

JAERI-Tech  
2000-002



JP0050299



ITERトリチウムプラントの水素同位体分離  
システムのための深冷蒸留塔の塔構成と  
インベントリーに関する考察

2000年2月

岩井保則・山西敏彦・西 正孝

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（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

---

編集兼発行 日本原子力研究所

## ITER トリチウムプラントの水素同位体分離システムのための 深冷蒸留塔の塔構成とインベントリーに関する考察

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部  
岩井 保則・山西 敏彦・西 正孝

(2000年1月4日受理)

ITER FDR の定常状態プラズマオペレーション(燃焼時間 10,000 s, 排気流量  $200 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ )に対応した水素同位体分離システム(ISS: Isotope Separation System)について、ISS に供給される三種類のフィード流(プラズマ排ガス、水処理システムの排ガス、中性粒子注入システムの排ガス)の中の水処理システムからの水素流量を大幅に減少できるという見通しに基づき、設計の見直しを行った。本検討では ITER の段階的建設のシナリオも考慮して、四塔からなる独自の塔構成を提案した。最大冷媒容量は FDR の ISS 基本設計の 44% と大幅に減少した。これは主に FDR-ISS 基本設計のカスケードがもつ大流量の重水素循環流れをここで提案するカスケードでは必要としないことによる。一方、最大トリチウムインベントリーについては FDR-ISS 基本設計と同等となったが、運転条件に対応したペレット用のトリチウム濃縮流( $T > 90\%$ )の検討の進展によって、トリチウムインベントリー低減の可能性を見出した。

Study on Cascade Configuration and Hydrogen Isotope Inventory  
of Cryogenic Distillation Columns  
for Isotope Separation System of the ITER Tritium Plant

Yasunori IWAI ,Toshihiko YAMANISHI and Masataka NISHI

Department of Fusion Engineering Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi , Naka-gun , Ibaraki-ken

(Received January 4, 2000)

The Isotope Separation System (ISS) for the ITER FDR steady state plasma operation (burn time 10,000 s, fuelling throughput 200 Pa m<sup>3</sup>/s) was designed on the basis of a substantial reduction of hydrogen flow rate from water detritation system. Three feed streams (plasma exhaust gas, streams from the CECE and from the NB injectors) are fed to the ISS. A four-column cascade was proposed in this study considering a scenario of phased construction of ITER. The maximum refrigeration duty was reduced to be 44 % of that of the original design of the FDR-ISS. This is mainly because of the elimination of a large re-circulation deuterium flow in this cascade. The maximum tritium inventory of this study was about the same that of the original FDR-ISS, but substantial reduction of tritium inventory is found to be possible with the progress in the investigation of the correspondent flow rate of tritium product stream (T>90%) for pellet with the option of operation condition.

**KEYWORDS :** ITER, Fusion Reactor, Tritium, Cryogenic Distillation, Inventory, Isotope Separation, Phased Construction, Cascade Configuration Refrigeration Duty

## 目次

1.概要	1
2.シミュレーション手法	2
3.設計条件、設計思想及び塔構成	5
3.1 設計条件	5
3.2 設計思想	6
3.3 塔構成	6
3.4 平衡器	7
3.5 液ホールドアップ	8
3.6 水素同位体インベントリーとトリチウムインベントリー	8
3.7 冷媒容量	9
4.結果と考察	10
4.1.インベントリーと冷媒容量	10
4.2.トリチウムインベントリーに影響を与える因子	12
4.3.水処理システムからの流れがISS塔設計に与える影響	13
4.4.流量の微小変動が製品流組成に与える影響	13
4.5.平衡器	14
4.6.ITER-FDR との比較	14
4.7.段階的建設への対応	15
5.結論	18
参考文献	18

## Contents

1. Introduction -----	1
2. Simulation Procedure -----	2
3. Design Condition, Design Concept and Cascade Configuration -----	5
3.1 Design Condition -----	5
3.2 Design Concept -----	6
3.3 Cascade Configuration-----	6
3.4 Equilibrator -----	7
3.5 Liquid Holdup-----	8
3.6 Hydrogen Isotope Inventory and Tritium Inventory -----	8
3.7 Refrigeration Duty-----	9
4. Results and Discussion-----	10
4.1 Inventory and Refrigeration Duty -----	10
4.2 Key Parameters for Tritium Inventory-----	12
4.3 Effect of the Flow from CECE system on ISS Cascade Design -----	13
4.4 Effect of the Flow Stability on the Composition of Product Stream -----	13
4.5 Equilibrator -----	14
4.6 Comparison with ITER-FDR-----	14
4.7 Phased Construction-----	15
5. Conclusions -----	18
References-----	18

## 1. 概要

深冷蒸留システムは核融合炉の燃料循環システムにおける水素同位体分離システム (ISS: Isotope Separation System)の中核であり水素同位体の混合ガスから軽水素(H)を取り除き燃料である重水素(D)とトリチウム(T)を分離・回収する役割を担っている。

ISS ではプラズマ排ガス、水処理システムから排出されるガス、中性粒子注入システム (NBI: Neutral Beam Injector)の排ガスを処理することが求められている。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数%程度であるとされており、プラズマから燃焼後のガス (プラズマ排ガス) を取り出し重水素、トリチウムを回収し再利用することが必要である。プラズマ排ガスは燃料精製システムで不純物成分(C, He 等)を除去された後、ISS に送られ同位体分離が行われ、重水素、トリチウムが回収される。また、トリチウムがプラズマ対向壁等を透過して冷却水に溶け込んだ結果発生するトリチウム水やトリチウムプラントで発生したトリチウム水は水処理システムで液相中のトリチウムを気相に移した後、ISS に送り同位体分離される。NBI から排出されるガスも ISS に送られ同位体分離される。

ITER においては主に三種の製品流 (装置による処理後に得られるガス流) が ISS は求められている。第一は核融合の燃料成分ではない不要な H 成分(主に  $H_2$ , HD)の濃縮流であり、この濃縮流中のトリチウム濃度 (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) を排出基準値以下にして環境へ放出される。第二に D の濃縮流が NBI の重水素源として求められている。第三に T の濃縮流が燃料注入システムのトリチウム源として求められている。

ガスの処理量は最終設計報告書 (FDR: Final Design Report) <sup>1)</sup>における ITER (FDR-ITER) 規模の炉で $\sim 400$  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のできる深冷蒸留システムが水素同位体分離の方法として最適である。本システムは消費電力が小さく、液体として水素を処理するため塔自身がコンパクトである利点を有する。一方、水素を液体として取り扱うことからそのインベントリーが大きくなる欠点がある。核融合炉における安全思想の観点から深冷蒸留システムの設計に当たって水素同位体のインベントリー、特に放射性物質であるトリチウムのインベントリーを小さくすることが求められている。インベントリーが最小限であり、かつ運転制御が容易な深冷蒸留システムの実現が水素同位体分離システムにおける重要な課題である。本報告は FDR-ITER 規模の核融合炉を想定し、現時点で想定されている各排ガスの流量と組成に基づき概念設計を行い、深冷蒸留システムにおける蒸留塔の構成と各塔の概念設計を上記観点から検討、考察を行った結果をまとめたものである。

2. シミュレーション手法<sup>2),3)</sup>

Figure 1 に深冷蒸留塔の概略図を示す。ヘリウム冷凍機から供給される極低温のヘリウムにより塔頂部のコンデンサーで液化した水素は、塔底部のリボイラーで蒸発した気体の水素と充填部で向流接触する。蒸留が行われた結果低沸点成分(H<sub>2</sub> など)が塔頂部に、高沸点成分(T<sub>2</sub> など)が塔底部に濃縮される。核融合炉燃料循環システムの水素同位体分離システムでは深冷蒸留塔の塔径は 2~15 cm 程度になると検討されている。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<sup>2)</sup>。本報告の深冷蒸留塔の解析では、このステージモデルに基づいた定常状態組成解析コード（コード名：CRYDIS-R）を使用した。Figure 2 に解析に用いたモデルカラムを示す。

本設計検討では設計条件を満たす各蒸留塔の塔径、理論段の数等を決定することが求められている。定常解析コードを用いて既知のフィードの組成、流量に対して、蒸留塔の必要な理論段の数、還流比、塔頂及び塔底流量を設計変数として塔内の温度分布、塔内組成分布、流量分布を計算する。ここで理論段はその段を去る蒸気と液の組成が互いに平衡である仮想段であり塔高を決める重要な値である。還流比とは、蒸留塔の塔頂の蒸気は一部または全部がコンデンサーで液となりその一部は還流として戻され残りは留出物として取出されるが、その際の還流量を留出量で割ったものである。設計条件を満たす設計変数が決まれば塔内の最大蒸気流量から塔径が求まる。

定常状態では、各段の物質収支と熱収支から以下の基礎式を導くことができる。

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

$$\begin{aligned} A_{i,j} &= L_{j-1} \\ B_{i,j} &= -(V_j + W_j)K_{i,j} - (L_j + U_j) \\ C_{i,j} &= V_{j+1}K_{i,j+1} \\ D_{i,j} &= -F_j z_{i,j} \end{aligned} \quad (2.2)$$

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

$$\begin{aligned} E_{j,in} &= L_{j-1} h_{j-1} + V_{j+1} H_{j+1} + F_j H_{Fj} + H_{Lj}(x_{3,j} + x_{5,j} + x_{6,j})\lambda + q_j \\ &= E_{j,out} = (L_j + U_j)h_j + (V_j + W_j)H_j + Q_j \end{aligned} \quad (2.4)$$



(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 (蒸留塔に供給される流体) の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、逐次的に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、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、本検討のような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。物質収支がある誤差内に収まるまで以上の計算を繰り返すことで、温度分布、塔内組成分布、流量分布を得ることができる。この手法は蒸留塔の設計問題にも適応している。この手法で理論段数、還流比が高い場合に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。

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

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

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。

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

(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 Newton - Raphson 法により変数を修正しながら繰り返し解くことで、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。なお今回は概念的な設計検討を目的としているので非理想性やトリチウム崩壊熱の影響を省いた。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  $T_j$  ( $j=1\dots$ ) を与え、収束解を得ることができた。

## 3. 設計条件、設計思想及び塔構成

## 3.1 設計条件

ISS ではプラズマ排ガス、水処理システムから排出されるガス、中性粒子注入システム(NBI: Neutral Beam Injector)の排ガスを処理することが求められている。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数%程度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(プラズマ排ガス)、トリチウムを回収し再利用することが必要である。このプラズマ排ガスは、燃料精製システムで不純物成分(C、He 等)が除去された後、ISS に送られ、燃料成分が回収される。また、トリチウムがプラズマ対向壁等を透過して冷却水に溶け込んだ結果発生するトリチウム水やトリチウムプラントで発生したトリチウム水は電解セルと液相触媒化学交換反応を用いた水処理システム(CECE: Combined Electrolysis Catalytic Exchange)で液相中のトリチウムを気相に移した後、そのガスを ISS に送り処理することとなっている。NBI から排出されるガスもまた ISS に送られ処理される。ここでは FDR-ITER 規模の核融合炉を想定し、現時点で想定されている以下の(1)～(3)に示す各排ガスの流量と組成に基づき深冷蒸留システムの蒸留塔の構成と各塔の概念設計の検討、考察を行った。

## (1) プラズマ排ガス

流量：320mol/h

組成：H 5%、D-T 比は運転状態によって 50-50～75-25 の範囲で変動するものとする。

## (2) 水処理系からのガス

FDR-ITER 以前では流量が 785mol/h であったが、その後の設計変更等に基づいて再検討された結果以下の通りとなっている。

流量：20mol/h

組成：D  $8.4 \times 10^{-2}\%$ 、T  $4.1 \times 10^{-4}\%$ 、その他は H。

## (3) NBI から排出されるガス

流量：40mol/h

組成：H 0.5%、T 1%、その他は D。

本設計検討で使用したフィード条件を Table 1 に示す。

FDR-ITER においては ISS では主に三種類の製品流が求められている。第一は核融合の燃料成分ではない不要な H 成分(主に H<sub>2</sub>、HD)の濃縮流であり、この濃縮流中のトリチウム濃度 (HT、DT、T<sub>2</sub> の形で含まれている T の全体に対する原子分率)を排出基準値以下まで十分に下げることによって環境への放出を可能とすることが求められている。第二に D の濃縮流であり NBI の重水素源として求められている。第三に T の濃縮流であり燃料注入システムのトリチウム源として求められている。本報告では以下の(1)～(3)に示す製品流条件を設定して設計計算を実行した。

(1) H 濃縮流中の T 濃度は多くとも  $1.8 \times 10^{-5}\%$  とする。爆発限界以下とするために不活性ガスで 100 倍希釈が行われ、これによってそのまま環境に放出された場合でも排気中の元素状ト

リチウムの濃度限度である 90 Bq/cc を越えることはない。

(2) NBI の重水素源としての高純度の重水素は 40 mol/h 以上とする。この中に含まれる H は 0.5%以下に T は 0.02%以下に抑える。これは設計条件としては大変厳しい条件である。

(3) 燃料注入システムのトリチウム源としての T が 90%以上に濃縮された製品流を 80mol/h とする。

### 3.2 設計思想

設計検討における基本思想は以下の通り。

塔構成に関して

(1) ITER での以下の実験のスケジュールを考慮し、段階的製作を前提とした塔構成を提案する。

#### ①D-D 運転で H 除去のみに供させる期間

(H を除去した後の D 濃縮流中の T は 0.02%以下に抑えられる見通しのため、この期間中は T 除去は行わない。)

②D-T 運転で燃料注入システムへの高純度トリチウムの供給が求められておらず、また水処理系が稼働前の期間

③D-T 運転で燃料注入システムへの高純度トリチウムの供給は求められるが、まだ水処理系が稼働前の期間

#### ④D-T 運転で全てのフィードの処理が求められる期間

(2) システム全体のトリチウムインベントリーを極力低減する。

(3) トリチウムインベントリーに大きな影響を与える因子を明らかとして、トリチウムインベントリーを下げるための提案を行う。

(4) 主要製品流以外の流れを考慮することによるインベントリーの低減を行う。この流れの組成については以下の制限を設ける。

D-T ガス：H 成分 0.5%以下

D濃縮ガス (NBI 供給分以外)：D 成分 90%以上

各塔の設計に当たって

(5) 制御の容易さを考慮し、途中段からの抜き出し流れを製品流とはしない。

(6) 深冷蒸留塔の建設コストの観点から、同位体平衡器の個数及びその流量を極力減らす。

(7) 中間リボイラー、塔径の途中変更など深冷蒸留での実績のない装置上の工夫は採用しない。

### 3.3 塔構成

深冷蒸留塔では水素同位体 6 成分 (H<sub>2</sub>、HD、HT、D<sub>2</sub>、DT、T<sub>2</sub>) を含むガスを処理し、H 濃縮流、D 濃縮流、T 濃縮流の 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。

カスケードを構成する塔の本数については、設計における製品流の条件から H 放出に際して HT を一定濃度以下に抑えるための H 濃縮塔、NBI の重水素源として高純度の重水素の要求を満たすための D 濃縮塔、燃料注入システムのトリチウム源として T 90%以上の要求を満たすための T 濃縮塔の 3 本が最低限必要である。また設計における入り口条件としてプラズマ排ガスの D-T 比は運転状態によって 50-50~75-25 の範囲で変動するため、特に D-T が 75-25 の場合に T 濃縮塔単塔で T 90%以上の要求を満たすのは負荷が大きくなりトリチウムインベントリーが大きくなることが推察され、T 濃縮塔に関しては 2 塔構成を採用することとした。従ってカスケードは H 濃縮塔、D 濃縮塔、T 濃縮塔 1、T 濃縮塔 2 の 4 塔で構成するものとした。

ISS ではプラズマ排ガス、水処理システムから排出されるガス、NBI の排ガスを処理することが求められている。それぞれのガスをフィードとしてどの塔に導くかの選択が課題となる。水素同位体ガス 6 成分は沸点の低い順に H<sub>2</sub>、HD、HT、D<sub>2</sub>、DT、T<sub>2</sub>となっており、本課題について以下のように考察した。

- ①すべてのガスを H 濃縮塔にフィードとしていれ、H 濃縮塔→D 濃縮塔→T 濃縮塔 1←→T 濃縮塔 2 の順番に蒸留していく方法ではすべての塔にトリチウムが分布してしまいインベントリーが大きくなる。
- ②すべてのガスを T 濃縮塔 1 にフィードとしていれ、H 濃縮塔←D 濃縮塔←T 濃縮塔 1←→T 濃縮塔 2 の順番に蒸留していく方法ではすべての塔にトリチウムが分布することは避けられるが、T 濃縮塔 1 に大きな受け入れ容量が必要であり塔径の大きな塔となる。しかしトリチウム濃度の低い水処理系からのガスと NBI の排ガスを T 濃縮塔 1 にフィードとして入れる必要はなく H 濃縮塔に入れた方がよいと判断されること、NBI の重水素源として高純度の重水素が要求され D 濃縮塔に最も厳しい条件が課せられることから、本方法は効率的とはいえない。
- ③水処理系からのガスと NBI の排ガスを H 濃縮塔にプラズマ排ガスを T 濃縮塔 1 にフィードとして入れ、D 濃縮塔をカスケードの最上流に移動させて、D 濃縮塔(D 高純度濃縮)←H 濃縮塔(H/D 分離)←T 濃縮塔 1 (HD/DT 分離) ←→T 濃縮塔 2(D/T 分離)の形をとることにより最も効率的な設計が可能と判断される。

従って本研究では上記③のカスケードを基本に設計検討を進めた。Figure 3 にカスケードの概念図を示す。

### 3.4 平衡器

効率よく深冷蒸留塔内で分離をおこなわせるため、深冷蒸留塔の途中段から蒸気を抜き出して同位体交換を行った後に深冷蒸留塔に戻す同位体平衡器を採用した。

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。



本設計では同位体平衡器の操作温度は 25℃であるとした。

### 3.5 液ホールドアップ

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。Dixon 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塔内の蒸気速度が 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<sup>1)</sup>。このデータから塔内の蒸気速度  $F_V$  を 0.10~0.15 m/s とすることが妥当である。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  $T$  [K] 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。

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

また充填塔の理論段の一段あたりの相当高さを示す H.E.T.P (Height Equivalent to a Theoretical Plate) は実験から<sup>2)</sup> 0.05 m と推算されこの値を採用した。装置の単位容積あたりの液相容積の割合を示す液ホールドアップ分率  $H_{UP}$  を空塔体積の 10~12% と仮定し<sup>2)</sup>、Table 2 に示す水素同位体のモル容積<sup>4)</sup> を塔頂、塔底で計算しその算術平均  $V_H$  で代表させると充填部の液ホールドアップ  $Liq$  [mol] は次式で計算できる。

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

なお今回の計算ではリボイラー液ホールドアップ  $Liq_{Reboiler}$  についてはリボイラー液等が具体的に想定できないために充填部ホールドアップの 5% という概略値を用いて計算した。コンデンサーの液ホールドアップ  $Liq_{Condenser}$  についてもまた液の凝縮量等が容易な基準をもって推算できないことなどから充填部と同じ基準の液ホールドアップとし、コンデンサー部の容量を充填部の一理想段と同じとして計算した。上記リボイラー、コンデンサー液ホールドアップの与え方は ITER-FDR における推算手法を基本としたものであるが今後設計の詳細化、具体化に当たって検討を要する部分である。

### 3.6 水素同位体インベントリーとトリチウムインベントリー

蒸留塔全体の水素同位体インベントリーは各部分の液ホールドアップから以下の式で表される。式(3.4)はインベントリーを上からコンデンサー部(第1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ものである。

$$\text{HDT Inventory [mol]} = \text{Liq}_{\text{Condenser}} + \sum_{i=2}^{n-1} \text{Liq}_i + \text{Liq}_{\text{Reboiler}} \quad (3.4)$$

蒸留塔全体のトリチウムインベントリーの計算は下の式(3.5)を用いておこなった。

$$\begin{aligned} \text{T Inventory [g]} = & \text{Liq}_{\text{Condenser}} \times 6 \times \left( \frac{[\text{HT}]_1 + [\text{DT}]_1}{2} + [\text{T}_2]_1 \right) \\ & + \text{Liq} \times 6 \times \sum_{i=2}^{n-1} \left( \frac{[\text{HT}]_i + [\text{DT}]_i}{2} + [\text{T}_2]_i \right) \\ & + \text{Liq}_{\text{Reboiler}} \times 6 \times \left( \frac{[\text{HT}]_n + [\text{DT}]_n}{2} + [\text{T}_2]_n \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

上記の式からわかるとおり水素同位体インベントリー、トリチウムインベントリー共に液相の水素のインベントリしか考慮していない。リボイラー、コンデンサーの液ホールドアップの与え方を含め、気相のインベントリーも考慮した塔内のインベントリーを精度良く推算する方法の確立が今後の課題である。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、今回は無視した。

### 3.7 冷媒容量

ヘリウム液化冷凍機の性能についての知見を得るためには、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<sup>5)</sup>、 $H_1$  は Table 3 から算出した液のエンタルピー<sup>5)</sup>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。また、冷媒容量は今回コンデンサー負荷のみを考慮した。

## 4. 結果と考察

### 4.1 インベントリーと冷媒容量

核融合炉における設計思想の観点から深冷液化蒸留システムの設計に当たっては水素同位体全体のインベントリー、特に放射性物質であるトリチウムのインベントリーをできる限り小さくすることが求められている。設計条件を満たしながらインベントリーが最小限になることに加え、運転制御の容易さを考慮した深冷蒸留塔の設計技術を確立することは非常に重要である。Figure3 のカスケードを基にしたケーススタディを通してトリチウムインベントリーを最小にする設計を模索した。なおカスケードにおける個々の塔の以下の呼び方は Figure3 の通りである。

今回の ISS の設計においてもっとも特徴的であるのはプラズマ排ガスのフィード組成の変化（H 5%、D-T 比は運転状態によって 50-50~75-25 の範囲で変動）に対して製品流の組成条件を常に満たす設計を行わなければならないことである。トリチウムインベントリーはカスケードでは Column1 と Column4 の両者に並存する。プラズマ排ガスの組成変動に対して燃料注入システムのトリチウム源として T が 90% 以上に濃縮された製品流を確保するための設計思想としては Column1 と Column4 の両塔でプラズマ排ガスの組成変動に対応させるケース、Column1 のみでプラズマ排ガスの組成変動に対応させるケース、Column4 のみでプラズマ排ガスの組成変動に対応させるケースの 3 種類に分けることができる。プラズマ排ガスの組成変動に対応する上記の設計思想の違いによりカスケード全体のトリチウムインベントリーは大きく異なると予想される。Table4 に上記 3 種類の設計思想に対応した設計結果を示す。Calc.1 は Column1 と Column4 の両塔でプラズマ排ガスの組成変動に対応させた場合、Calc.2 は Column1 のみで変動に対応させた場合、Calc.3 は Column4 のみで変動に対応させた場合である。なお Calc.1~3 の計算結果については平衡器の位置、流量等に関して最適化は行っていない。特に平衡器の流量はインベントリー削減に大きく影響するがコスト面などからその個数、流量について議論されている段階である。また本項では Figure3 の④の流れ中の D/T 比は 50/50 に固定せず可変であるとした。表欄外に示すとおり以下の議論においてプラズマ排ガスの変動組成の内でトリチウム組成がもっとも大きい H/D/T = 5/47.5/47.5 を Case1、5/57/38 を Case2、もっとも小さい 5/71.25/23.75 を Case3 と今後呼ぶこととする。本検討ではインベントリーの推算に必要な液インベントリーの算定法としては ITER-FDR の手法に本研究室での研究結果<sup>2)</sup>である HETP の考察や米国ロスアラモス国立研究所(LANL)のトリチウムシステム試験施設(TSTA)の ITER 実規模サイズ深冷蒸留塔で得られた蒸気速度と液ホールドアップの相関関係のデータを反映させた以下の手法を採用した。全塔について HETP を 5cm とする。

塔 1：蒸気速度 13cm/s、液ホールドアップ 10%

塔 2：蒸気速度 10cm/s、液ホールドアップ 12%

塔 3：蒸気速度 10cm/s、液ホールドアップ 10%

塔 4：蒸気速度 15cm/s、液ホールドアップ 10%

リボイラーホールドアップ、コンデンサーホールドアップは 3.5 参照。



Table4 に示した計算結果から以下の結論が導かれる。

i) トリチウムの濃縮を目的とした Column1 と Column4 の塔径は Case3 に対応させた塔設計を行うことで決定される。トリチウム組成のもっとも小さい Case3 がこれらの塔の設計において条件が最も厳しいためである。

ii) インベントリーは Case1 がもっとも大きくなる。塔径などの塔の大きさはプラズマ排ガス中のトリチウムの分率が最も小さく、濃縮が最も困難な Case3 で決まるのに対して、Case3 に合わせた塔径は Case1 には余裕があり、Case1 はプラズマ排ガス中のトリチウムの率が最も高いためである。(組成の変動を考慮せずプラズマ排ガスの組成条件が Case1 で固定であれば塔径は小さくてよく、インベントリーも小さくなる。)

iii) 水素同位体インベントリー、トリチウムインベントリーに着目した場合 Calc.1 がもっとも小さい。つまり、プラズマ排ガスの組成変動を Column1 と Column4 の 2 塔で対応させた方が Column1 か Column4 のどちらか一方で対応させるよりも有利であることを示している。一方の塔だけで組成変動に対応させようとした場合、Case1 の場合と Case3 の場合で必要と計算される塔径の差が大きく違い、設計では最大塔径に合わせて塔設計しなければならないからである。この結論からいえることはインベントリー最小となる最適設計は Column1 と Column4 の両塔でプラズマ排ガスの組成変動に対応することであり、今後最適化作業を進めることによって Calc.1 よりも更にインベントリーは小さくできると予想される。

iv) 冷媒容量は Case3 の場合が最も大きくなる。また冷媒容量の面からもプラズマ排ガスの組成変動を Column1 と Column4 の 2 塔で対応させた方が Column1 か Column4 のどちらか一方で対応させるよりも有利であることを示している。一方の塔だけで組成変動に対応させようとした場合、Case1 と Case3 の両方の条件を満たすためにどちらかの Case で無理に還流比をあげなければならないことに原因がある。現時点では上記に記したように更なる最適化の余地があるが Calc.1 がインベントリー、冷媒容量的にもっとも優れていると判断される。

Column1 と Column4 間の循環流量は Column1 と Column4 の塔径、インベントリー、冷媒容量に影響を与えるパラメーターである。Column4 のフィード流量を  $\alpha$  mol/h とすると Column4 の塔頂からは  $\alpha - 80$  mol/h、塔底からは  $T > 90\%$  の製品流が 80 mol/h という流量バランスとなる。Calc.1 では  $\alpha = 580$  である。Calc.1 の Case3 を基本として  $\alpha$  の影響の考察を試みた。 $\alpha$  を 840、580、320、240 と変更した場合の Case3 の条件における設計結果を Table5 に示す。なお Table5 では、循環流量の影響は Column4 の設計のみに反映している。よって各 Case 共、インベントリー的には更なる最適化の余地が残っている。

Table5 に示した計算結果から以下の結論が導かれる。

i)  $\alpha$  は冷媒容量に若干の影響を与える。 $\alpha$  が大きいほどカスケード全体の冷媒容量は減少する。

ii) インベントリーとしては  $\alpha = 580$  の場合が最小となった。これは  $\alpha$  が小さい場合は column4 の還流比をあげないと  $T > 90\%$  の製品流が 80 mol/h 製造できないこと、 $\alpha$  が大きい場合はフィードを気体としているためフィード段の蒸気流量が非常に大きくなり塔径の大きさに影響を与え

てしまうことから  $\alpha$  値には最適値が存在する。

4 つの比較では  $\alpha=580$  がインベントリー的に最小となり、冷媒容量的にも小さい値となる。厳密な意味では  $\alpha=580$  がインベントリーが最小となる最適値ではないが、今回は今後の設計指針を与えるのが目的であるため  $\alpha$  値の最適化はおこなわず、 $\alpha=580$  をもって以降の議論を進めることとする。

Columnに水素同位体をガスの状態でフィードするかあるいは液の状態でフィードするかによる違いによって塔設計に与える影響についての考察を試みた。上記計算では Figure3 に示すとおり Column1 の塔底から Column4 へのフィード流及び Column4 の塔頂から Column1 への循環流はガス状態のフィードを想定している。これらが液でフィードされとした場合の設計結果を Table6 に示す。Table6 からわかるようにフィードの形態は冷媒容量に若干の影響を与える（但し、本設計では冷媒容量はコンデンサー負荷のみを考慮しており、流体をフィード時に液化することを考慮するとほぼ同一といえる）がトリチウムインベントリーにはほとんど影響を与えない。

#### 4.2 トリチウムインベントリーに影響を与える因子

Table7 に Calc. 1 の Case1~Case3 に対応する結果を示す。Case1~Case3 からプラズマ排ガスの組成はトリチウムインベントリーと冷凍容量に影響を与えることが明らかとなった。一方、ペレット向けのトリチウムの製品流の流量については今後議論の余地があると考えられる。プラズマに入射されるトリチウム濃度が変動する現在の設計条件では常に一定量のペレット流量が入射されるわけではないと考えられるのに対して、現設計ではいくらプラズマ排ガス中のトリチウム濃度が変動しても常に一定量のペレット向けトリチウム濃縮流を ISS で作り出すことが求められている。両者の考えには矛盾があり、ペレット向けのトリチウムの製品流の流量に最適化の余地があると考えられる。具体的にはプラズマ排ガス中のトリチウム濃度に連動させてペレット向けのトリチウム流量を変更することがトリチウムインベントリー低減に有効な手段の一つと考えられる。ISS で製造されたペレット向けのトリチウム濃縮流は水素吸蔵ベットの保管され、実験時に必要量がベットから取り出されることとなっている。プラズマ排ガス中のトリチウム濃度が低い運転（言い換えれば、入射ペレットの量が少ない）の場合はペレット向けのトリチウムの製品流の流量を少なく、高い運転（言い換えれば、入射ペレットの量が多い）の場合はペレット向けのトリチウムの製品流の流量を多くすることが合理的である。よって、プラズマ排ガス中のトリチウム濃度が低い運転時にはペレット向けトリチウム濃縮流を ISS で作り出すことをやめればトリチウムインベントリーを低減させることができる。Table7 のプラズマ排ガス中のトリチウム濃度が低い Case3 の条件で T 濃縮流の流量を 80mol/h から 40mol/h に減らした Case4 を示す。Case4 を Case3 と比較した場合、流量を半減させたことによりトリチウムインベントリーは 53.2%に冷凍容量は 67.8%に減少した。ペレット向けのトリチウムの製品流の流量を運転条件に合わせることによりトリチウムインベントリーと冷凍容量をさらに削減できる可能性があることが明らかとなった。

#### 4.3 水処理システムからの流れが ISS 塔設計に与える影響

CECE から ISS へ供給される流量の大きさは CECE の Electrolysis Cell 内のトリチウム濃度に大きな影響を与える<sup>7)</sup>。CECE から ISS へ供給される流量が大きいほど Cell 内のトリチウム濃度を低減させることができる。よって今後の CECE 設計の進展により CECE から ISS へ供給される流量の変更が要求された場合に ISS 設計に受ける影響を評価した。Table8 に現在の 20mol/h から 160mol/h まで流量が変更になった場合の結果を示す。Table8 から CECE から ISS へ供給される流量が増えることにより塔径、インベントリー、冷凍容量が受けるの影響は非常に小さいとの見通しを得た。このことから CECE からの流量の変更による ISS の設計の大幅変更の可能性はないといえる。

#### 4.4 流量の微小変動が製品流組成に与える影響

ISS の概念設計は現在まで基本的に定常計算に基づいて行われてきた。しかし現実には ISS 運転時には運転パラメーターが常に一定に保てることはなく、ある範囲で変動することが予想される。パラメーターの微小変動が製品流の組成に大きな影響を与える場合は、これを考慮した設計を行う必要がある。本項では流量の微小変動に着目し、組成に与える影響を考察した。特に微小組成がキー組成である場合、その組成は流量の微小変動に強く影響を受けると予想される。本設計条件に照らし合わせた結果、系外に放出する H 濃縮中の HT 濃度 ( $1.8 \times 10^{-5}\%$ 以下) がこの条件に該当する。Column2 の塔頂流量の微小変動が HT 濃度に与える影響を水処理系からの流量が 160mol/h のケースである Case6 (Table8 参照) を基として検討を行った。その結果を Figure 4 に示す。Case6 を対象としたのは 160mol/h という流量は Electrolysis Cell 内のトリチウム濃度を考慮した場合最も妥当な値と推察される。

塔頂の HT 濃度は若干の流量バランスの乱れに大きく影響を受ける。Figure5 に Column2 の還流比と塔頂 HT 濃度の関係を示す。Figure5 の矢印は仮に微小な流量の増加により HT 濃度が  $2.4 \times 10^{-5}\%$  になった場合、還流比制御により  $1.8 \times 10^{-5}\%$  以下にするためには還流比を大きくして塔内蒸気流量をかなりの量増やさないと達成できないことを示している。HT 濃度を還流比制御する場合はあらかじめ流量の変動範囲から最大塔内蒸気量を予測したのちそれを考慮した設計を行う必要がある。

具体的な方法としては一例として、流量の変動による HT 濃度の変動を考慮してあらかじめ Column2 を今の HT 制限濃度以下のより厳しい条件で設計する方法が考えられる。想定される最大の流量変動 (本検討では設定値  $\pm 1\%$  の変動を想定) においても HT 濃度が制限濃度を下回るようにする。この思想で Column2 を計算し直した結果を Table9 の Calc.9 に示す。HT 制限濃度以下のより厳しい条件 ( $1.8 \times 10^{-5}\% \rightarrow 9.0 \times 10^{-6}\%$ ) で設計した結果、Column2 は塔径が大きくなり水素同位体インベントリーと冷媒容量の値が増加する。Figure6 に本ケースの場合の Column2 の還流比と塔頂 HT 濃度の関係を破線で示す。想定される流量の変動に対して HT 濃度を制限値以下に保てる見通しを得た。

上記検討により流量の変動による HT 濃度の変動を考慮して、想定される最大の流量変動にお

いても HT 濃度が制限濃度を下回る設計を行うことは可能である。しかし H 濃縮を Column2 単塔で行う設計思想では、万一流量が大きく変動した場合は H 濃縮流中の HT 濃度が制限値を上回る。よって更なる HT 濃度の精密な制御が必要な場合は Figure 7 に示すように H 濃縮を 2 塔 (Column2-1、Column2-2) で行う必要がある。この思想により再設計をした結果を Table9 の Calc.10 に示す。塔 2 本で H 濃縮を行う場合は Column2-2 塔頂からの H 濃縮流中の HT 濃度は制限値以下の遙かに小さな値 ( $6.4 \times 10^{-7}\%$ ) することができる。このため Column2-1 の流量変動による HT 濃度の変化は Column2-2 で容易に対処できる。また Column2-2 の流量変動はもともと塔頂の HT 濃度が低いため制限値を上回る可能性がない。よって HT 濃度の制御を考えた場合は塔 2 本で H 濃縮を行うのが最適である。また本ケースは水素同位体インベントリーと冷媒容量の観点からも、ともに小さくなるため有利である。

#### 4.5 平衡器

ISS の設計ではトリチウムの塔内インベントリーを最小にすることが求められている。インベントリーを最小にする上で平衡器は大きな役割を果たす。平衡器は蒸留塔から平衡器に抜き出された流体を式 (3.1) に示す平衡状態にして再び戻すことにより塔内の組成を目的成分に有利な状態にするものである。Figure 8 に T 濃縮塔である Column4 に設置した平衡器への蒸留塔からの抜き出し流量が塔頂・塔底の組成に与える影響の一例を示す。この例では、抜き出し流量の増加と共に塔底の DT 濃度が減少し、T<sub>2</sub> 濃度が増加するため T 濃縮率が増加する。平衡器を用いることで塔長を抑えながら、目的製品条件 (Column4 では T 濃縮率) を満たす設計を行うことができる。一般に各塔に平衡器を配し、その位置、流量を設計条件と照らして決定することによりより平衡器を持たない場合よりコンパクトに塔を設計することができる。なお、抜き出し段、戻し段の選定に関してはフィードの組成が変化する場合に対応させるために Case1~3 を考慮してトライアル&エラーで選定した。計算上では FDR-ISS のように平衡器の個数、流量を増やすことはインベントリーの低減等に大変有効であるが、平衡器及び抜き出し・戻しポンプなどのユーティリティがコストに与える影響や、抜き出し流及び戻し流が蒸留性能に与える影響などを考慮して個数、流量を決定する必要がある。

#### 4.6 ITER-FDR との比較

Table7 の Case1~Case3 のトリチウムインベントリーを ITER-FDR で報告されている推算法に基づき計算し直したものを Table10 に示す。

ITER-FDR で報告されているトリチウムインベントリー計算条件を以下に示す。

塔 1 : 蒸気速度 15cm/s、液ホールドアップ 12%、HETP 5cm

塔 2 : 蒸気速度 15cm/s、液ホールドアップ 12%、HETP 5cm

塔 3 : 蒸気速度 15cm/s、液ホールドアップ 12%、HETP 5cm

塔 4 上部 : 蒸気速度 12cm/s、液ホールドアップ 10%、HETP 5cm

塔 4 下部 : 蒸気速度 15cm/s、液ホールドアップ 7%、HETP 2.5cm

リボイラーホールドアップは充填部ホールドアップの 2.5%とした。

トリチウムインベントリー計算条件が本検討と異なる点については今後検討を要する課題である。

ITER-FDR 条件で計算した場合、トリチウムインベントリーは大幅に小さくなる。ITER-FDR では T 濃縮塔内のインベントリーを抑えるため塔内蒸気流量の上部と下部の違いから塔径を途中で変更する設計が採用されている。また T 濃縮塔下部はパッキングを変更して HETP を小さくすることができるとしている。この設計思想の違いから T 濃縮塔内のトリチウムインベントリーは我々の推算によるものと比べ大幅に小さくなっている。

本研究で提案しているカスケードの結果を ITER-FDR で報告されているトリチウムインベントリー計算条件に当てはめて再計算を行った。その結果を ITER-FDR で提案しているカスケードのものと比較すると冷媒容量では ITER-FDR の 44%に、トリチウムインベントリーはプラズマ排ガスの組成により値が変動するがそれぞれのカスケードにおける最大値と比較すると ITER-FDR の 117%となった。冷媒容量は水処理系からのガスを大幅に減らせる見通しに加え、FDR カスケードがもつ大きな D 循環流を我々のカスケードでは省くことができたことでトータルで大幅に削減できる見通しを得た。トリチウムインベントリーについては本計算のほうが FDR と比較して若干大きくなった。この結果はトリチウムインベントリーの削減に大きな効果を持つ平衡器の個数とその抜き出し流量を、我々のカスケードでは設計思想に基づき減らしたことに起因している。よってこの結果は妥当なものでありトリチウムインベントリーの観点に関しては、ここで本研究で提案したカスケードは FDR と優劣はないといえる。水素同位体インベントリーの比較では ITER-FDR の 38%となった。よって水素貯蔵系に与える負荷も非常に小さくなる見通しを得た。

#### 4.7 段階的建設への対応

本カスケードは ITER の ISS として実験の進展と共に段階的に拡張していくいわゆる段階的建設に対応できる塔構成となっている。具体的には ITER での実験のスケジュールに合わせた下記のような段階的製作を想定している。

##### 1) D-D 運転で H 除去のみに供させることを想定する期間 (Phase 1)

D-D 運転時に不要成分である H の除去のみを行うためにはカスケードのうち、Column1 のみで対応できる。よってこの期間開始までに Column1 を建設する。フィード条件は流量 320mol/h で H5%、 $T3.91 \times 10^{-3}\%$ 、残り D である。塔頂は H 排出時の HT 濃度制限の  $1.8 \times 10^{-5}\%$  以下にし、塔底は  $H < 0.5\%$ 、 $T < 0.02\%$  の高純度 D 流れにする。なおフィード段、抜き出し段は一度建設すれば全期間において変更できないため Figure3 に示すもので共通である。

Column1：還流比 45.0、平衡器流量 100mol/h、

塔頂 流量 25mol/h HT= $1.79 \times 10^{-7}$ 、

塔底 流量 295mol/h H=0.18%、T=0.0043%

塔内蒸気最大流量 1250mol/h

以上の条件で製品流の要求を満たすことを確認した。

2) D-T 運転で燃料注入システムへの高純度トリチウムが求められておらず、また水処理系が稼働前と想定する期間 (Phase 2)

ペレットに送る T 流れがまだ不要である場合、Column1、Column2、Column3 の 3 塔で運転を行う。よってこの期間開始までに Column2 と Column3 を建設する。水処理系からのフィードがなく Column1 塔底からは D/T=50/50 の流れが、Column2 塔頂からは HT 濃度制限の  $1.8 \times 10^{-5}$  % 以下にした H 濃縮流、Column3 塔底は  $H < 0.5\%$ 、 $T < 0.02\%$  の高純度 D 流れにする。

最もトリチウム濃縮上、条件の厳しい Case3 についてカスケードの成立を確認する。

Column1：還流比 8.0、平衡器流量 400mol/h、

塔頂 流量 165mol/h

塔底 流量 155mol/h  $H=0.03\%$ 、 $D=52.3\%$ 、 $T=47.7\%$

塔内蒸気最大流量 1885mol/h

Column2：還流比 40.0、平衡器流量 200mol/h、

塔頂 流量 25mol/h  $HT=2.14 \times 10^{-8}$ 、

塔底 流量 180mol/h

塔内蒸気最大流量 1225mol/h

Column3：還流比 7.3、平衡器流量 400mol/h、

塔頂 流量 40mol/h  $H=0.30\%$ 、 $T=0.013\%$

塔底 流量 140mol/h  $D=98.1\%$

塔内蒸気最大流量 732mol/h

以上の条件で製品流の要求を満たすことを確認した。

3) D-T 運転で燃料注入システムへの高純度トリチウムは求められるが、まだ水処理系が稼働前と想定する期間 (Phase 3)

4 塔のフルカスケード運転で対応する。ただし水処理系からのガスがなくてもカスケードが問題なく運転できることを確認する必要がある。最もトリチウム濃縮上、条件の厳しい Case3 についてカスケードの成立を確認する。

Column1：還流比 8.0、平衡器流量 400mol/h、

塔頂 流量 240mol/h

塔底 流量 580mol/h

塔内蒸気最大流量 2560mol/h

Column2：還流比 27.0、平衡器流量 200mol/h、

塔頂 流量 27.5mol/h  $HT=2.14 \times 10^{-8}$ 、

塔底 流量 252.5mol/h

塔内蒸気最大流量 1170mol/h

Column3：還流比 7.3、平衡器流量 450mol/h、

塔頂 流量 100mol/h  $H=0.24\%$ 、 $T=0.018\%$

塔底 流量 152.5mol/h D=97.4%

塔内蒸気最大流量 1280mol/h

Column4：還流比 3.91、平衡器流量 800mol/h、

塔頂 流量 500mol/h

塔底 流量 80mol/h D=90.0%

塔内蒸気最大流量 1875mol/h

以上の条件で製品流の要求を満たすことを確認した。

4) D-T 運転で全てのフィードの処理が求められると想定する期間 (Phase 4)

Table7 の Case1~Case3 に対応している。

このように ITER の ISS として実験の進展と共に段階的に拡張していくことが本カスケードでは可能である。

## 5. 結論

ITER 燃料サイクルの水素同位体分離システム (ISS) の中核である深冷蒸留塔に関し、水処理システムからの水素流量を大幅に減少できるという見通しに基づきその設計の見直しを行った。主な結果は以下の通りである。

- 段階的建設を考慮した新たなカスケード構成を提案した。
- ISS カスケード設計に関する詳細なパラメータサーベイをおこない各パラメータの最適化の指針を明らかとした。
- 本研究で提案したカスケードは ITER 最終設計報告書の ISS (FDR-ISS) で提案されているカスケードと比較して最大冷媒容量は 44% にできる見通しを得た。これは FDR-ISS で提案されているカスケードの重水素の循環流れを省くことができたことと水処理システムからのガスが大きく減少したことに基づく。
- トリチウムインベントリーは FDR-ISS で提案されているカスケードと同等に、水素同位体インベントリーは FDR-ISS の 42% となる見通しを得た。
- システムのトリチウムインベントリー及び冷媒容量に大きな影響をもつのはプラズマ排ガス中のトリチウム濃度とトリチウム濃縮流の流量であることを明らかとした。プラズマ排ガス中のトリチウム濃度が低い運転の場合はペレットに必要なトリチウム流量を小さくすることがトリチウムインベントリーの低減には有効であることを明らかとした。
- 今後設計が進展すると共に変更が予想される水処理システムからの流量の増減が本設計に大きな変更を与えない見通しを得た。
- 現状の ISS カスケードでは軽水素 (H) 濃縮流中の HT 濃度が微小な流量変動により大きく変わることを示し、H 濃縮塔を 2 塔構成にすることによってその問題を解決できることを明らかとした。

## 参考文献

1. ITER Final Design Report, IAEA (1998)
2. 山西敏彦:博士論文, 京都大学大学院工学研究科 (化学工学), Kyoto, Japan (1992)
3. 木下正弘、松田祐二、成瀬雄二 : Private Communication.
4. P.C.Souers:“ Hydrogen Properties for Fusion Energy ”, Barkley, Uni. of California Press , 61 (1986)
5. 木下正弘、成瀬雄二 : Private Communication.
6. 岩井保則、山西敏彦、奥野健二: 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)
7. Iwai Y., Yoshida H., Yamanishi T., Senrui S., Nishi M.: Submitted to Fusion Eng. and Des. (1999)



## 記号表

$F_j$	j 段に供給されるフィード流の流量 [mol/h]
$H_j$	j 段を去る蒸気流のモルエンタルピー [cal/mol]
$h_j$	j 段を去る液流のモルエンタルピー [cal/mol]
$H_{Fj}$	j 段に供給されるフィード流のモルエンタルピー [cal/mol]
$H_{Lj}$	j 段の液ホールドアップ [mol]
$K_{i,j}$	j 段における i 成分の蒸気-液平衡比
$L_j$	j 段を去る液流れの流量 [mol/h]
$N$	総理論段数 [-]
$N_F$	フィード段数 [-]
$Q_j$	j 段の除熱速度 [cal/h]
$q$	j 段の加熱速度 [cal/h]
$T_j$	j 段の絶対温度 [K]
$U_j$	j 段から去る液サイドストリームの流量 [mol/h]
$V_j$	j 段を去る液流れの流量 [mol/h]
$W_j$	j 段から去る蒸気サイドストリームの流量 [mol/h]
$x_{i,j}$	j 段から去る液流れの i 成分のモル分率 [-]
$y_{i,j}$	j 段から去る蒸気流れの i 成分のモル分率 [-]
$z_{Fi,j}$	j 段に供給されるフィード流れの i 成分のモル分率 [-]
$\lambda$	トリチウム崩壊熱 ( $\sim 280$ ) [cal /h g]

## (Subscript)

- 1: H2
- 2: HD
- 3: HT
- 4: D2
- 5: DT
- 6: T2

Table 1 ISSで処理する各ガスの流量と組成

	Flow Rate	H <sub>2</sub>	HD	HT	D <sub>2</sub>	DT	T <sub>2</sub>
	[mol/h]						
プラズマ排ガス (H/D/T=5/47.5/47.5)	320	3.3172E-3	4.9444E-2	4.3921E-2	2.2723E-1	4.4610E-1	2.2999E-1
プラズマ排ガス (H/D/T=5/57/38)	320	3.2489E-3	5.8627E-2	3.4875E-2	3.2623E-1	4.2892E-1	1.4810E-1
プラズマ排ガス (H/D/T=5/71.25/23.75)	320	3.0921E-3	7.1432E-2	2.1394E-2	5.0877E-1	3.3677E-1	5.8541E-2
水処理系	20	9.9831E-1	1.6768E-3	8.1837E-6	8.6838E-7	9.3667E-9	2.6532E-11
NBI	40	3.0818E-5	9.8479E-3	9.0471E-5	9.7023E-1	1.9700E-2	1.0504E-4

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 <sup>3</sup> )	b (mol /m <sup>3</sup> K <sup>2</sup> )	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 飽和蒸気と液のエンタルピー

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

Isotope	$u''$ ( J/mol K )	$v''$ ( J/mol K <sup>2</sup> )	$w''$ ( J/mol K <sup>3</sup> )
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

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

Isotope	$u'$ ( J/mol K )	$v'$ ( J/mol K <sup>2</sup> )	$w'$ ( J/mol K <sup>3</sup> )
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)

Table 4 プラズマ排ガスの組成変動に対応させた設計

		Calc. 1		Calc. 2		Calc. 3	
		Case1	Case3	Case1	Case3	Case1	Case3
Column 1 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 13 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	11.68	11.68	14.62	14.62	10.22	10.22
	N [-]	55	55	55	55	55	55
	R [-]	5.00	8.00	5.00	14.00	5.00	5.55
	EQ [mol/h]	400	400	400	400	400	400
	T [g]	168.90	126.60	317.80	292.10	140.40	84.30
	L [mol]	123.0	124.0	192.7	194.3	93.8	94.5
	H [W]	97.4	645.4	98.3	1130.6	97.4	448.0
Column 2 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 12%	D [cm]	8.71	8.71	8.42	8.42	8.53	8.53
	N [-]	100	100	100	100	100	100
	R [-]	14.00	15.00	14.00	13.40	14.00	14.00
	EQ [mol/h]	200	400	200	400	200	400
	T [g]	11.60	5.71	5.92	4.92	6.65	5.37
	L [mol]	140.2	142.9	131.5	133.6	135.0	137.1
	H [W]	104.9	186.4	118.2	166.5	118.3	173.9
Column 3 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	9.38	9.38	9.30	9.30	9.30	9.30
	N [-]	80	80	80	80	80	80
	R [-]	7.90	7.30	6.30	7.60	6.60	7.60
	EQ [mol/h]	600	450	400	400	400	400
	T [g]	10.15	3.71	6.32	3.63	5.74	3.74
	L [mol]	116.0	116.0	114.1	114.1	114.1	114.1
	H [W]	107.1	247.3	85.4	257.5	89.5	257.5
Column 4 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 15cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	10.78	10.78	10.57	10.57	16.18	16.18
	N [-]	30	30	30	30	30	30
	R [-]	2.90	3.91	2.90	2.90	1.40	8.50
	EQ [mol/h]	300	800	400	400	400	800
	T [g]	227.80	215.60	189.86	176.30	402.40	362.00
	L [mol]	58.1	58.1	55.9	56.0	131.0	130.2
	H [W]	519.4	697.8	517.39	523.2	250.7	1477.3
総トリウムインベントリー	[g]	418.45	351.62	519.90	476.95	555.19	455.41
総水素同位体インベントリー	[mol]	437.3	441.0	494.2	498.0	473.9	475.9
総冷媒容量	[W]	828.8	1776.9	819.29	2077.8	555.87	2356.7

Case1: プラズマ排ガス中のH/D/T比: 5/47.5/47.5.

Case3: プラズマ排ガス中のH/D/T比: 5/71.25/23.75.

D: 塔内径, N: 総理論段数, R: 還流比, EQ: 平衡気流量, T: トリウムインベントリー, L: 水素同位体インベントリー, H: 冷媒容量

Table 5 Column1とColumn4間の循環流の影響

		Calc. 4	Calc. 1	Calc. 5	Calc. 6
		Case3	Case3	Case3	Case3
	$\alpha$	840	580	320	240
Column 1 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 13 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	11.68	11.68	11.68	11.68
	N [-]	55	55	55	55
	R [-]	8.0	8.00	8.00	8.00
	EQ [mol/h]	400	400	400	400
	T [g]	131.00	126.60	130.20	131.90
	L [mol]	124	124.0	124.0	124.0
	H [W]	645.5	645.4	645.5	645.5
Column 2 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 12%	D [cm]	8.71	8.71	8.71	8.71
	N [-]	100	100	100	100
	R [-]	15.00	15.00	15.00	15.00
	EQ [mol/h]	400	400	400	400
	T [g]	5.91	5.71	5.82	5.87
	L [mol]	142.9	142.9	142.9	142.9
	H [W]	186.4	186.4	186.4	186.4
Column 3 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	9.38	9.38	9.38	9.38
	N [-]	80	80	80	80
	R [-]	7.30	7.30	7.30	7.30
	EQ [mol/h]	450	450	450	450
	T [g]	3.86	3.71	3.80	3.83
	L [mol]	116.0	116.0	116.0	116.0
	H [W]	247.3	247.3	247.3	247.3
Column 4 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 15cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	11.11	10.78	11.13	12.30
	N [-]	30	30	30	30
	R [-]	2.42	3.91	9.90	19.00
	EQ [mol/h]	800	800	800	800
	T [g]	232.40	215.60	218.10	256.10
	L [mol]	61.8	58.1	61.7	75.4
	H [W]	658.5	697.8	841.6	1067.7
総トリウムインベントリ	[g]	373.166	351.62	357.921	397.693
総水素同位体インベントリ	[mol]	444.7	441.0	444.6	458.3
総冷媒容量	[W]	1737.7	1776.9	1920.8	2146.9

Case3: プラズマ排ガス中のH/D/T比: 5/71.25/23.75.

D: 塔内径, N: 総理論段数, R: 還流比, EQ: 平衡気流量, T: トリウムインベントリ, L: 水素同位体インベントリ, H: 冷媒容量

Table 6 フィード形態の違い

		Calc. 1	Calc. 7
		Case3	Case3
Column 1 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 13 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	11.68	11.68
	N [-]	55	55
	R [-]	8.00	8.00
	EQ [mol/h]	400	400
	T [g]	126.60	126.51
	L [mol]	124.0	124.0
	H [W]	645.4	645.4
Column 2 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 12%	D [cm]	8.71	8.71
	N [-]	100	100
	R [-]	15.00	15.00
	EQ [mol/h]	400	400
	T [g]	5.71	5.71
	L [mol]	142.9	142.9
	H [W]	186.4	186.4
Column 3 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	9.38	9.38
	N [-]	80	80
	R [-]	7.30	7.30
	EQ [mol/h]	450	400
	T [g]	3.71	3.71
	L [mol]	116.0	116
	H [W]	247.3	247.3
Column 4 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 15cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	10.78	10.78
	N [-]	30	30
	R [-]	3.91	2.30
	EQ [mol/h]	800	800
	T [g]	215.60	211.20
	L [mol]	58.1	58.1
	H [W]	697.8	410.6
総トリチウムインベントリー	[g]	351.62	347.12
総水素同位体インベントリー	[mol]	441.0	441.0
総冷媒容量	[W]	1776.9	1489.7

Case3: プラズマ排ガス中のH/D/T比: 5/71.25/23.75.

D: 塔内径, N: 総理論段数, R: 還流比, EQ: 平衡気流量, T: トリチウムインベントリー,

L: 水素同位体インベントリー, H: 冷媒容量

Table7 インベントリーに影響を与える因子

		Calc.1	Calc.1	Calc.1	Calc.1
		Case1	Case2	Case3	Case4
Column 1 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 13 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	11.68	11.68	11.68	10.78
	N [-]	55	55	55	55
	R [-]	5.00	6.50	8.00	8.00
	EQ [mol/h]	400	400	400	400
	T [g]	168.90	150.10	126.60	108.50
	L [mol]	123.0	123.5	124.0	124.0
	H [W]	97.4	281.7	645.4	531.2
Column 2 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 12%	D [cm]	8.71	8.71	8.71	8.20
	N [-]	100	100	100	100
	R [-]	14.00	14.50	15.00	15.00
	EQ [mol/h]	200	300	400	400
	T [g]	11.60	7.94	5.71	4.44
	L [mol]	140.2	141.8	142.9	140.2
	H [W]	104.9	145.1	186.4	144.9
Column 3 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	9.38	9.38	9.38	9.08
	N [-]	80	80	80	80
	R [-]	7.90	7.60	7.30	7.90
	EQ [mol/h]	600	500	450	450
	T [g]	10.15	6.41	3.71	3.55
	L [mol]	116.0	116.0	116.0	108.7
	H [W]	107.1	203.4	247.3	240.8
Column 4 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 15cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	D [cm]	10.78	10.78	10.78	6.01
	N [-]	30	30	30	30
	R [-]	2.90	3.40	3.91	1.60
	EQ [mol/h]	300	550	800	400
	T [g]	227.80	221.50	215.60	70.60
	L [mol]	58.1	58.1	58.1	18.1
	H [W]	519.4	607	697.8	287.9
総トリチウムインベントリー	[g]	418.45	385.95	351.617	187.09
総水素同位体インベントリー	[mol]	437.3	439.4	441.0	391.0
総冷媒容量	[W]	828.8	1237.2	1776.9	1204.8

Case1: プラズマ排ガス中のH/D/T比: 5/47.5/47.5.

Case2: プラズマ排ガス中のH/D/T比: 5/57/38.

Case3: プラズマ排ガス中のH/D/T比: 5/71.25/23.75.

Case4: T濃縮流を 80 mol/h から 40 mol/hに削減、プラズマ排ガス中のH/D/T比: 5/71.25/23.75.

D: 塔内径, N: 総理論段数, R: 還流比, EQ: 平衡気流量, T: トリチウムインベントリー, L: 水素同位体インベントリー, H: 冷媒容量



Table8 水処理塔からの流量がISSの設計に与える影響

		Calc.1	Calc.8	Calc.8	Calc.8
		Case3	Case3	Case5	Case6
Column 1 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 13 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	Di [cm]	11.68	11.68	11.68	11.68
	N [-]	55	55	55	55
	R [-]	8.00	8.00	8.00	8.00
	EQ [mol/h]	400	400	400	400
	T [g]	126.60	126.60	126.60	126.60
	L [mol]	124.0	124.0	124.0	124.0
	H [W]	645.4	645.4	645.4	645.4
Column 2 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 12%	St [mol/h]	20	20	80	160
	Di [cm]	8.71	9.19	9.06	8.92
	N [-]	100	100	100	100
	R [-]	15.00	22.00	7.50	3.50
	EQ [mol/h]	400	400	400	400
	T [g]	5.71	5.33	5.30	5.41
	L [mol]	142.9	157.3	152.3	147.6
H [W]	186.4	208.3	181.2	150.7	
Column 3 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	Di [cm]	9.38	9.58	9.38	9.34
	N [-]	80	80	80	80
	R [-]	7.30	7.85	7.30	7.20
	EQ [mol/h]	450	450	450	450
	T [g]	3.71	3.89	3.71	3.66
	L [mol]	116.0	121.0	116.0	115.0
	H [W]	247.3	265.9	247.3	243.9
Column 4 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 15cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	Di [cm]	10.78	10.78	10.78	10.78
	N [-]	30	30	30	30
	R [-]	3.91	3.91	3.91	3.91
	EQ [mol/h]	800	800	800	800
	T [g]	215.60	215.60	215.60	215.60
	L [mol]	58.1	58.1	58.1	58.1
	H [W]	697.8	697.8	697.8	697.8
総トリチウムインベントリ	[g]	351.62	351.42	351.21	351.27
総水素同位体インベントリ	[mol]	441.0	460.4	450.4	444.7
総冷媒容量	[W]	1776.9	1817.4	1771.7	1737.8

Case3,5,6: プラズマ排ガス中のH/D/T比: 5/71.25/23.75.

St: CECEからの流量, D: 塔内径, N: 総理論段数, R: 還流比, EQ: 平衡気流量, T: トリチウムインベントリ,  
L: 水素同位体インベントリ, H: 冷媒容量

注: Calc.1のCase3においてCECEからくる流れ中のDとT分率: D,8.4E-4: T4.1E-6

注: Calc.8のCase3においてCECEからくる流れ中のDとT分率: D,4.17E-3: T4.17E-5

注: Calc.8のCase5においてCECEからくる流れ中のDとT分率: D,1.04E-3: T1.04E-5

注: Calc.8のCase6においてCECEからくる流れ中のDとT分率: D,5.21E-4: T5.21E-6

Table 9 H濃縮流中のHT濃度制御を考慮した設計検討

		Calc.8	Calc.9	Calc.10
		Case6	Case6	Case6
Column 1 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 13 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	Di [cm]	11.68	11.68	11.68
	N [-]	55	55	55
	R [-]	8.00	8.00	8.00
	EQ [mol/h]	400	400	400
	T [g]	126.60	126.60	126.60
	L [mol]	124.0	124.0	124.0
	H [W]	645.4	645.4	645.4
Column 2-1 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 12%	St [mol/h]	160	160	160
	Di [cm]	8.92	10.23	7.97
	N [-]	100	100	100
	R [-]	3.50	5.60	2.00
	EQ [mol/h]	400	400	400
	T [g]	5.41	6.14	5.12
	L [mol]	147.6	194.2	117.9
H [W]	150.7	241.0	90.7	
Column 2-2 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 12%	Di [cm]			5.25
	N [-]			15
	R [-]			1.5
	EQ [mol/h]			0
	T [g]			0.00
	L [mol]			13.93
	H [W]			61.2
Column 3 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 10 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	Di [cm]	9.34	9.34	9.88
	N [-]	80	80	80
	R [-]	7.20	7.2	8.20
	EQ [mol/h]	450	450	500
	T [g]	3.66	3.33	4.29
	L [mol]	115.0	115.0	128.7
	H [W]	243.9	244.0	277.7
Column 4 HETP: 5 cm 塔内蒸気速度: 15 cm/s 液ホールドアップ分率 : 10%	Di [cm]	10.78	10.78	10.78
	N [-]	30	30	30
	R [-]	3.91	3.91	3.91
	EQ [mol/h]	800	800	800
	T [g]	215.60	215.60	215.60
	L [mol]	58.1	58.1	58.1
	H [W]	697.8	697.8	697.8
総トリチウムインベントリ	[g]	351.27	351.67	351.61
総水素同位体インベントリ	[mol]	444.7	491.3	442.7
総冷媒容量	[W]	1737.8	1828.2	1772.8

Case6: プラズマ排ガス中のH/D/T比: 5/71.25/23.75.

St: CECEからの流量, D: 塔内径, N: 総理論段数, R: 還流比, EQ: 平衡気流量, T: トリチウムインベントリ,  
L: 水素同位体インベントリ, H: 冷媒容量

Table 10 ITER-FDRとの比較

		トリウムインベントリ			平衡器の数 [-]	平衡器流量 [mol/h]	水素同位体 インベントリ [mol]	冷媒容量 [w]
		Case1** [g]	Case2** [g]	Case3** [g]				
FDR	CD 10***	3.6	5.6	4.7	1	600	535	1200
本検討	Column2	7.7 <sup>*</sup>	5.3 <sup>*</sup>	3.8 <sup>*</sup>	1	400	143	190
FDR	CD 20, 30	4.5	13.5	20.1	3	350,800,430	380	1700
本検討	Column 3	8.7 <sup>*</sup>	4.7 <sup>*</sup>	2.7 <sup>*</sup>	1	600	107	250
FDR	CD 50	161.0	175.0	198.0	5	300,800,800	111	1000
本検討	Column1,4	244.5 <sup>*</sup>	222.4 <sup>*</sup>	196.3 <sup>*</sup>	2	600,100 800,400	143	1350
FDR	Total	169.0	194.0	223.0	10	5430	1026	3900
本検討	Total	260.9	232.4	202.8	4	2200	393	1790

\*ITER-FDRで報告されているトリウムインベントリ計算条件に当てはめて再計算を行った。

\*\*Case1-3はTable7のCase1-3に対応する。

\*\*\*CD10,20,30,50はFDR-ISSで使用されている塔の呼び方を使用した。例として本検討のColumn2とFDR-ISSのCD10は各カスケードにおいて同様の役割を担っている。

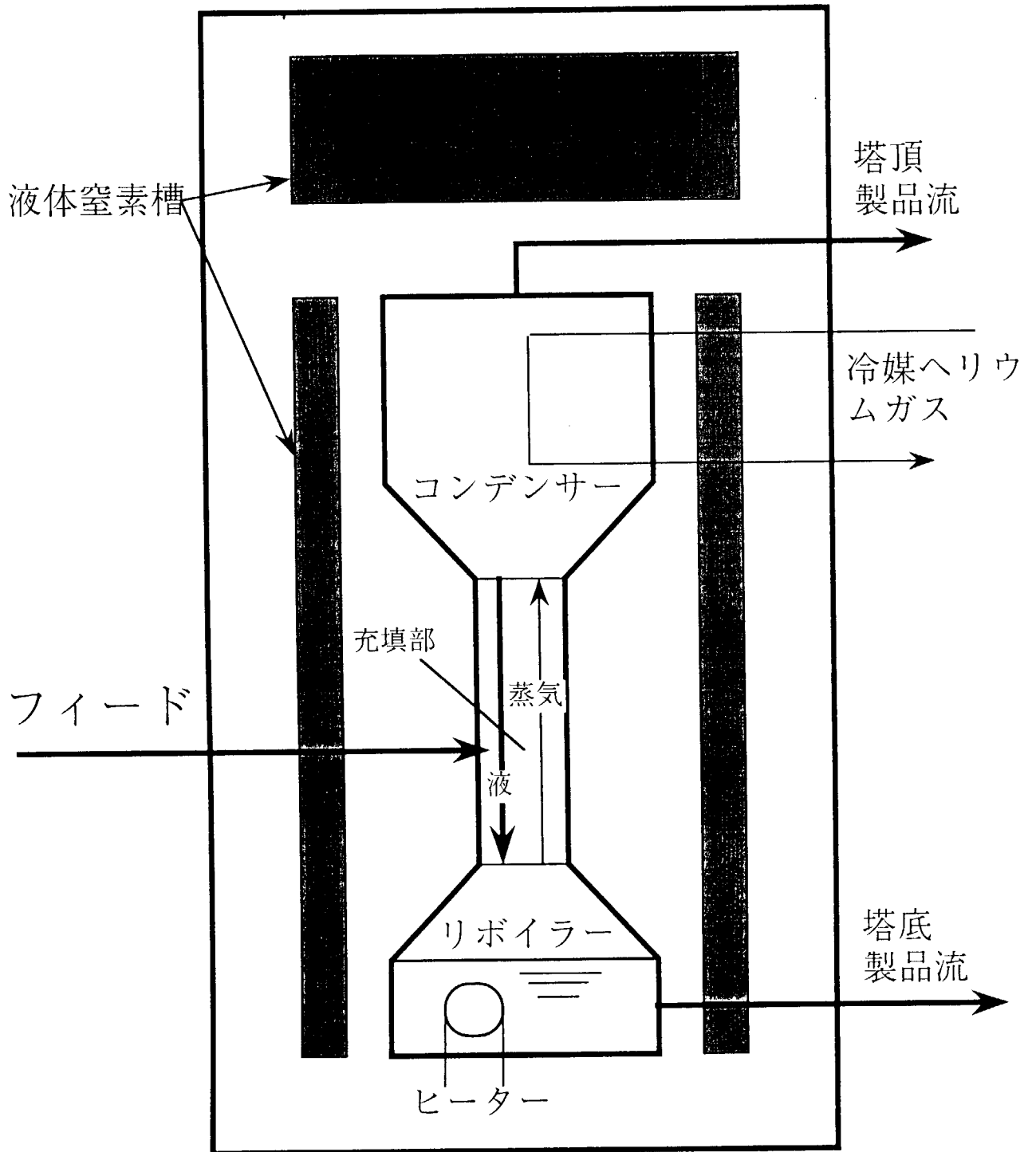


Figure 1 深冷蒸留塔概略図

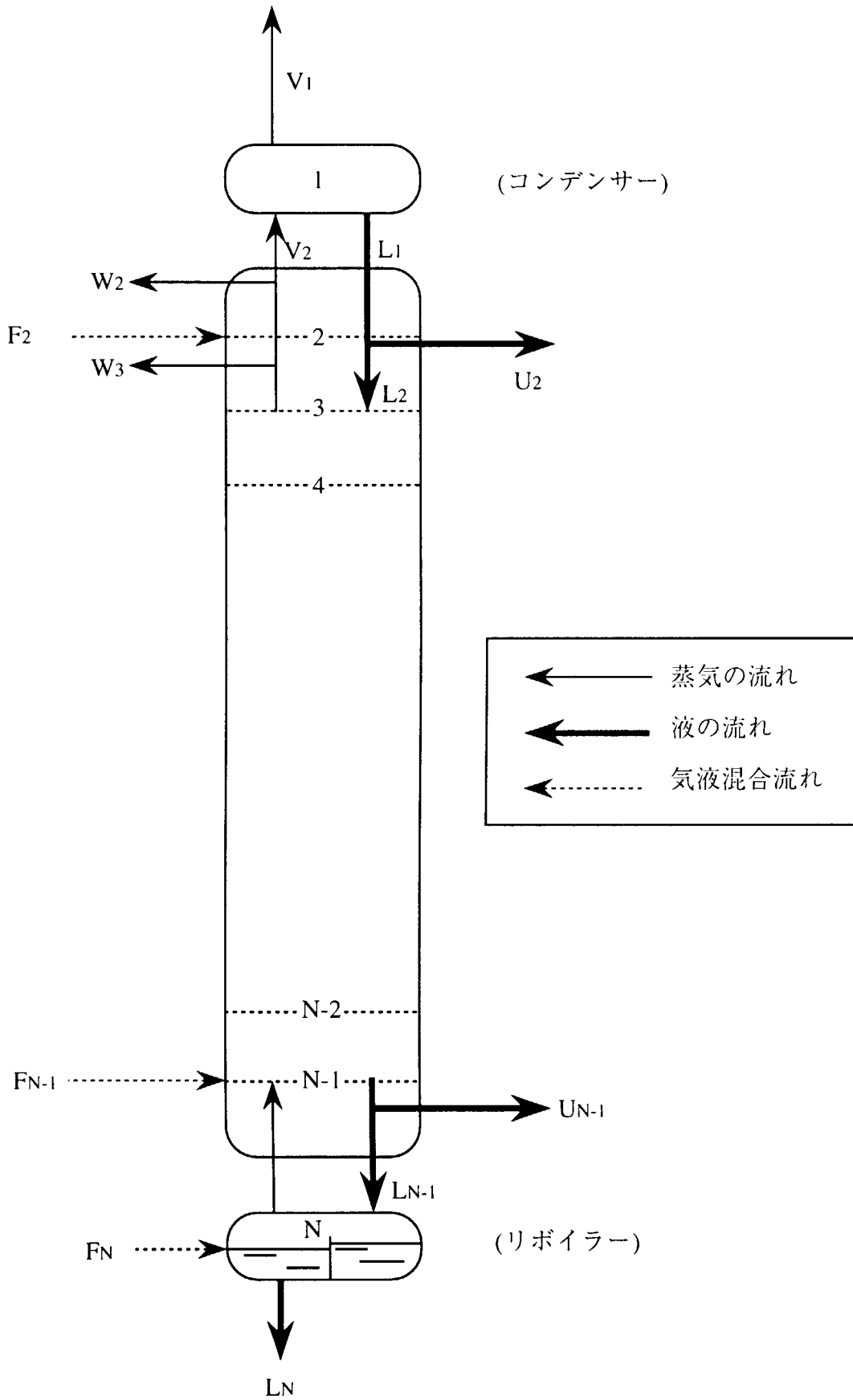


Figure 2 解析モデル

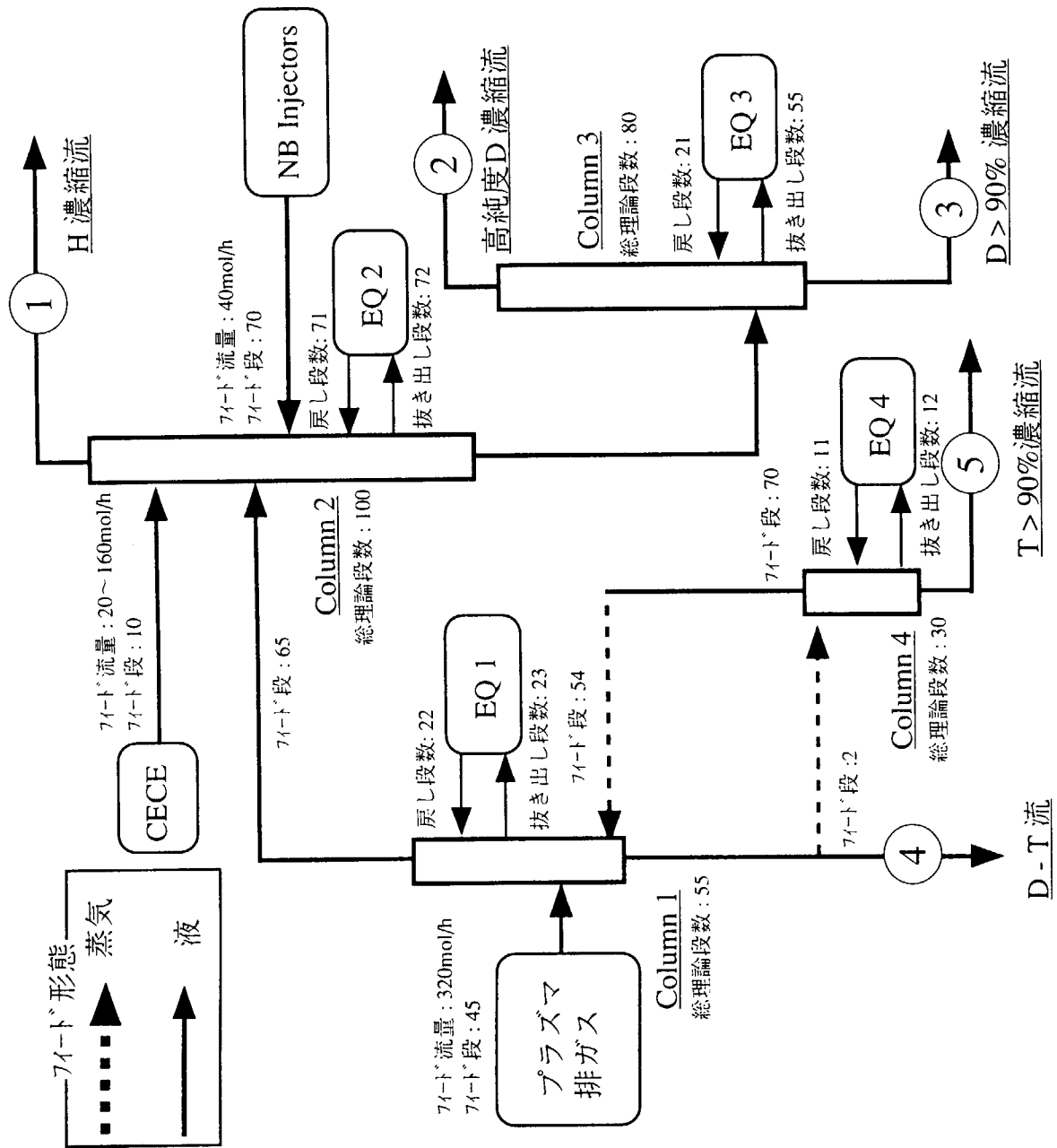


Figure 3 カスケード概念図

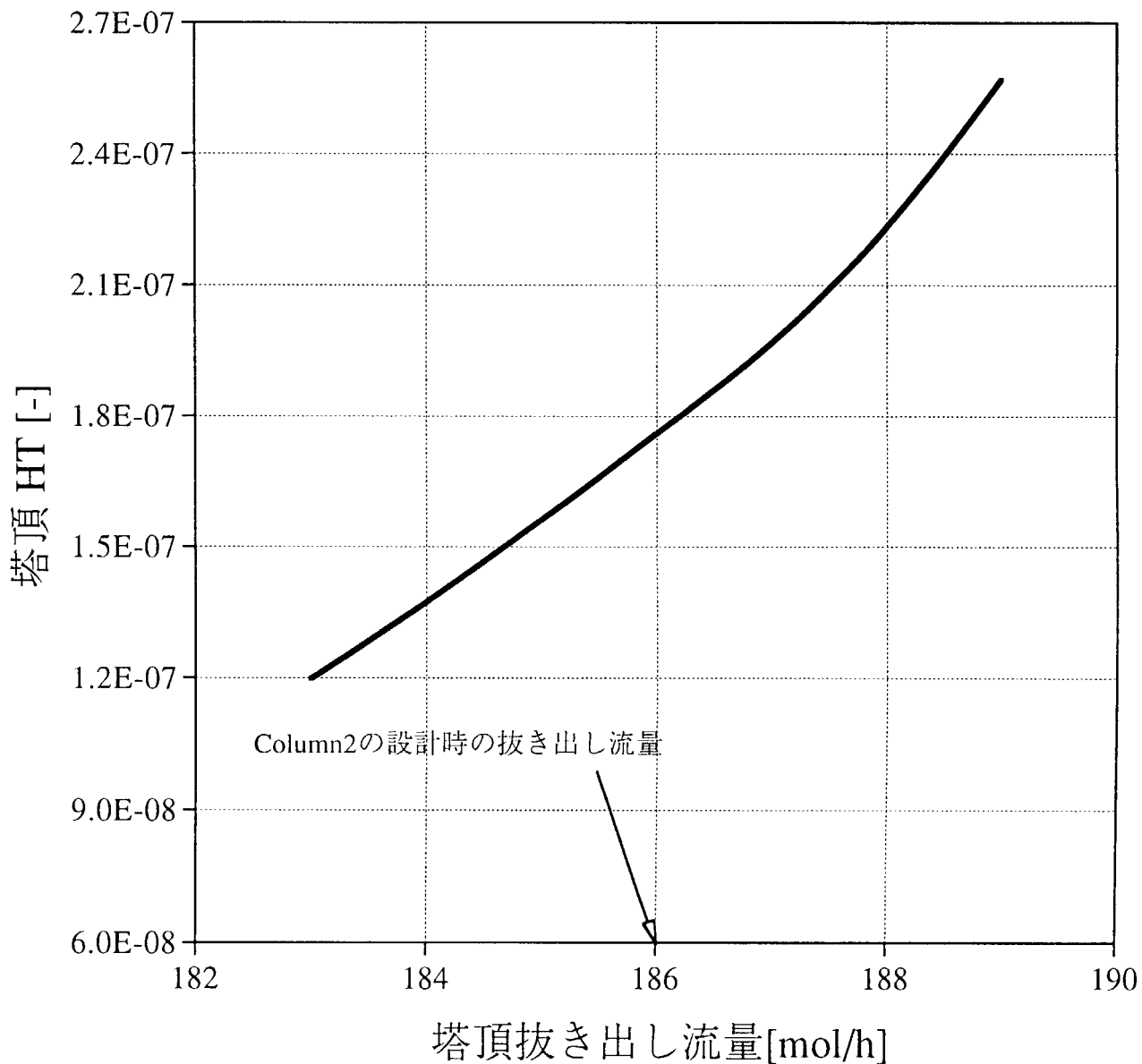


Figure 4 塔頂流量の微小変動が塔頂 HT 濃度に与える影響  
 塔頂 HT 濃度が制限値の  $1.8 \times 10^{-5}\%$  になるように設計した Column2 であるが、塔頂 HT 濃度が塔頂流量の微小変動に大きく影響を受けるため、場合によっては制限値を越える可能性がある。

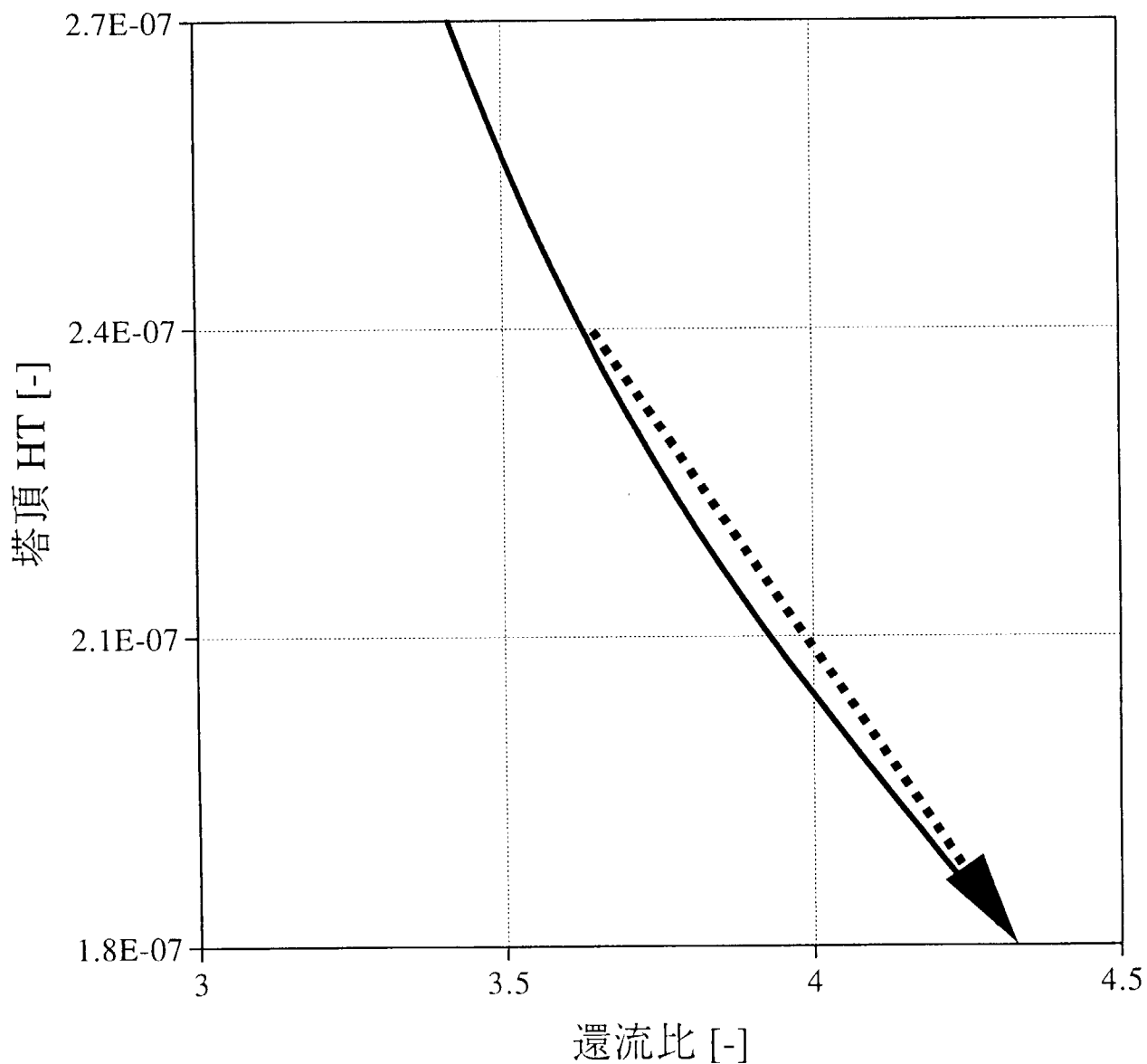


Figure 5 還流比と塔頂 HT 濃度の関係  
 制限値を越えた HT 濃度に対して還流比制御を行う際には塔内蒸気流量の増加を招く。よって設計の際には塔内蒸気流量の増加を考慮しておく必要がある。



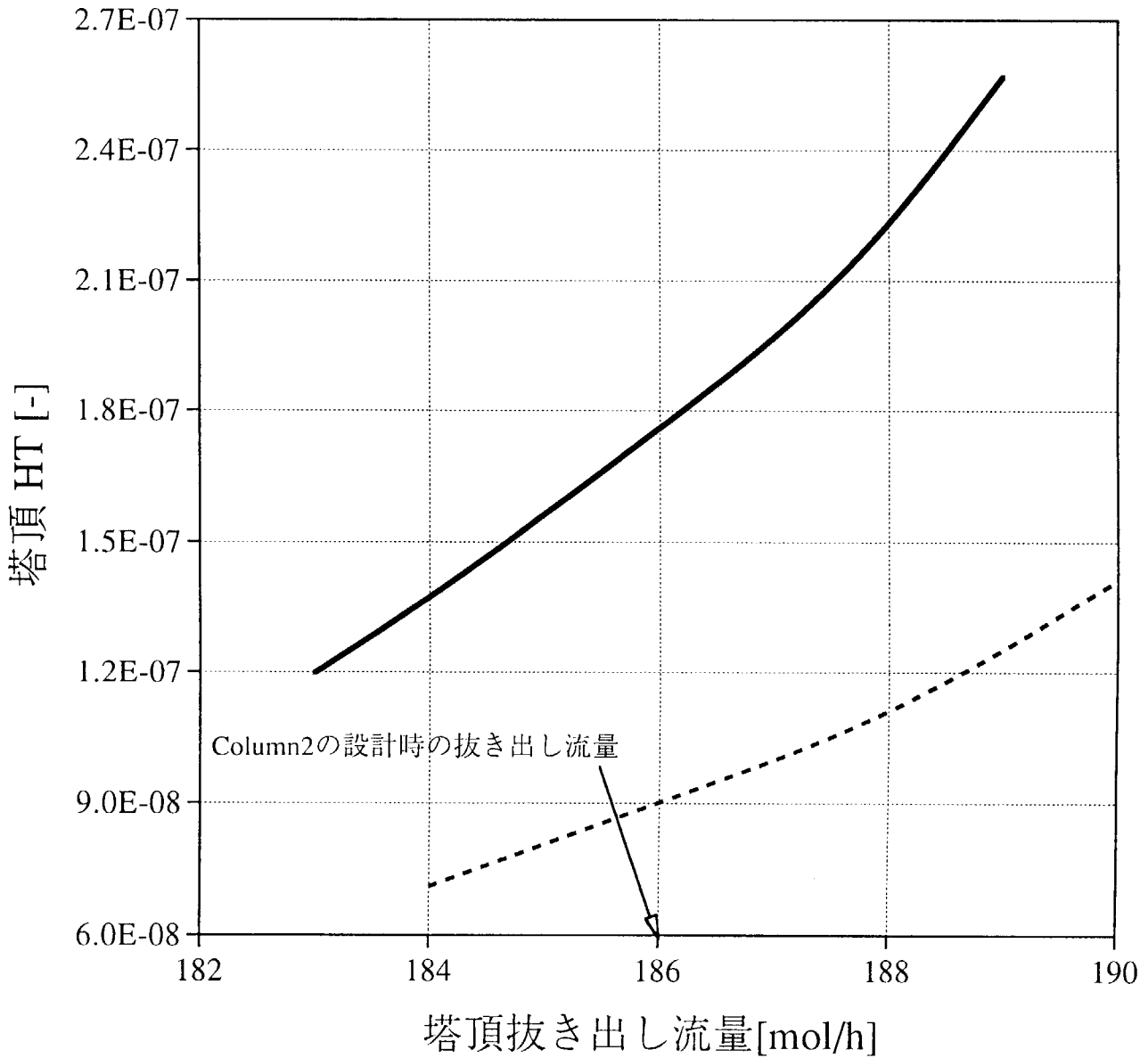


Figure 6 塔頂 HT 濃度設計値を厳しくした場合の流量変動に対する HT 濃度の変動の一例  
 (実線：塔頂 HT 濃度  $1.8 \times 10^{-5}\%$  で設計、破線：塔頂 HT 濃度  $9.0 \times 10^{-6}\%$  で設計)  
 塔頂 HT 濃度設計値を厳しくすることで想定される最大の流量変動（本検討では設定値  $\pm 1\%$  の変動を想定）においても HT 濃度が制限濃度を下回るようにすることは可能である。しかし塔径が大きくなるため水素同位体インベントリーと冷媒容量の値が増加する。

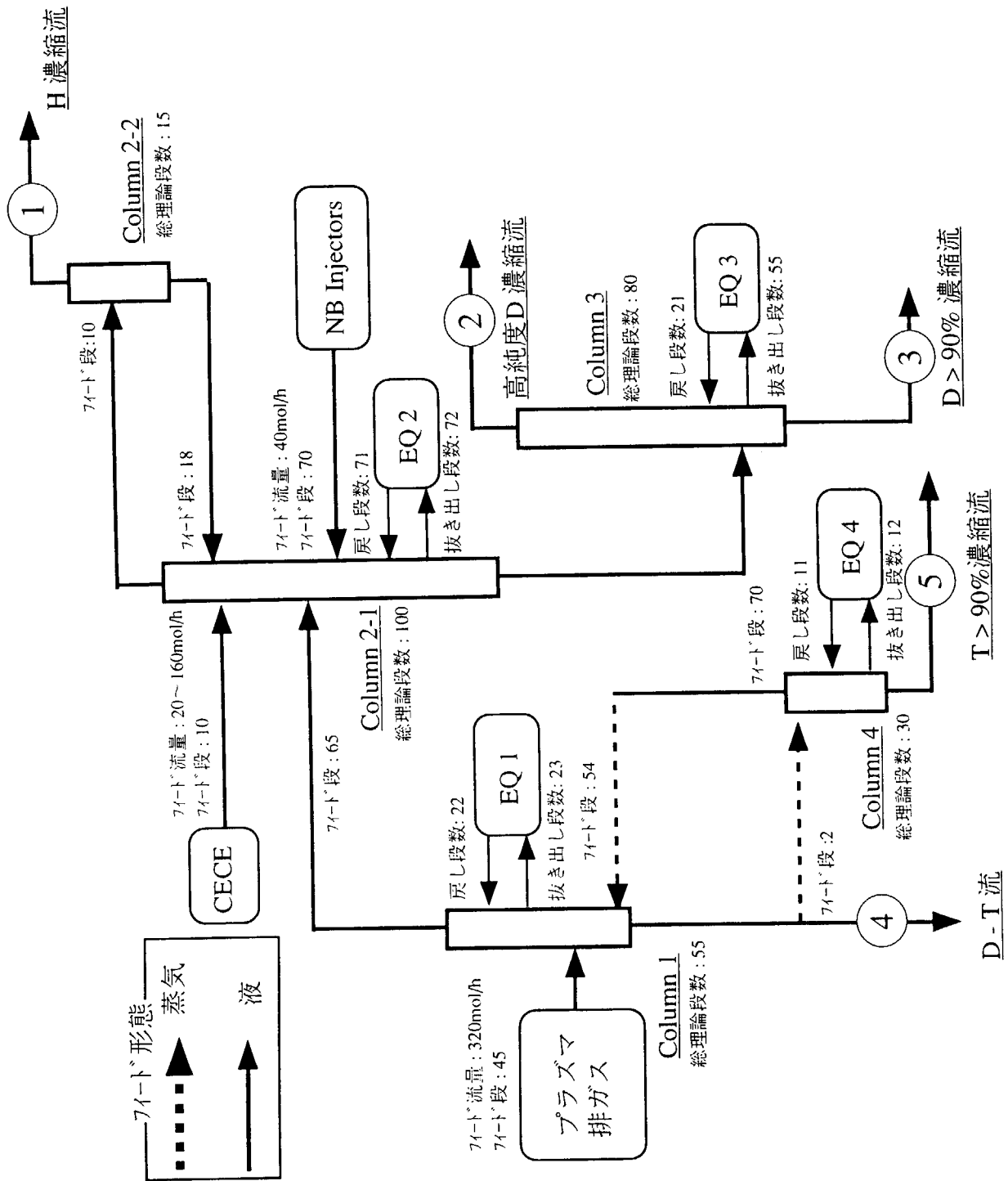


Figure 7 HT 濃度の制御を考慮したカスケード概念図

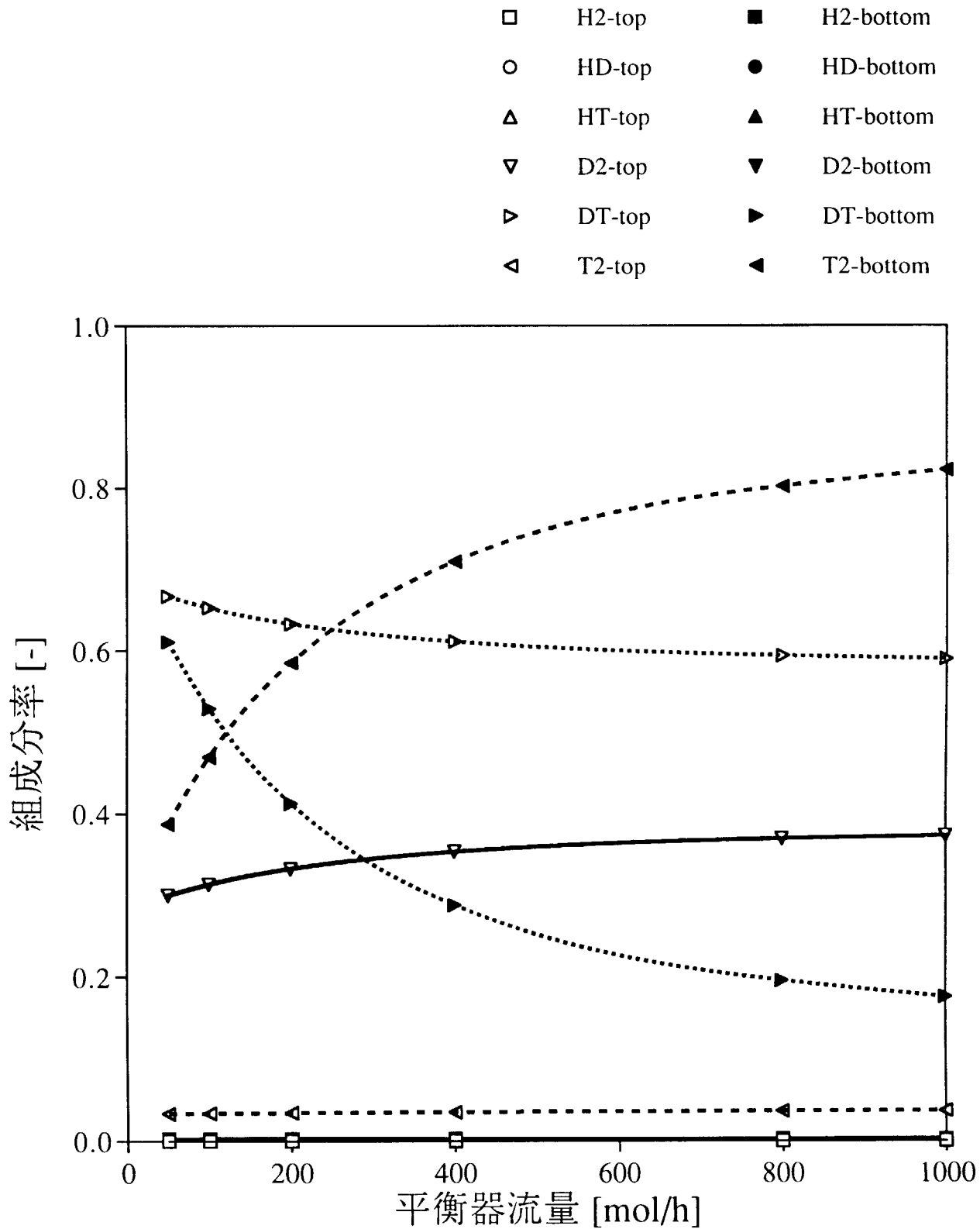


Figure 8 平衡器流量が組成に与える影響

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$   
 $1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	$\mu$
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	$\text{s}^{-1}$
力	ニュートン	N	$\text{m}\cdot\text{kg}/\text{s}^2$
圧力, 応力	パスカル	Pa	$\text{N}/\text{m}^2$
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$\text{N}\cdot\text{m}$
工率, 放射束	ワット	W	$\text{J}/\text{s}$
電気量, 電荷	クーロン	C	$\text{A}\cdot\text{s}$
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	$\text{W}/\text{A}$
静電容量	ファラド	F	$\text{C}/\text{V}$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$\text{V}/\text{A}$
コンダクタンス	ジーメンズ	S	$\text{A}/\text{V}$
磁束	ウェーバ	Wb	$\text{V}\cdot\text{s}$
磁束密度	テスラ	T	$\text{Wb}/\text{m}^2$
インダクタンス	ヘンリー	H	$\text{Wb}/\text{A}$
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}\text{C}$	
光束度	ルーメン	lm	$\text{cd}\cdot\text{sr}$
照射度	ルクス	lx	$\text{lm}/\text{m}^2$
放射能	ベクレル	Bq	$\text{s}^{-1}$
吸収線量	グレイ	Gy	$\text{J}/\text{kg}$
線量当量	シーベルト	Sv	$\text{J}/\text{kg}$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	$\text{\AA}$
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$   
 $1 \text{ b} = 100 \text{ fm} = 10^{-28} \text{ m}^2$   
 $1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$   
 $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm}/\text{s}^2 = 10^{-2} \text{ m}/\text{s}^2$   
 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$   
 $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C}/\text{kg}$   
 $1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$   
 $1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度  $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$   
 動粘度  $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{18}$
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1

$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J} (\text{計量法})$   
 $= 4.184 \text{ J} (\text{熱化学})$   
 $= 4.1855 \text{ J} (15^{\circ}\text{C})$   
 $= 4.1868 \text{ J} (\text{国際蒸気表})$   
 仕事率 1 PS (仏馬力)  
 $= 75 \text{ kgf}\cdot\text{m}/\text{s}$   
 $= 735.499 \text{ W}$

放射能	Bq	Ci
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$
	$3.7 \times 10^{10}$	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

ITERトリチウムプラントの水素同位体分離システムのための深冷蒸留塔の塔構成とインベントリーに関する考察