

JAERI-Tech

96-043



核融合炉用トリチウムプラントにおける
深冷蒸留塔の塔構成と
インベントリーに関する考察

1996年11月

岩井保則・山西敏彦・奥野健二

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

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。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。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

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

核融合炉用トリチウムプラントにおける
深冷蒸留塔の塔構成とインベントリーに関する考察

那珂研究所核融合工学部
岩井 保則・山西 敏彦・奥野 健二

(1996年9月20日受理)

核融合炉の水素同位体分離プロセス (ISS : Isotope Separation System) には深冷液化蒸留システムが最有力視されている。しかし、この方法は水素を液体として扱うことからトリチウムインベントリーが大きくなることが問題であり核融合炉の安全上、インベントリーが最小限になるように深冷蒸留塔システムを設計する技術を確立することが非常に重要である。本報告では、ITER規模の核融合炉を想定し、予想されている各排ガスの流量と組成に基づき設計計算を実施し、インベントリーの最小化という観点から塔構成の検討、考察をおこなった。従来のITER用ISSの設計条件に基づき計算をおこなった結果、H濃縮塔とHT分離塔、D濃縮塔、T濃縮塔の3塔のループからなる4塔構成でシステム全体の総インベントリーは94gと設計目標の100g以下を満たすことができた。またこの手法は新たに提案されている条件にも対応させることができることがわかった。

Study of Column Construction and Tritium Inventory
of Cryogenic Distillation Columns
for Tritium Plant of a fusion reactor

Yasunori IWAI, Toshihiko YAMANISHI and Kenji OKUNO

Department of Fusion Engineering Research
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken
(Received September 20, 1996)

Cryogenic distillation column system is believed to be best for large throughput of hydrogen isotope separation. The major disadvantage of the system is a large tritium inventory in liquid phase. From a viewpoint of safety of a fusion reactor, it is important to establish the design method of minimized the tritium inventory. Anumerical study to investigate the possible design improvement to reduce inventory while maintaining separation performance was conducted. The design conditions are based on ITER DDD report, and details are as follows, 1)Exhaust stream with less than 50 Ci/y loss of tritium, 2)99.9% purity D2, and 3)90% purity T2. 4)total inventory with less than 100g. In the design of ITER to process 32 mol/hr, 4 columns(3 of 4 columns make closed loop)are best and total inventory is 94g. Particularly recent design of ITER to process 320 mol/hr requires additional efforts to minimize the inventory. The simulation also suggests it is effective to reduce inventory to draw two different purity product streams.

Keyword:Fusion Reactor, Tritium Inventory, Cryogenic Distillation,
Tritium, Isotope Separation, Stage Model, Newton Raphson

目 次

| | |
|----------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. シミュレーション手法 | 3 |
| 3. 塔構成の検討と計算結果 | 7 |
| 3.1 設計条件 | 7 |
| 3.2 塔構成の検討 | 7 |
| 3.3 同位体平衡器の利用 | 8 |
| 3.4 液ホールドアップの計算 | 8 |
| 3.5 トリチウムインベントリーの計算 | 9 |
| 3.6 インベントリを少なくする工夫 | 9 |
| 3.7 コンデンサー負荷の計算 | 10 |
| 3.8 環境に放出するトリチウム量の計算 | 10 |
| 3.9 設計結果 | 10 |
| 4. 最新の条件への対応 | 18 |
| 4.1 要求されるT純度とTインベントリーの関係 | 18 |
| 4.2 低純度での最適塔構成 | 18 |
| 4.3 低Tインベントリーと高T純度が両立する塔構成 | 19 |
| 5. 結論 | 29 |
| 参考文献 | 31 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Mathematical Simulation Procedure | 3 |
| 3. Investigation of Column Construction and Calculation Result | 7 |
| 3.1 Design Condition | 7 |
| 3.2 Investigation of Column Construction | 7 |
| 3.3 Equilibrium Reactor | 8 |
| 3.4 Liquid Holdup Calculation | 8 |
| 3.5 Tritium Inventory Calculation | 9 |
| 3.6 Invention of Column for Low Tritium Inventory | 9 |
| 3.7 Condenser Load Calculation | 10 |
| 3.8 Calculation of the Release Amount of Tritium | 10 |
| 3.9 Calculation Result | 10 |
| 4. Calculation for the Latest Condition | 18 |
| 4.1 Purity and Tritium Inventory | 18 |
| 4.2 Best Column Construction for Low Purity | 18 |
| 4.3 Column Construction with Low Tritium Inventory and High Purity | 19 |
| 5. Conclusion | 29 |
| References | 31 |

1.はじめに

現在、核融合炉の設計では燃料ガス中の重水素及びトリチウムの燃焼率は 1～10%であるとされており、燃焼後のガスをプラズマから取り出しトリチウムを回収再利用することが必要とされている。未燃焼ガスは、不純物(C、N、O)を除去した後、水素同位体分離プロセス(ISS: Isotope Separation System)に送られ処理される。ISS の役目は不純物としての H(主に H_2 、HD)を環境基準内まで十分に T 濃度(HT、DT、 T_2 の形で含まれている T の全体に対する原子分率)を下げた後環境に排出すること、中性粒子注入システム(NBI: Netral Beam Injector)の重水素源とし再利用するために D を濃縮すること、燃料注入システムのトリチウム源とし有効に再利用するため T を濃縮することにある。具体的には ITER の ISS 設計条件としては環境に放出する H ガスに含まれる T の量を環境基準を十分下回る年間 50 Ci 以下にすること、NBI の重水素源として利用するため D を 99.9 %以上に濃縮すること、燃料注入システムのトリチウム源として使用するため T を 90 %以上に濃縮することが ITER の設計においてそれぞれ求められている。また ISS では未燃焼のプラズマの排ガスの他に、NBI からでてくる排ガス、トリチウム施設等から排出されるトリチウム水を処理する水処理システムから排出される排ガス、ブランケットからでてくるガス等も同時に処理することが求められている。ガスの処理量は ITER 規模の炉で ~ 300 mol/h に達することが予想されており、大流量の水素同位体を連続処理することができる深冷液化蒸留システム(深冷蒸留塔の概略図を Fig. 1 に示す。)が最有力視されている。この水素同位体分離の方法は消費電力も小さく、液体として水素を処理するため塔がコンパクトになる利点を持つ。ところが水素を液体として取り扱うことは同時にトリチウムインベントリーが大きくなる欠点ともなる。核融合炉の安全評価の観点からは放射性物質であるトリチウムのインベントリーはできるだけ小さいことが望ましい。具体的に ITER での ISS 設計では目標値として ISS システム全体でインベントリーを 100 g 以下にすることが求められている。したがってインベントリーが最小限になるように設計条件を満たしながら深冷蒸留塔を設計する技術を確認することは非常に重要である。本報告は ITER 規模の核融合炉を想定し、ITER Design Description Document (DDD)¹⁾ に記載されている各排ガスの流量と組成に基づき設計計算を実行し、塔構成をインベントリーの最小化という観点から検討、考察をおこった結果をまとめたものである。

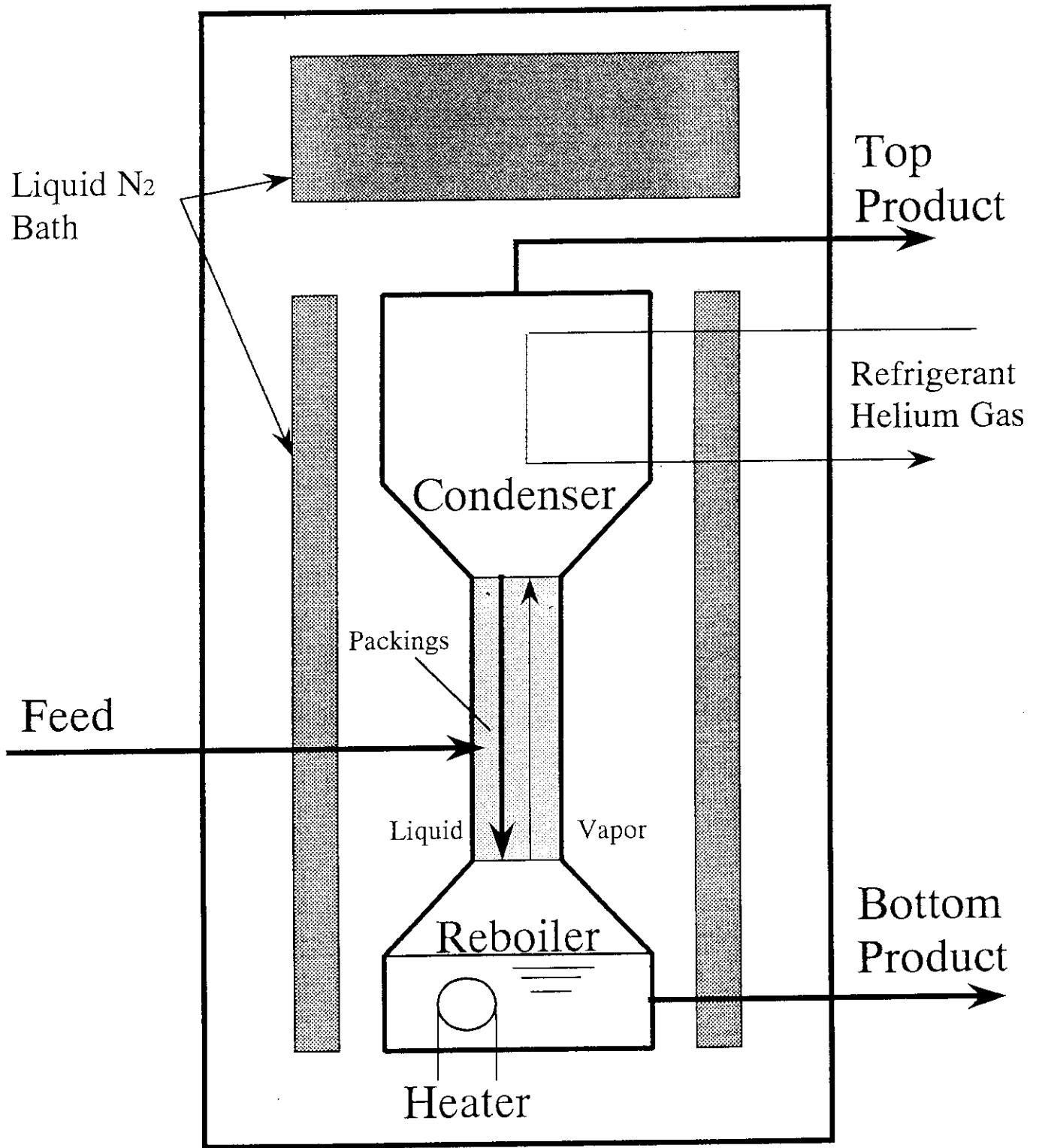


Fig. 1 深冷蒸馏塔概略图

2. シミュレーション手法^{2),3)}

核融合炉トリチウム燃料サイクルでは深冷蒸留塔の塔径は2~10 cm程度になることが予想されている。蒸留塔には通常棚段形式と充填塔形式が用いられるが、このような小径の塔には充填塔形式が適している。水素同位体分離システムでは微量成分の挙動を把握することが重要である。ステージモデルによるシミュレーションは、その微量成分の挙動を十分な精度で予測することが可能であり、動特性解析にも適していると報告されている²⁾。本報告の深冷蒸留塔の解析では、このステージモデルを用いたCRYDIS-Rを使用しておこなった。Fig.2に解析に用いたモデルカラムを示す。

定常状態では、各段の物質収支と熱収支により以下の基礎式を導くことができる。

$$\begin{pmatrix} B_{i,1} & C_{i,1} & 0 & \dots\dots \\ A_{i,2} & B_{i,2} & C_{i,2} & \dots \\ & \dots\dots & & \\ & & A_{i,j} & B_{i,j} & C_{i,j} \\ & & & & A_{i,N} & B_{i,N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{i,1} \\ X_{i,2} \\ \vdots \\ X_{i,j} \\ X_{i,N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{i,1} \\ D_{i,2} \\ \vdots \\ D_{i,j} \\ D_{i,N} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$A_{i,j} = L_{j-1}$$

$$B_{i,j} = -(V_j + W_j)K_{i,j} - (L_j + U_j)$$

$$C_{i,j} = V_{j+1}K_{i,j+1}$$

$$D_{i,j} = -F_j z_{i,j} \quad (2.2)$$

$$y_{i,j} = K_{i,j} x_{i,j} \quad (2.3)$$

$$E_{j,in} = L_{j-1}h_{j-1} + V_{j+1}H_{j+1} + F_j H_{Fj} + H_{Lj}(x_{3,j} + x_{5,j} + x_{6,j})\lambda + q_j$$

$$= E_{j,out} = (L_j + U_j)h_j + (V_j + W_j)H_j + Q_j \quad (2.4)$$

(2.1) から (2.3) 式は塔底液成分 $x_{i,N}$ あるいは塔頂蒸気成分 $y_{i,1}$ およびフィード成分と塔内の気液流量 ($z_j, L_j, U_j, V_j, W_j, j=1\dots N$) が与えられれば、逐次塔頂あるいは塔底に向かって解き進めることができる。得られた塔内組成分布に関して

(2.4) 式により気液流量を修正して再び組成分布を再計算する。これを繰り返して、設定した収束条件以下になれば計算結果として得ることができる。しかしこの方法は塔頂、塔底流、フィード流中の組成、気液流量が与えられるときは計算手順が簡便なこともあり有用であるが本設計のようにフィードの組成、流量に対して、蒸留塔の適切な理論段数、還流比、塔頂及び塔底流量を求める設

計問題には適していない。

しかし (2.1) (2.2) 式は各段の温度 T_j ($j=1\dots N$) フィードの組成、塔内の気液流量を与えれば、理想系として $x_{i,j}$ の初期値を与えることにより、行列のすべての係数が決まることから、三項方程式として解くことができる。計算で求めた塔内組成分布に対し各段の温度を再計算、(2.4) 式で塔内気液流量を求め直し、行列式の全係数を再び求め三項方程式を解く。以上の計算を物質収支がある誤差内に収まる判定条件まで続け、温度分布、塔内組成分布、流量分布を得ることができる。この方法は蒸留塔の設計問題にも適応している。この方法で理論段数、還流比が高い場合極めて収束が遅くなる欠点は次の関数を導入した Newton-Raphson 法を利用することで克服できる。

$$S_j = \sum_{i=1}^m K_{i,j} x_{i,j} - 1, \quad (j = 1, \dots, N) \quad (2.5)$$

$$E_j = 1 - \frac{E_{j,\text{out}}}{E_{j,\text{in}}}, \quad (j = 1, \dots, N) \quad (2.6)$$

この関数を導入することで、(2.1) から (2.4) 式を解くことは、以下の非線形連立方程式を解くことに帰着する。

$$\begin{aligned} S_1(T_1, \dots, T_N, L_1, \dots, L_N) &= 0 \\ S_N(T_1, \dots, T_N, L_1, \dots, L_N) &= 0 \\ E_1(T_1, \dots, T_N, L_1, \dots, L_N) &= 0 \\ E_N(T_1, \dots, T_N, L_1, \dots, L_N) &= 0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

(2.7) 式における物質収支、熱収支の $2N$ 個の式は、各段の温度及び流量 $2N$ 個の変数の関数である。厳密には気液平衡比は液組成の関数となるが、理想系を仮定して温度のみの関数として解を求め、得られた解に対して気液平衡比を求め直し、(2.7) 式を解く繰り返し計算をすればよい。温度分布、流量分布の値を (2.1) (2.2) 式を単純に解くことで修正していく代わりに Newton-Raphson 法で温度及び流量の値を修正し、迅速に収束解を得ることができる。また (2.7) 式は $2N$ 個の変数の関数であり、その Jacobian 行列を解くことはかなりの計算時間を要するが、水素同位体系に対して導かれる (2.7) 式が液流量に対して敏感ではない特徴を生かし、水素同位体の非理想性の修正と同様に、液流量の修正を繰り返し計算でおこない、(2.5) 式を温度の変数として Newton-Raphson 法を解くことで Jacobian 行列の次数を半分に減らし時間を短縮することができる。

本報告では、温度を変数とする Newton-Raphson 法を用いて設計計算をおこ

なった。各段の温度 T_j 、 $j=1\dots N$ を与え、各フィードの組成と流量、全段数、還流比、塔長抜きだし流量、塔底抜き出し流量を初期値として与えた。この初期条件から塔内の気液流量は計算で与えられ、理想系として x_{ij} の初期値を与えることにより、行列のすべての係数が決まり、三項方程式を収束条件を満たすまで繰り返し解くことで Newton - Raphson 法で変数を修正しながら、温度分布、塔内組成分布、流量分布を得た。このデータを基に三章に述べる方法でインベントリーを決定した。なお今回の計算では非理想性やトリチウム崩壊熱の影響は考慮していない。Newton - Raphson 法で収束解を得るためには、変数の初期値の与え方が重要となる。今回は塔底、塔頂の温度を仮定し、蒸留塔内のある段における温度を仮定した一点折れ線関数を用いることで各段の温度 T_j 、 $j=1\dots$ 与え、収束解を得ることができた。

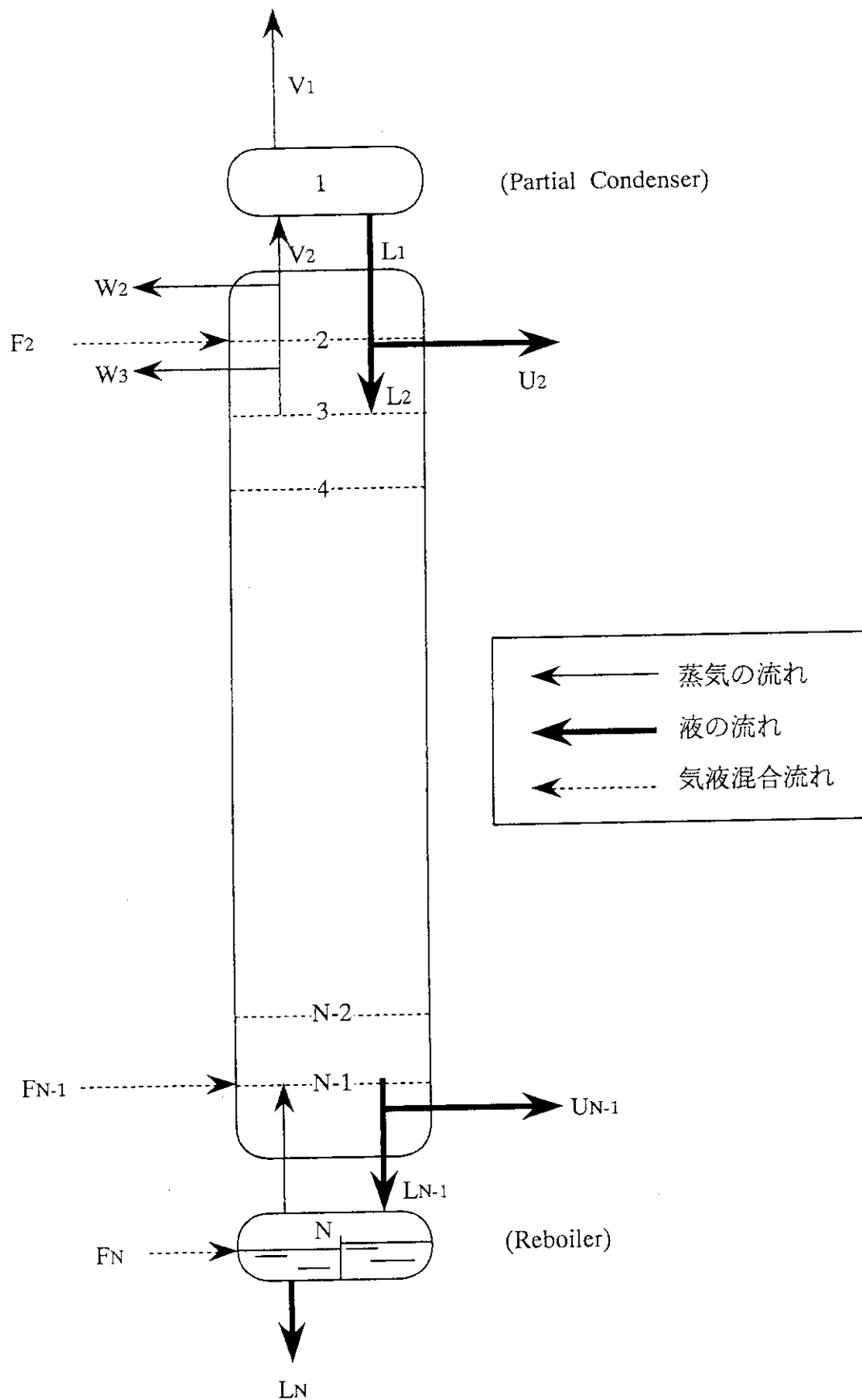


Fig.2 計算に用いたモデルカラム

3.塔構成の検討と計算結果

3.1 設計条件

核融合炉では化学交換塔、ブランケット、プラズマ、NBI から水素同位体が放出される。この水素同位体ガスから H 成分は不純物として環境基準に十分適する量まで T 成分を減らした後環境に放出し、D 成分、T 成分は燃料成分であるため目的の濃度に濃縮、再利用することとなっている。そのため核融合炉の燃料系の設計ではこれら 4 種類のガスを ISS の深冷蒸留塔で目的の濃度になるように蒸留精製することとなっている。深冷蒸留法は水素を液体として取り扱うことから高い分離係数を持つことに加えて、大流量の連続処理が可能である長所を持っている。しかし液体として水素を取り扱うことからトリチウムインベントリーが大きくなるのが安全性の観点から欠点となっている。よって設計の際には最小限のトリチウムインベントリーで目的の濃度を達成できる深冷蒸留塔の設計をする必要がある。よって今回 ITER 規模の核融合炉を想定し、ITER Design Description Document (DDD) Tritium Plant (WBS 3.2)¹⁾に記載されている各排ガスの流量と組成に基づき (Table 1 参照)、以下の (1) ~ (4) に示す条件を満たすよう設計計算をおこなった。

- (1) 環境に放出されるガス中の T 濃度を 50 Ci/y 以下に抑える。
- (2) D を 99.9% 以上に濃縮する。
- (3) T を 90% 以上に濃縮する。
- (4) 深冷蒸留塔全体の T インベントリーを 100 g 以下に抑える。

3.2 塔構成の検討

深冷蒸留塔では水素同位体 6 成分を含むガスを処理し、H rich、D rich、T rich の 3 つの流れとして取り出す必要がある。よって設計条件を満たすためには複数本の深冷蒸留塔を組み合わせる必要がある。H-D-T ガス 6 種類は沸点の低い順に H₂、HD、HT、D₂、DT、T₂ となっており、HT を一定量以上環境に放出できず、D の濃縮要求率が 99.9% と高いため HT 処理塔が必要となり、H 濃縮塔、HT 処理塔、D 濃縮塔、T 濃縮塔の 4 本が基本構成であると考えられる。またこの 4 本の配置には Fig.3 のように流れを循環させる循環形式 (必要に応じ 5 本目の T 濃縮塔 (2) が加わる。) と、ワンスルーで処理する非循環形式の 2 種類が考えられる。循環形式は循環させる分だけ循環を形成している各塔の供給流量が増える分不利である。しかし、循環させる分各塔に不純成分が混じりにくく

効率のよい蒸留がおこなえと考えられる。しかしT濃縮塔にはTが高濃度に存在することとなるため、この方式では高いT純度要求に対応できる反面、インベントリーは大きくなると考えられる。非循環形式は各塔に多くの成分が混在し高い純度要求には不利であると考えられる。しかし低いT純度の要求では非循環形式の方がインベントリーは低いと予想される。よって、この形式は低いT純度の要求時に有効な方式であると考えられる。本条件のように90%以上という高いT純度の要求時は循環形式がよく、本設計ではこの方式を取り入れる。

3.3 同位体平衡器の利用

効率よく深冷蒸留塔内で分離がおこなわれるため、CRYDIS-Rでは深冷蒸留塔の途中段から蒸気を抜き出して同位体交換反応器を通すことができるようになっている。

同位体交換反応の目的は特に次の交換反応を促進させることにある。



同位体平衡器の操作温度は25°Cであるとした。

3.4 液ホールドアップの計算

定常状態において、深冷蒸留塔内に存在する液体水素の量である液ホールドアップはトリチウムインベントリーに密接な影響を与える。Dexon Ringを充填した深冷蒸留塔を仮定した場合、過去の実験データ等を参考にすると0.25 m/sまでフラッディング現象が認められなかったことが報告されている¹⁾。このデータから塔内の蒸気速度を0.15 m/sとすることが妥当であると考えられこの値を採用した。シミュレーションで得られた塔内蒸気流量分布から、最大蒸気量をQ mol/hとし、塔温度を塔頂と塔底の温度の算術平均TKで代表させると塔径L mは次式で算出することができる。

$$L = 2 \times \sqrt{\frac{0.082 \times T \times Q}{3600 \times 1000 \times 0.15 \times \pi}} \quad (3.2)$$

また充填塔の理論段の一段あたりの相当高さであるH.E.T.P (Height Equivalent to a Theoretical Plate)は実験から²⁾0.05 mと推算されるので、液ホールドアップを空

塔体積の10%と仮定し²⁾、Table 2に示す水素同位体のモル容積⁴⁾を塔頂、塔底で計算しその算術平均 V_H で代表させると液ホールドアップ Liq は次式で計算できる。

$$Liq = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2 \times \pi \times 0.05 \times 0.1}{V_H} \quad (3.3)$$

なお今回の計算ではリボイラー、コンデンサーの液ホールドアップをトリチウム濃度が高い深冷蒸留塔は充填部1段あたりの液ホールドアップ量、低い条件では充填部1段あたりの液ホールドアップ量の2倍として計算をおこなった。

3.5 トリチウムインベントリーの計算

トリチウムインベントリーの計算は下の式(3.4)を用いておこなった。式(3.4)はインベントリーを上からコンデンサー部(第一段)、塔本体部(第2段~第n-1段)、リボイラー部(第n段)の和として表示した。前節の通り、トリチウム濃度が高い場合、コンデンサー部、リボイラー部の液ホールドアップは塔本体部と同じとするので $p=1$ とし、低い場合は2倍とすることから $p=2$ として計算した。

$$\begin{aligned} \text{Inventory} = & Liq \times p \times 6 \times \left(\frac{[HT]_1 + [DT]_1}{2} + [T_2]_1 \right) \\ & + Liq \times 6 \times \sum_{i=2}^{n-1} \left(\frac{[HT]_i + [DT]_i}{2} + [T_2]_i \right) \\ & + Liq \times p \times 6 \times \left(\frac{[HT]_n + [DT]_n}{2} + [T_2]_n \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

また平衡器に関しても若干のインベントリーが存在するが、データがなく見積もることができないので今回は平衡器のインベントリーは考慮していない。

3.6 インベントリを少なくする工夫

前節までの通り、インベントリーは塔内最大蒸気量から塔径を決め、液ホールドアップ、インベントリーの順に決定する。しかし塔内の蒸気量は原料供給段の前後で違いが生じ、原料供給段以下では減少する。よって供給段前後で塔

を二分しそれぞれの最大流量で別途、塔径をきめ逆凸型の深冷蒸留塔にすればインベントリーを減少させることが可能である。よって濃度の高いトリチウムを扱う蒸留塔ではこの方法により蒸留塔を設計した。

3.7 コンデンサー負荷の計算

深冷蒸留においては、どの程度の性能を持つヘリウム液化冷凍機が必要になるかについての知見を得るため、コンデンサー負荷の値が重要になってくる。コンデンサー負荷 Q_c は以下の式から算出した。

$$Q_c = V_2 h_2 - V_1 h_1 - (L_1 + U_1) H_1 \quad (3.5)$$

ここで h_1 、 h_2 は Table 3 から算出した一段目、二段目の飽和蒸気のエンタルピー⁵⁾、 H_1 は Table 4 から算出した液のエンタルピー⁵⁾ を示す。なおエンタルピーの計算では厳密には混合エンタルピーを考慮に入れなければならないが、概略値を求めることが目的であったため混合エンタルピーは考慮には入れていない。

3.8 環境に放出するトリチウム量の計算

ISS で分離される H、D、T のうち、H は環境中に放出されることとなっている。しかし H 濃縮塔塔頂から排出されるガスにはトリチウムが HT の形で若干含まれている。よって、環境に放出する際に環境基準を十分満たすため、50 Ci/y 以下というトリチウム放出限界がもうけられている。環境に放出されるトリチウム量 W Ci/y はトリチウムを 9600 Ci/g とし、排出ガス流量を V_1 mol/h、その中に含まれるトリチウム分率 α とすると以下の式で計算できる。

$$W = V_1 \times \alpha \times 9600 \times 365 \times 24 \quad (3.6)$$

3.9 設計結果

以上の考察から 4 本構成、循環型の深冷蒸留塔を設計した結果を Fig.4 に示す。計算は以下のような手順でおこなった。深冷蒸留塔 1 の計算の後、深冷蒸留塔 2 上部から排出される組成を仮定した。そして、物質収支の連立方程式から塔 2、3、4 から排出される流量を計算した。深冷蒸留塔 2、3、4 の順に計算し、得られた塔 2 の上部組成を基に流量の再計算をおこなう。これを一定条件に収束するまで繰り返し確定した後、塔径、液ホールドアップ、インベントリー、コン

デンスー負荷を最終的に計算した。インベントリーを最小にするためには各塔に関し、全段数、還流比、原料供給段、平衡器の抜き出し段、戻し段、塔頂流量、塔底流量をパラメーターとし、全体として各抜き出し流量（原則として物質収支から決定する。）、循環流量をパラメーターとして動かしトータルでのインベントリー最小化する作業を行わなければならない。各塔の全段数は H.E.T.P が 0.05 m であることから施設の高さの限界を考慮し最大 120 段（そのときの塔長は整流器などを考慮せず全体で $0.05 \times 120 = 6 \text{ m}$ となる。）までとした。十分な蒸留をおこなうためには全段数を増やす方法と還流比を上げる方法がある。しかし還流をあげると塔内蒸気流量の上昇から全体の液ホールドアップが増えるため、インベントリー低減のためには原則としてインベントリーへの影響の少ない全段数の増加を優先し設計をおこなった。原料供給段は原則中央とし、原料の組成、流量、目的の濃縮組成を考慮し適正と思われるところに配置した。平衡器に関しては (3.1) 式に示される平衡関係が最大限生かされるポイントを探し配置した。抜き出し段、戻し段は違う段にするのが実際的であるが、その場合塔内蒸気量が上昇しインベントリーが増える要因となる。今回はインベントリーの大きな深冷塔 2、深冷塔 4 に関しては同一段で抜き出しと戻しをおこなった。平衡器の流量は大きいほど効果はあるが実際の塔運転で抜き出しが可能な流量に関するデータは不足している。今回は、塔内液流量の半分程度を抜き出し量の最大量と仮定した。実際の塔運転では、このような同一段での大流量の抜き出しが可能であるかどうかは今後の課題である。但し少なくとも実際の運転において平衡器の数を増やし、一基あたりの流量を少なくして抜き出しをおこなうことは可能であると考えられ、この手法をとり入れることで、本結果とおなじインベントリーにすることは可能であると考えられる。H 濃縮塔上部流量 (29.7 mol/h)、D 濃縮塔上部流量 (75.2 mol/h)、T 濃縮塔上部流量 (17.1 mol/h) は物質収支から導き出される。塔間を循環する流量が少ないと効率の良い分離ができず、多くすると各塔内の蒸気量を増やすこととなりインベントリーの増大を招く。よって、この流量は今回は数パターン試し計算をおこなった後、経験から決定した。このようにインベントリーを最小にするために考慮すべきパラメーターは多岐にわたり今後も検討が必要である。今回この塔構成で計算をおこなった結果、インベントリーは一番多い T 濃縮塔（深冷塔 4）で 65.52 g となり D 濃縮塔（深冷塔 3）で 18.83 g、H-D、T 濃縮塔（深冷塔 2）で 8.73 g、H 濃縮塔（深冷塔 1）で 1.14 g となった。総インベントリーは約 94 g となり本方法で 100 g 以下という条件を満たすことが十分に可能であることが判明した。

Table 1 ISSで処理する各ガスの流量と組成

| | Flow Rate [mol / h] | H ₂ | HD | HT | D ₂ | DT | T ₂ |
|--------|------------------------|----------------|-------------|-----------|----------------|-----------|----------------|
| 水処理系 | 785 | 9.5877E-1 | 4.0691E-2 | 4.9689E-5 | 4.8930E-4 | 1.2616E-6 | 8.3434E-10 |
| ブランケット | 100 | 9.8840E-1 | 2.1780E-4 | 2.6749E-3 | 5.03527E-7 | 8.1194E-5 | 8.6219E-3 |
| NBI | 60 | 4.9070E-1 | 103.9991E-5 | 3.6406E-9 | 9.9976E-1 | 1.9996E-4 | 1.0469E-8 |
| プラズマ | 32 | 1.2740E-2 | 9.1869E-2 | 8.2650E-2 | 2.0323E-1 | 4.0168E-1 | 2.0784E-1 |

*ITER DESIGN DESCRIPTION DOCUMENT TRITIUM PLANT(WBS3.2)に基づく

Table 2 水素同位体のモル容積

$$\frac{1}{V_H} = a_i - b_i T^2$$

| Isotope | a (mol/m ³) | b (mol/m ³ K ²) | Upper Temperature (K) |
|---------|----------------------------|---|-----------------------------|
| eH2 | 40860 | 14.03 | 24 |
| nH2 | 41060 | 14.19 | 24 |
| HD | 44690 | 13.93 | 25 |
| HT | 46150 | 13.56 | 26 |
| D2 | 47780 | 13.15 | 28 |
| DT | 49480 | 13.30 | 28 |
| T2 | 51050 | 13.45 | 28 |

出典 : P.C.Souers, "Hydrogen Properties for Fusion Energy",
Barkley, Uni. of California Press, 1986; p61.

Table 3 飽和蒸気のエンタルピー

$$h_i^* = u_i''T + v_i''T^2 + w_i''T^3$$

| Isotope | u'' (J/mol K) | v'' (J/mol K ²) | w'' (J/mol K ³) |
|---------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| H2 | -4.99084 | 1.05635 | -0.0142877 |
| HD | -4.86434 | 0.987180 | -0.0105271 |
| HT | -6.02617 | 1.07677 | -0.0115932 |
| D2 | -4.58840 | 1.02080 | -0.0135024 |
| DT | -11.3101 | 1.622254 | -0.0212482 |
| T2 | -4.33305 | 0.991375 | -0.0126421 |

出典 : M.Kinoshita and Y Naruse
JAERI-M 9238,(1980)

Table 4 液のエンタルピー

$$H_i^* = u_i' T + v_i' T^2 + w_i' T^3$$

| Isotope | u' (J/mol K) | v' (J/mol K ²) | w' (J/mol K ³) |
|---------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| H2 | 24.8541 | -5.99924 | 0.166775 |
| HD | 30.2796 | -7.19218 | 0.191934 |
| HT | -140.901 | 6.09091 | -0.0628662 |
| D2 | -164.891 | 7.28923 | -0.0842047 |
| DT | -188.582 | 8.76987 | -0.106162 |
| T2 | -198.758 | 9.03387 | -0.111905 |

出典 : M.Kinoshita and Y Naruse
JAERI-M 9238,(1980)

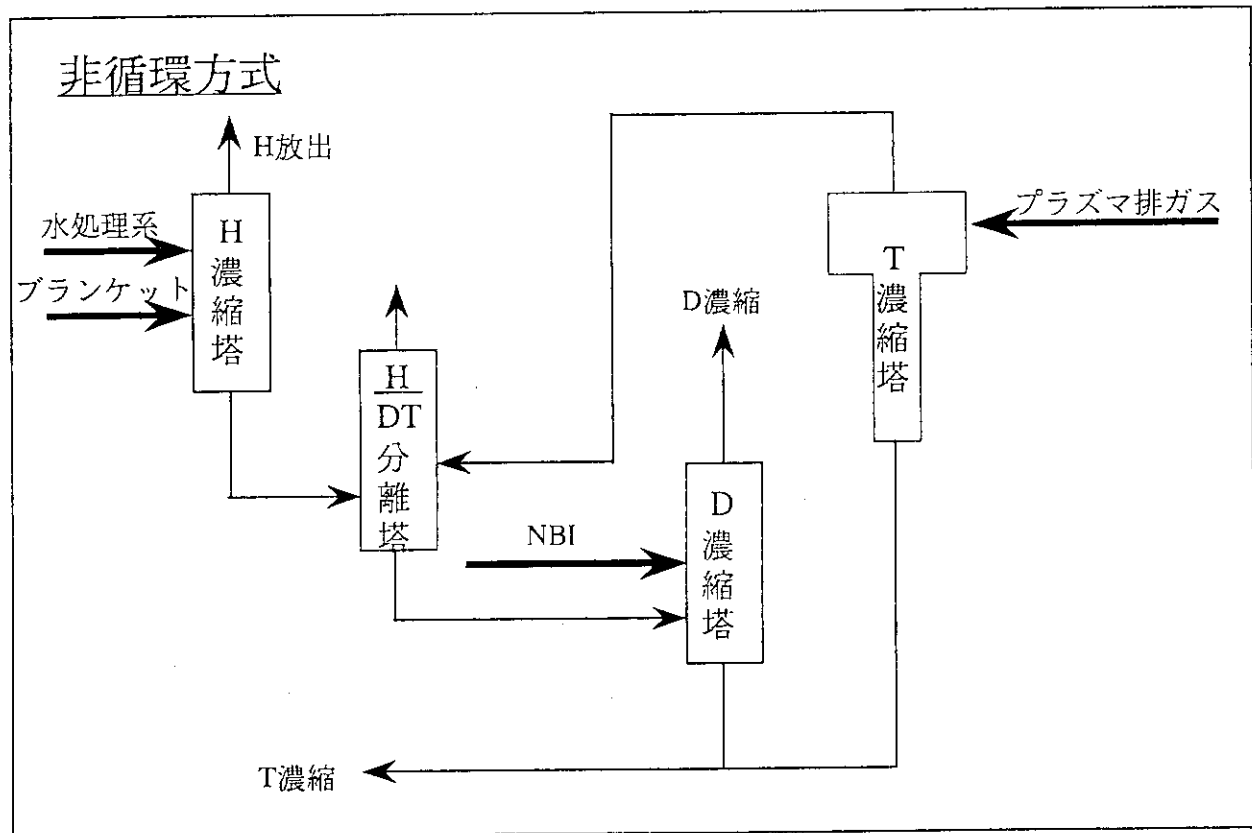
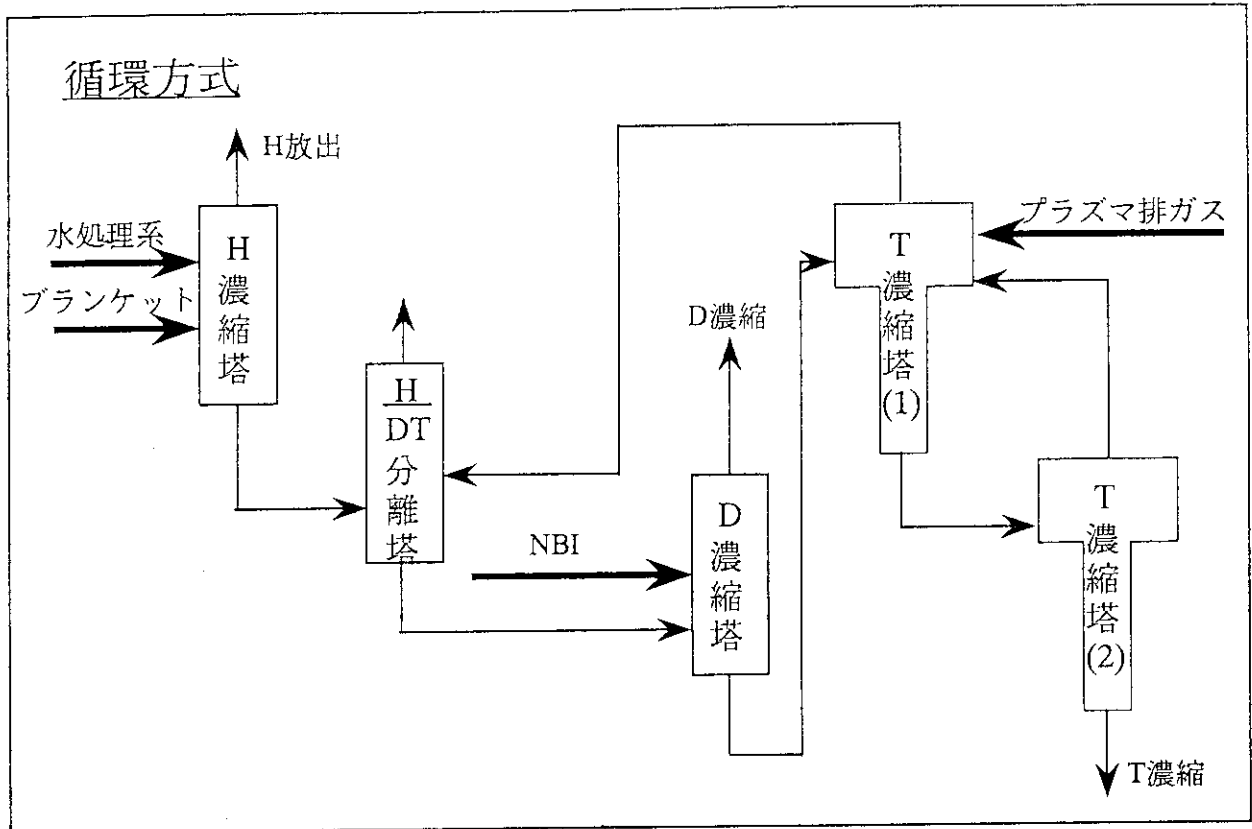


Fig. 3 塔構成の概念図

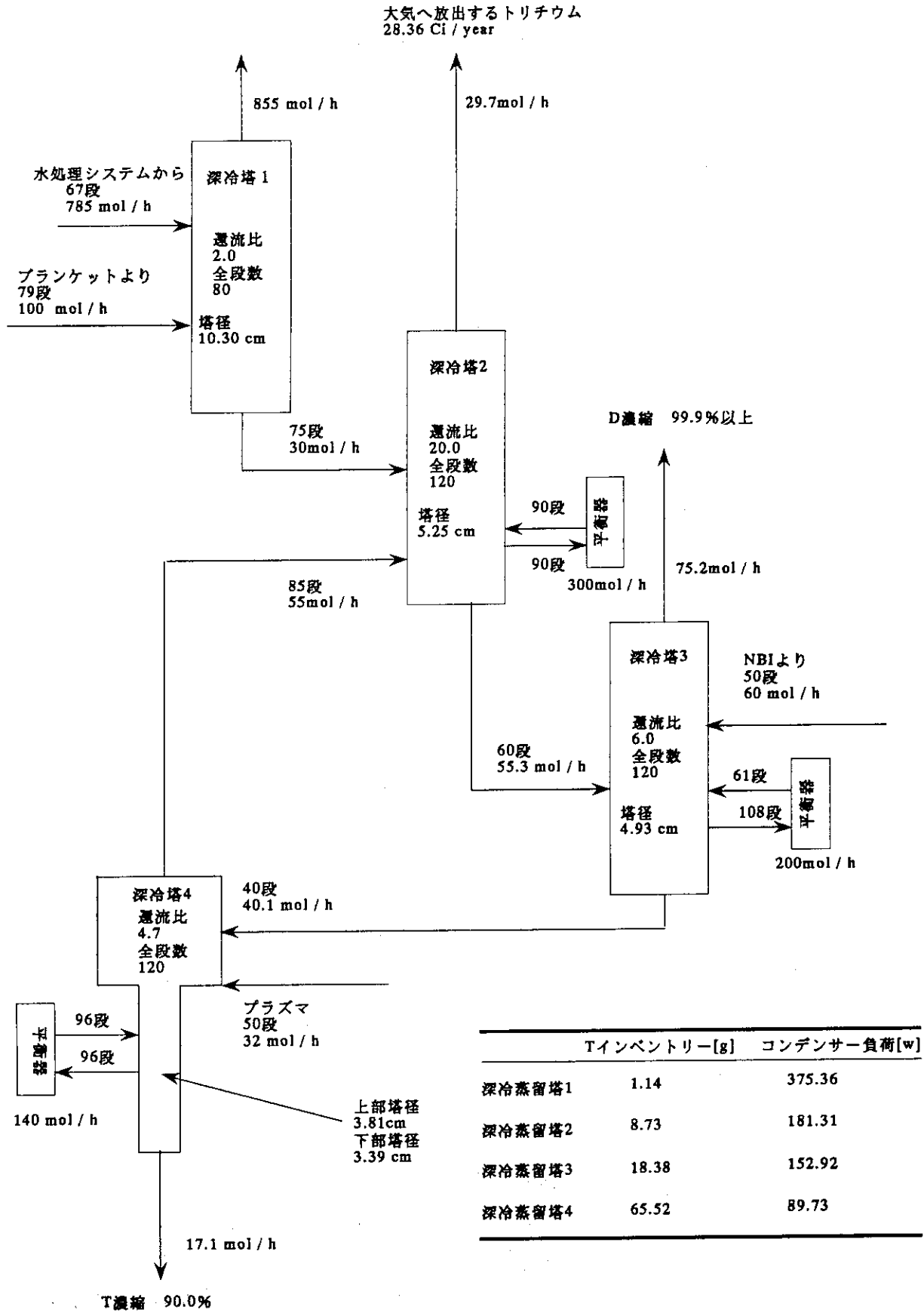


Fig. 4 プラズマ排ガス32mol / hの場合の深冷蒸留塔構成図

4. 最新の条件への対応

4.1. 要求される T 純度と T インベントリーの関係

最近の ITER の ISS 設計条件ではプラズマ排ガスの一部を ISS で処理するのではなく、全量を処理する案が採用されている。この案ではプラズマ排ガスの流量は三章の設計に用いた条件である従来の 32 mol/h から 320 mol/h へと 10 倍に増えている。この場合の各排ガスの流量と組成を Table 5 に示す。T 濃度の高い大量のプラズマ排ガスを従来の十倍扱うことからトリチウムインベントリーをシステム全体で 100 g 以下に抑えることは不可能となる。従来のように、T を 90% 以上に濃縮する必要があると固執した場合、その総インベントリーは非常に大きなものになると予想される。よって要求される T 純度とそれに対するインベントリーの関係を調べることにした。ここで (1) (2) に示す条件を満たすよう設計計算をおこなった。

- (1) 環境に放出されるガス中の T 濃度を 50 Ci/y 以下に抑える。
- (2) D を 99.9% 以上に濃縮する。

塔配置は先の三章の条件を満たすように循環型の 5 本の塔構成に変更した。要求される T 純度が 90、80、70、60 の各場合の計算結果を Fig.5、Fig.6、Fig.7、Fig.8 に各々示し、要求純度と各塔のインベントリーの関係を Fig.9 に示す。インベントリーの量は、T 濃縮塔 2 (深冷塔 5) が最も大きく、以下順に T 濃縮塔 1、D 濃縮塔、H-D、T 分離塔の順に小さくなっていくことがわかった。最後の H 濃縮塔は環境基準以下にトリチウム放出量を抑えるための H-HD、HT 分離塔でありインベントリーは非常に低い。

T 純度を 90 %とした場合の総インベントリーは 900 g に達する。しかし、要求純度を 10%下げると総インベントリーは半分程度に減らすことができることがわかった。

4.2. 低純度での最適塔構成

前章で述べたとおり低純度のトリチウムしか要求されない場合は 4.1 で設計した循環型の塔構成よりも非循環型の塔構成のほうがインベントリーには有利であると考えられる。非循環型、T 要求純度が 60%の設計をおこなった結果を Fig.10 に示す。総インベントリーは約 139 g となり、同条件の循環型の約 146 g に対し若干少なくなっている。トリチウムは深冷塔 4 と深冷塔 2 の塔底流を混

合して 60%T を実現している。60%程度のトリチウム純度の要求では深冷塔 4 でトリチウムを含まない塔頂流と 60%T の塔底部に無理なく分離できるため、トリチウムをあまり含まない塔頂流が他塔に流れることにより、他の塔のインベントリーが低く抑えられたことにより循環型の結果とほぼ同じ結果をもたらしたと思われる。しかしこの方式では深冷塔 4 と深冷塔 2 の塔底流を混合しているため物質収支から 60%しか実現できないことになる。

4.3.低 T インベントリーと高 T 純度が両立する塔構成

ITER ではガスパフとペレットにより D-T 燃料を供給する。インベントリー低減の観点からはこれらガスパフ及びペレットシステムに送る D-T ガス中の T 濃度は低い程良い。特に T 濃度が 60%程度でよいならば塔構成の簡略化（非循環方式）が計れ、インベントリーは更に低減できることが先の計算で示された。しかし、ペレットによる D-T 燃料の供給では、高純度 T でないと正常なペレットができないという報告があり¹⁾、ペレット用にある程度の高純度 T (~90 %) 流れを作らなければならない場合も考える必要がある。よって、この非循環方式の利点を生かし高純度 T の流れをある程度作ることができる、低 T インベントリーと高 T 純度が両立する塔構成を考え、計算をおこなった。この結果を Fig.11 に示す。

プラズマ排ガスを、深冷塔 5 で処理した塔底液の一部を深冷塔 4 に導き 90%T にし高純度を達成、深冷塔 5 で処理した塔底液の残りの液と深冷塔 2 の塔底液を混合して T55%の液を得ている。総インベントリーは約 340 g となる。この方法では循環方式で得た T90%-170mol/h にくらべ液量は 80 mol/h と約半分となっているがインベントリーは前者に比べ 3 分の 1 と大きく減らすことができるのが特徴である。

Fig.12 に 81%T にした場合の結果を示す。総インベントリーは約 234 g となる。インベントリー低減の必要性がある場合、本方式では深冷塔底部流量を減らすか、要求純度を低くすることで対応することになる。

Table 5 ISSで処理する各ガスの流量と組成

| | Flow Rate [mol/h] | H ₂ | HD | HT | D ₂ | DT | T ₂ |
|--------|----------------------|----------------|-----------|-----------|----------------|-----------|----------------|
| 水処理系 | 785 | 9.5877E-1 | 4.0691E-2 | 4.9689E-5 | 4.8930E-4 | 1.2616E-6 | 8.3434E-10 |
| ブランケット | 100 | 9.8840E-1 | 2.1780E-4 | 2.6749E-3 | 5.0352E-7 | 8.1194E-5 | 8.6219E-3 |
| NBI | 60 | 4.9070E-10 | 3.9991E-5 | 3.6406E-9 | 9.9976E-1 | 1.9996E-4 | 1.0469E-8 |
| プラズマ | 320 | 1.1470E-2 | 2.3740E-2 | 3.3170E-3 | 2.8340E-1 | 3.8440E-1 | 2.9370E-1 |

*ITER DESIGN DESCRIPTION DOCUMENT TRITIUM PLANT(WBS3.2)に基づく

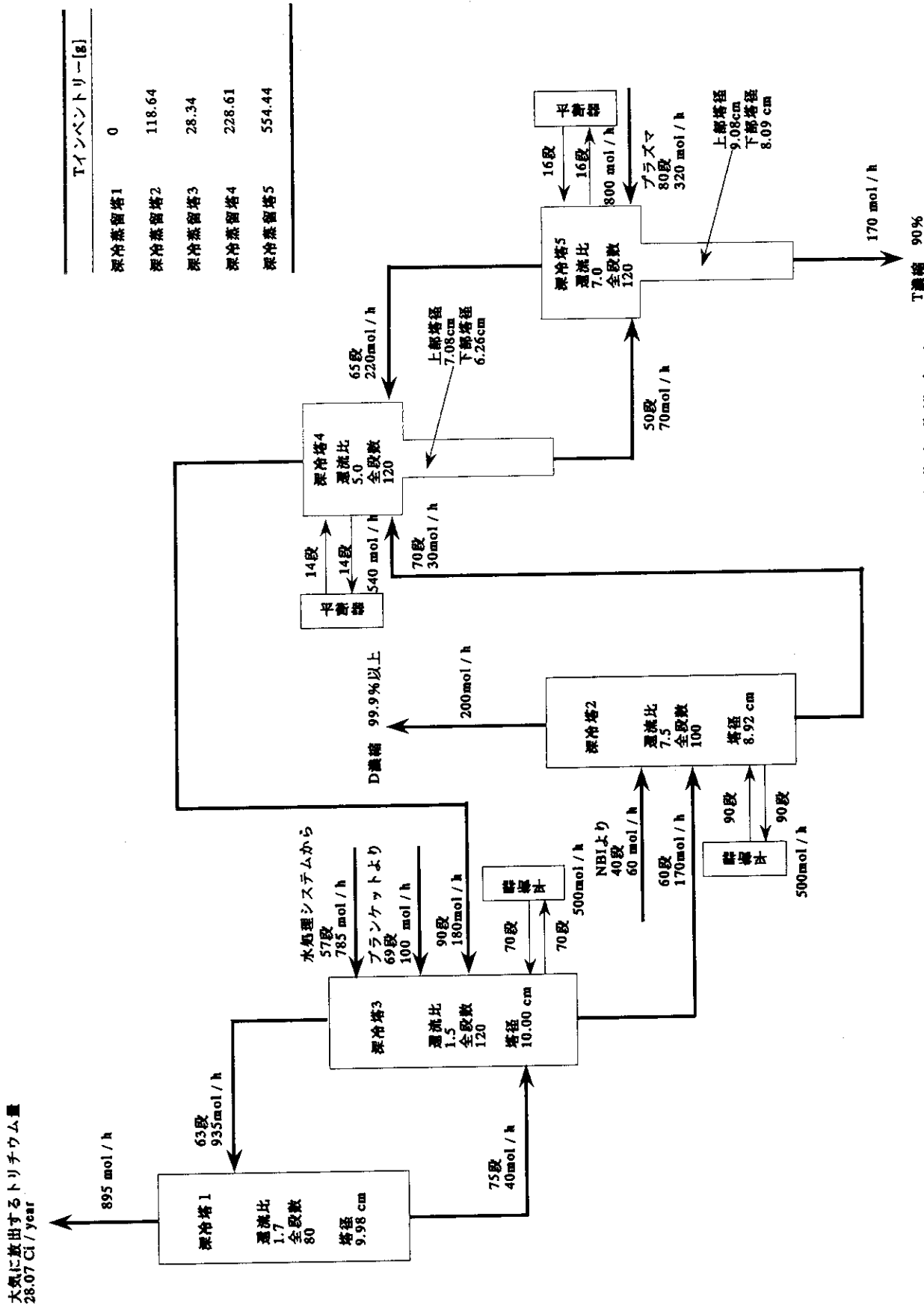


Fig. 5 プラズマ排ガス320 mol/hでT90%の場合の深冷蒸留塔構成図

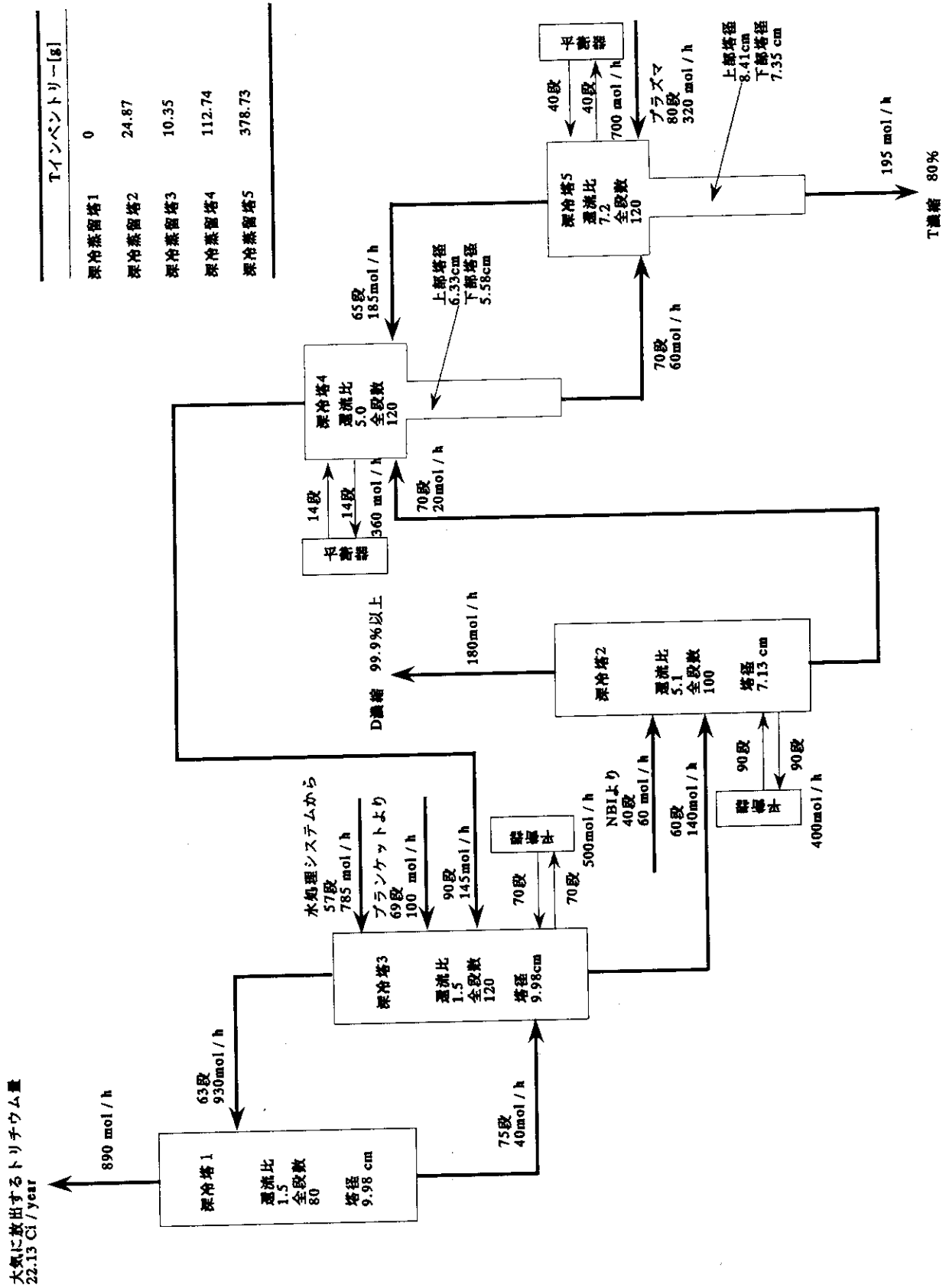


Fig. 6 プラズマ排ガス320 mol / hでT80%の場合の深冷蒸留塔構成図

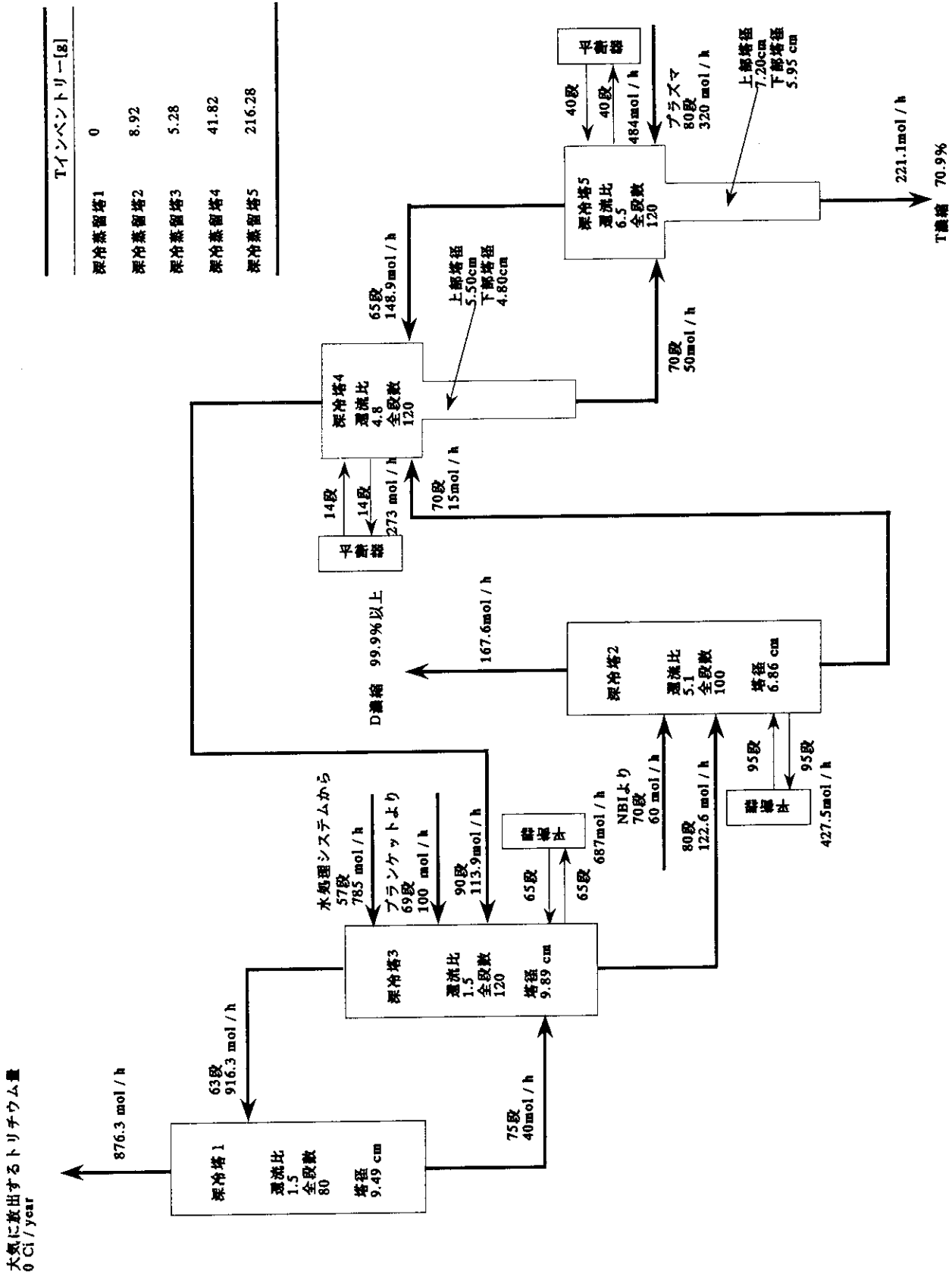


Fig. 7 プラズマ排ガス320 mol/hでT70.9%の場合の深冷蒸留塔構成図

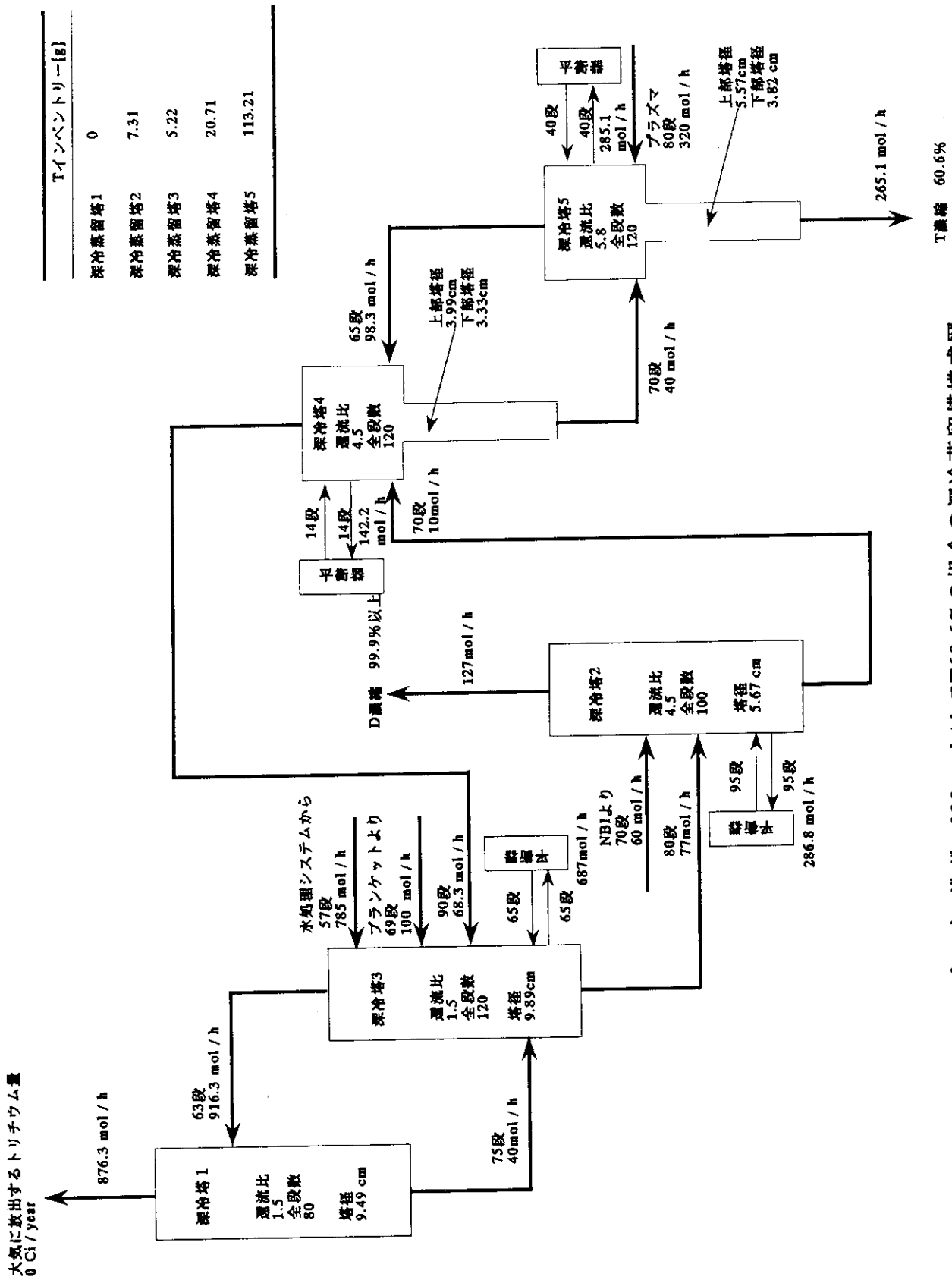


Fig. 8 プラズマ排ガス320 mol/hでT60.6%の場合の深冷蒸留塔構成図

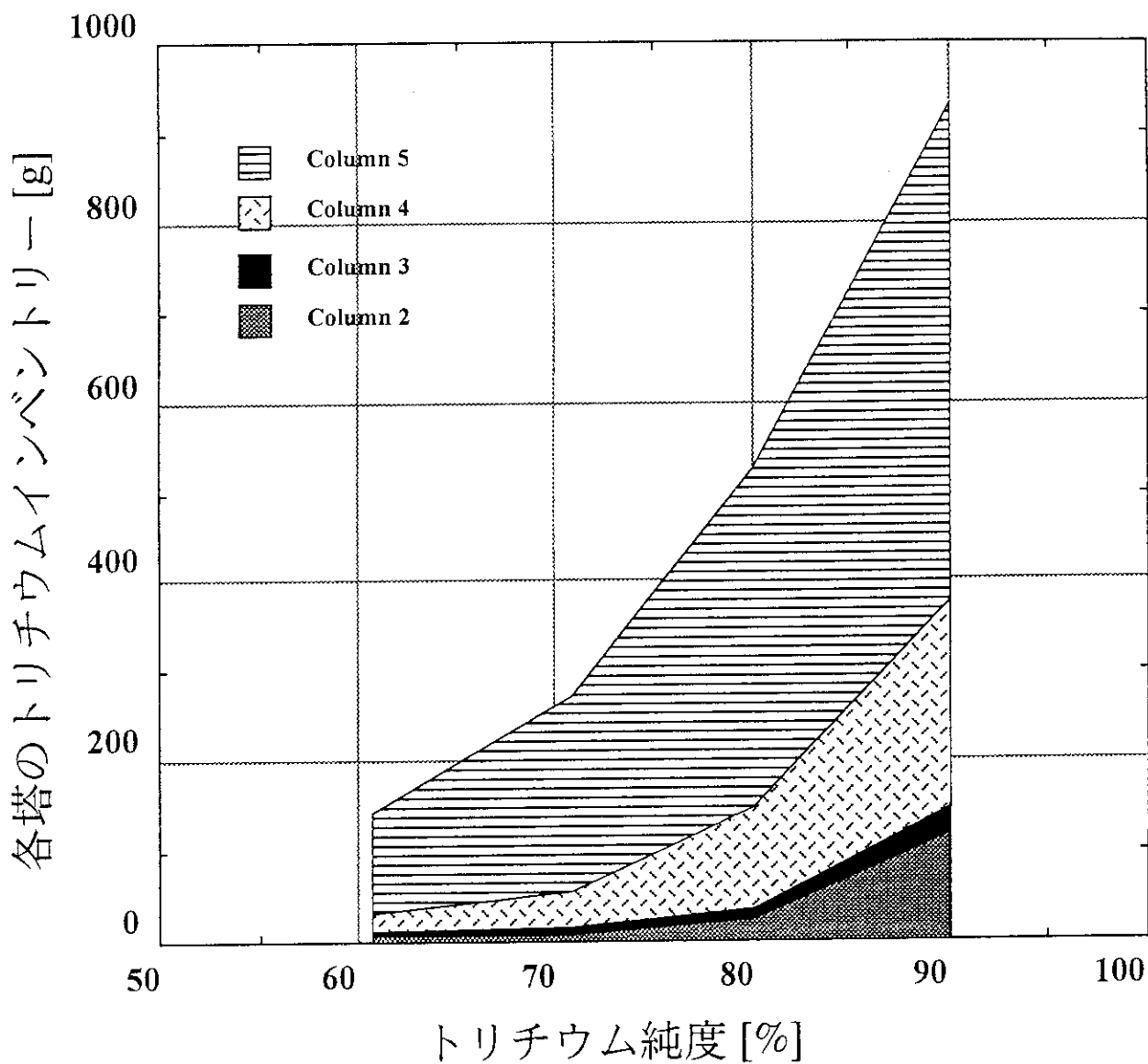


Fig. 9 トリチウム純度と
各塔のトリチウムインベントリーの関係

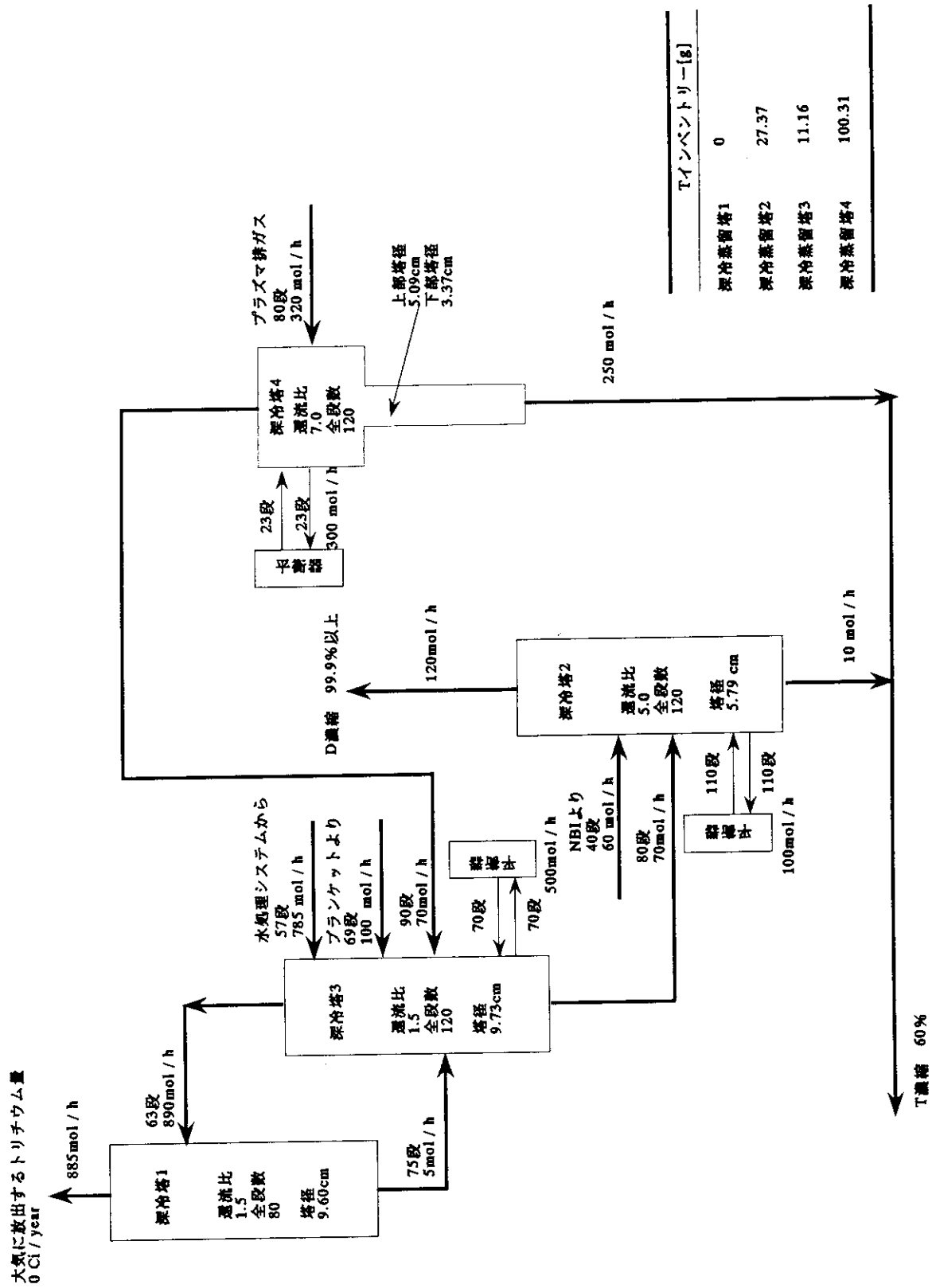


Fig. 10 プラズマ排ガス320 mol/hでT60%の場合の深冷蒸留塔構成図 (非循環型)

| Tインベントリ-[g] | | コンデンサー-負荷[w] | |
|-------------|--------|--------------|--|
| 深冷蒸留塔1 | 0 | 297.13 | |
| 深冷蒸留塔2 | 20.35 | 202.84 | |
| 深冷蒸留塔3 | 21.06 | 312.49 | |
| 深冷蒸留塔4 | 263.00 | 258.79 | |
| 深冷蒸留塔5 | 35.70 | 86.97 | |

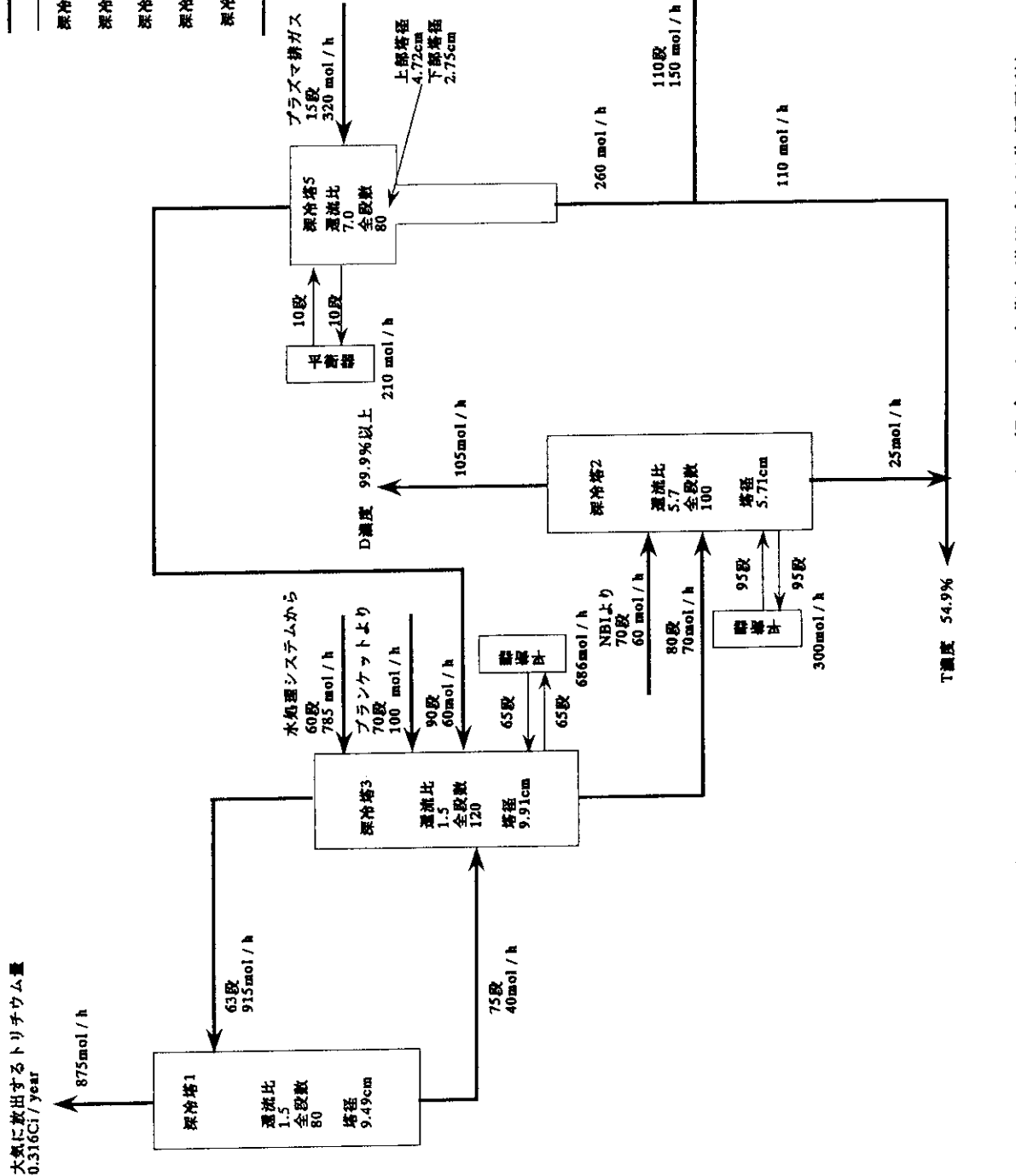


Fig. 11 プラズマ排ガス320 mol/hでT90-55%の場合の深冷蒸留塔構成図(非循環型)

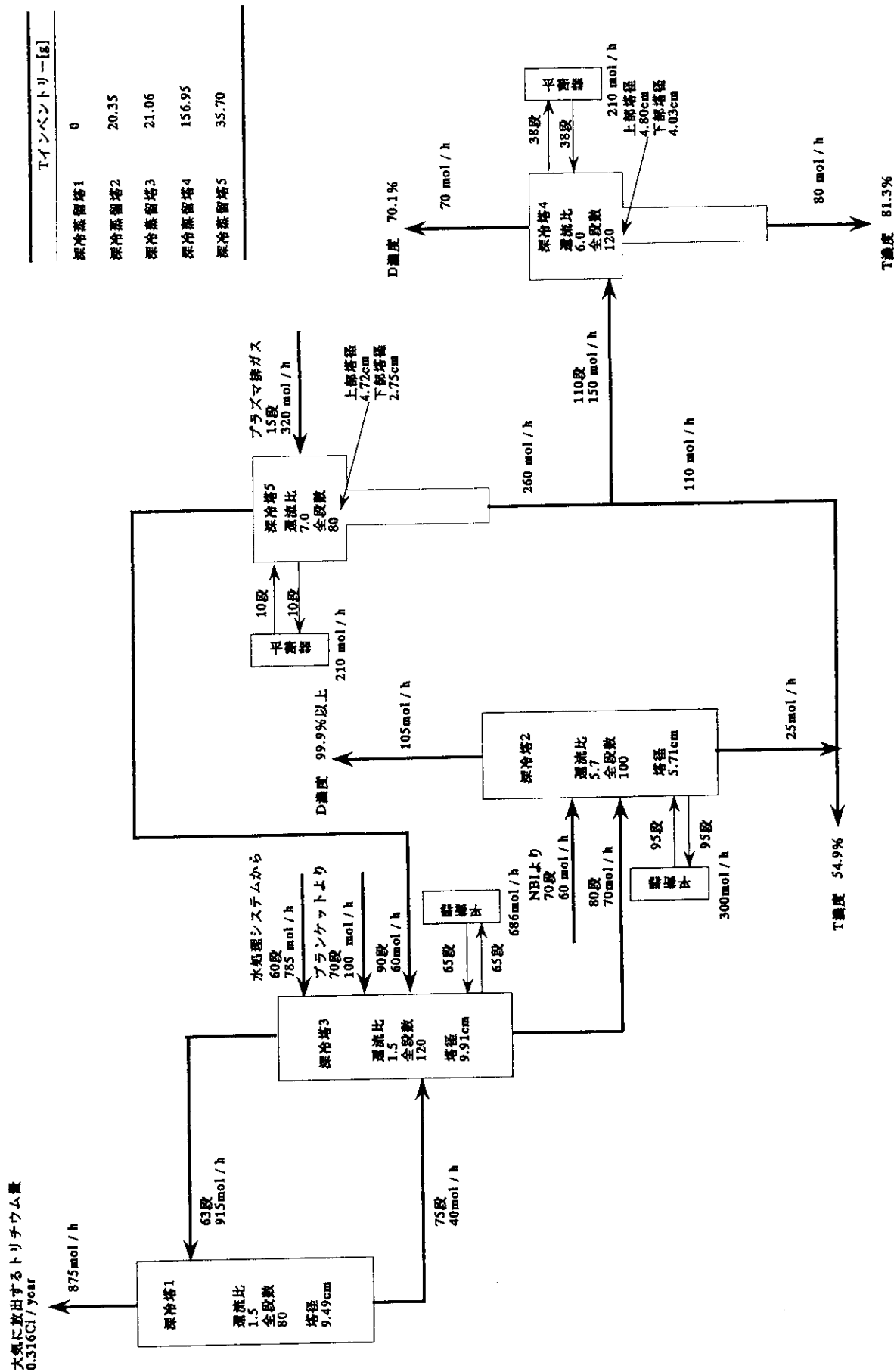


Fig. 12 プラズマ排ガス320 mol/hでT81.55%の場合の深冷蒸留塔構成図(非循環型)

5. 結論

ITER 規模の核融合炉を想定し、予想されている各排ガスの流量と組成に基づき設計計算を実行し、塔構成をインベントリーの最小化という観点から検討、考察をおこなった。

プラズマ排ガス 32 mol/h (プラズマ排ガス全量の 10%)、水処理系からの排ガス 785 mol/h、ブランケットからの排ガス 100 mol/h、NBI からの排ガス 60 mol/h を H 濃縮塔と H-D、T 分離塔、D 濃縮塔、T 濃縮塔の 3 塔のループ構成からなる計 4 本のシンプルな塔構成で処理する場合の計算をおこなった。H ガス放出基準である T 50 Ci/y、D 濃縮 99.9% 以上、T 濃縮 90% 以上の条件を満たしつつインベントリーが最小となるように経験的に全段数、還流比、原料供給段、平衡器の抜き出し段、戻し段、塔頂流量、塔底流量、循環流量の各パラメータを変えて計算をおこなった結果、総インベントリーは約 94 g と設計限界の 100 g 以下を満たすことができることがわかった。

この手法を最近の ITER の ISS 設計基準であるプラズマ排ガス 320 mol/h、水処理系からの排ガス 785 mol/h、ブランケットからの排ガス 100 mol/h、NBI からの排ガス 60 mol/h に適応させた。H ガス放出基準である T 50 Ci/y、D 濃縮 99.9% 以上を満たしつつ T の要求純度が変化した場合、塔構成と総インベントリーがどのように変化するかを考察した。プラズマ排ガスの流量が先の 10 倍に増え、一塔で T を高純度に濃縮すると大きなインベントリーを伴うことが予想される。塔構成は T 濃縮塔をもう一本増やした H 濃縮塔と H-D、T 分離塔、D 濃縮塔、T 濃縮塔 1、T 濃縮塔 2 の 4 塔のループ構成からなる 5 塔構成がシンプルでかつ条件を満たす最適な塔構成であることがわかった。また T の要求純度に対し総インベントリーがどのように変わるかを計算した結果 T 90% では約 930 g となり T の要求純度が 10% 減るにつれ総インベントリーは半減することがわかった。

またいままでの塔構成の基本である循環形式からワンスルーの非循環方式にした場合低い T 要求純度の場合 T の同要求純度に対し循環形式と比べ若干少なくなるということがわかった。しかしこの非循環方式では物質収支から T 純度は決定され高純度には対応できないため、低 T 濃縮流を一部抜きだし新たな蒸留塔で濃縮することにすると T 純度 90% を先の循環流の約半分の流量つくるのに循環方式に比べ約 1/3 の総インベントリーでおこなえることがわかった。しかしこの方法では残りの低濃縮 T をペレット化して使用できるのかが問題となると思われる。

今後の設計ではこの条件では総インベントリー 100 g は不可能であり、どれ

ぐらいの T 純度を必要とするのか、どうしても高純度が必要な場合、低純度と高純度の 2 つの流れにわけることが許容されるのかといった設計基準の更なる明確化により最適塔構成は決定されることとなると考える。

また深冷蒸留塔の更なるインベントリー削減のため、多岐にわたるパラメータに関し深冷蒸留塔の分離性能に与える影響を研究していくことは必要であると考える。

参考文献

1. ITER Design Description Document (DDD) Tritium Plant (WBS 3.2) 1996/6/14
2. 山西敏彦：“核融合炉燃料サイクルにおける深冷蒸留塔による水素同位体分離に関する研究”，京都大学大学院工学研究科（化学工学）博士論文
3. 木下正弘、松田祐二、成瀬雄二：Private Communication，Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki, 319-11 JAPAN.
4. P.C.Souers：“Hydrogen Properties for Fusion Energy”，Barkley, Uni. of California Press, 1986；p61
5. 木下正弘、成瀬雄二：Private Communication，Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai, Ibaraki, 319-11 JAPAN.