature (out of optimization)

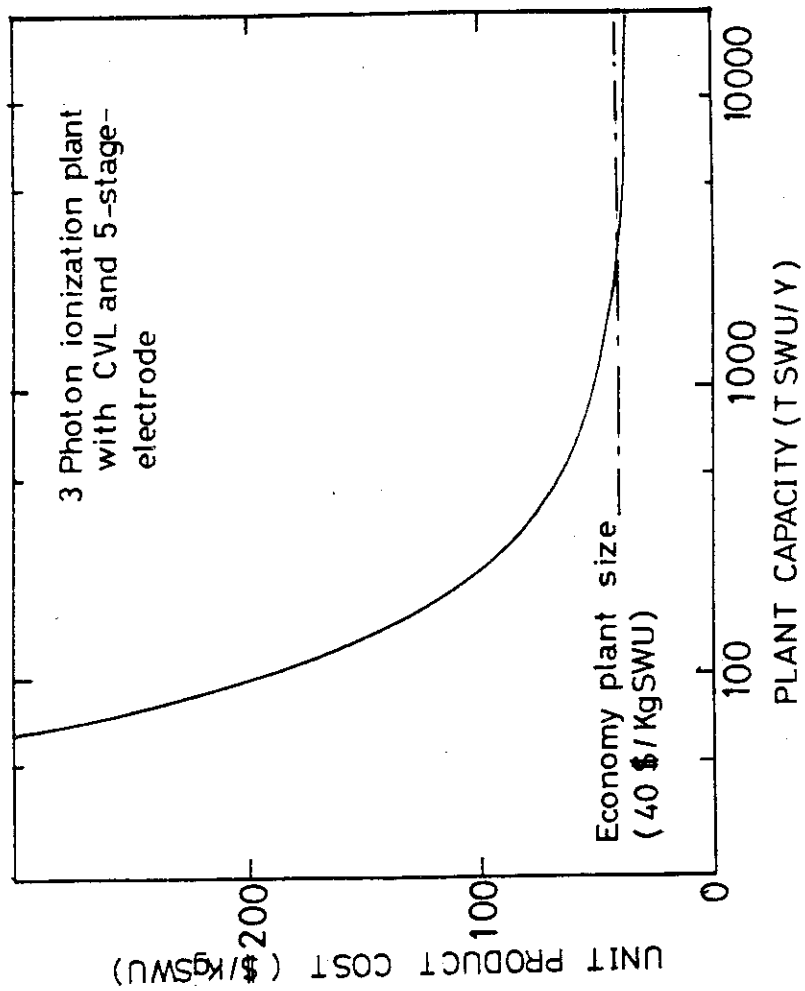


Fig. 39 Economy plant size

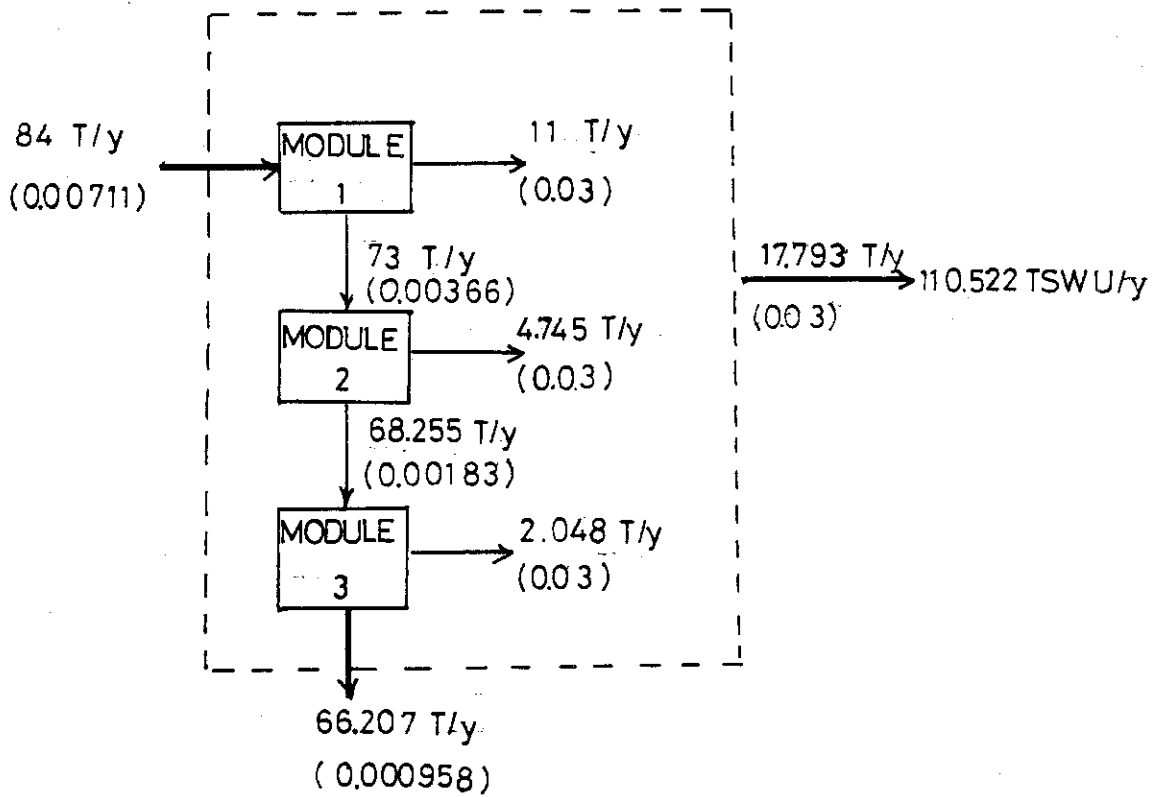


Fig. 40 Example of module cascading

7. お わ り に

現時点において得られるデータを基礎としてレーザーウラン濃縮プラントの経済性評価計算プログラム（ELUEP）を作成し、生産設備をも含めた経済的な側面よりプラント特性を記述した。本プラントの特性の考察においてはまずプラント構成を想定し、それらを構成する各コンポーネントについての設計、それにコンポーネントコストの算出を行った。このようにしてプロダクトコストを算出し、各基本パラメーターのコストに与える感度をチェックした。さらにプロダクトコストに対して最適化を行うことにより経済プラント規模などに関する知見を得た。

以上の中から特筆すべきものを列挙すると、

- ① コンポーネントコストの算出においては、レーザー装置、光学系、レーザー媒質、真空セル、真空排気系、電子銃、回収装置、プロセス建家、空調設備等に関し市販品を参考として見本価格の算出を行った。
- ② パラメーター感度チェックにおいては、ルツボ形状、ルツボ温度、回収電極形状・位置、レーザービーム特性、出力等のパラメーター、最適点からのそれらの変動が、濃縮ウランプロダクトコストに与える影響について議論を行った結果、特にルツボ温度の影響の大きいことが明らかとなった。
- ③ 最適点における生産コストの内訳を、初期投資費、運転費、操作費、消費電力等に区分し、さらにその各々を各コンポーネントに分類することによって示した。この結果、初期投資に占めるレーザー装置設備費、消費電力費に占める電子銃の割合の大きいことが判明した。

ここに述べたコードやそれに与えるインプットデータなどにはまだまだ考慮すべき点が残っているが、今後修正を加えつつ、幾つかの励起スキーム間の総合的な比較を行っていくことが必要である。

謝 辞

本報告書の作成にあたり御激励を賜った岩本多實燃料工学部長に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Mail, R. A. et al : Cost Analysis of Lasers for Laser Isotope Separation System" UCRL 13744-2 (1977)

7. お わ り に

現時点において得られるデータを基礎としてレーザーウラン濃縮プラントの経済性評価計算プログラム（ELUEP）を作成し、生産設備をも含めた経済的な側面よりプラント特性を記述した。本プラントの特性の考察においてはまずプラント構成を想定し、それらを構成する各コンポーネントについての設計、それにコンポーネントコストの算出を行った。このようにしてプロダクトコストを算出し、各基本パラメーターのコストに与える感度をチェックした。さらにプロダクトコストに対して最適化を行うことにより経済プラント規模などに関する知見を得た。

以上の中から特筆すべきものを列挙すると、

- ① コンポーネントコストの算出においては、レーザー装置、光学系、レーザー媒質、真空セル、真空排気系、電子銃、回収装置、プロセス建家、空調設備等に関し市販品を参考として見本価格の算出を行った。
- ② パラメーター感度チェックにおいては、ルツボ形状、ルツボ温度、回収電極形状・位置、レーザービーム特性、出力等のパラメーター、最適点からのそれらの変動が、濃縮ウランプロダクトコストに与える影響について議論を行った結果、特にルツボ温度の影響の大きいことが明らかとなった。
- ③ 最適点における生産コストの内訳を、初期投資費、運転費、操作費、消費電力等に区分し、さらにその各々を各コンポーネントに分類することによって示した。この結果、初期投資に占めるレーザー装置設備費、消費電力費に占める電子銃の割合の大きいことが判明した。

ここに述べたコードやそれに与えるインプットデータなどにはまだまだ考慮すべき点が残っているが、今後修正を加えつつ、幾つかの励起スキーム間の総合的な比較を行っていくことが必要である。

謝 辞

本報告書の作成にあたり御激励を賜った岩本多實燃料工学部長に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Mail, R. A. et al : Cost Analysis of Lasers for Laser Isotope Separation System" UCRL 13744-2 (1977)

7. お わ り に

現時点において得られるデータを基礎としてレーザーウラン濃縮プラントの経済性評価計算プログラム（ELUEP）を作成し、生産設備をも含めた経済的な側面よりプラント特性を記述した。本プラントの特性の考察においてはまずプラント構成を想定し、それらを構成する各コンポーネントについての設計、それにコンポーネントコストの算出を行った。このようにしてプロダクトコストを算出し、各基本パラメーターのコストに与える感度をチェックした。さらにプロダクトコストに対して最適化を行うことにより経済プラント規模などに関する知見を得た。

以上の中から特筆すべきものを列挙すると、

- ① コンポーネントコストの算出においては、レーザー装置、光学系、レーザー媒質、真空セル、真空排気系、電子銃、回収装置、プロセス建家、空調設備等に関し市販品を参考として見本価格の算出を行った。
- ② パラメーター感度チェックにおいては、ルツボ形状、ルツボ温度、回収電極形状・位置、レーザービーム特性、出力等のパラメーター、最適点からのそれらの変動が、濃縮ウランプロダクトコストに与える影響について議論を行った結果、特にルツボ温度の影響の大きいことが明らかとなった。
- ③ 最適点における生産コストの内訳を、初期投資費、運転費、操作費、消費電力等に区分し、さらにその各々を各コンポーネントに分類することによって示した。この結果、初期投資に占めるレーザー装置設備費、消費電力費に占める電子銃の割合の大きいことが判明した。

ここに述べたコードやそれに与えるインプットデータなどにはまだまだ考慮すべき点が残っているが、今後修正を加えつつ、幾つかの励起スキーム間の総合的な比較を行っていくことが必要である。

謝 辞

本報告書の作成にあたり御激励を賜った岩本多實燃料工学部長に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Mail, R. A. et al : Cost Analysis of Lasers for Laser Isotope Separation System" UCRL 13744-2 (1977)