

JAERI-Tech
2003-082



JP0450236



JT-60U放電洗浄試験における排ガス組成の分析

2003年12月

堀川 豊彦・神永 敦嗣・中村 博文・東島 智・新井 貴
久保 博孝・小西 哲之*・西川 正史*

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（〒319-1195 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, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

JT-60U 放電洗浄試験における排ガス組成の分析

日本原子力研究所那珂研究所炉心プラズマ研究部

堀川 豊彦・神永 敦嗣⁺・中村 博文⁺⁺・東島 智・新井 貴⁺・久保 博孝

小西 哲之^{*}・西川 正史^{**}

(2003年9月10日受理)

放電洗浄中の真空容器内からの排ガスの組成を調べることは、水素同位体の除去特性の評価のための基本的な事項であるとともに、核融合炉の燃料サイクルシステム設計上有益なデータとなる。とくに水素の排出には炭素層にトラップされた水素の化合物の形での放出などが重要であり、排出化学種の分析、炭素および酸素排出の測定が重要な知見となる。これら化学種の分析法の確立を目的として、JT-60U で実施した放電洗浄試験において、ガスクロマトグラフを用いて真空容器から排出される水素、炭化水素等の化学種の濃度およびそれらの時間挙動を分析した。放電洗浄方法にはグロー放電洗浄 (GDC)、テイラー放電洗浄 (TDC) および電子サイクロトロン共鳴放電洗浄 (ECRDC) を、主な試験パラメータには真空容器の第一壁温度 (室温~300 °C) と放電用の作動ガス (He, Ar, H₂) を用いた。排ガスからは水素、炭化水素等が検出され、第一壁温度が高いほど、また洗浄方法では GDC において、化学種が増加する傾向が見られた。排出能力は GDC で最も高く、TDC と ECRDC では低く、別途測定されたトリチウムの排出との相関が認められた。炭化水素の化学種としてメタン、エチレン、アセチレンおよびエタンが検出された。生成量は H₂ を用いた GDC で大きく、また第一壁温度に依存した。ITER の重要課題であるトリチウム炭素共堆積層の除去の観点から、反応に伴う炭素消費量を評価し、GDC 1 時間当たり単一層程度の除去であることがわかった。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

+ 核融合装置試験部

++ 核融合工学部

* 京都大学エネルギー理工学研究所

** 九州大学

Analysis of Exhaust Gas Composition in JT-60U Discharge Cleaning Experiments

Toyohiko HORIKAWA, Atsushi KAMINAGA⁺, Hirofumi NAKAMURA⁺⁺, Satoru HIGASHIJIMA,
Takashi ARAI⁺, Hirotaka KUBO, Satoshi KONISHI*and Masabumi NISHIKAWA**

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

(Received September 10, 2003)

The composition of exhaust gas from vacuum vessel in a discharge cleaning is an essential information of the removal characteristics of hydrogen isotopes and is useful data for the design of the fuel cycle system of a fusion reactor. Especially for the hydrogen trapped in carbon layers, removal by a form such as hydrides is important process, so the analysis of chemical species and the measurement of carbon and oxygen degassing are valuable information. Thus, to establish the method of analysis of these chemical species, the concentrations and the time-dependent behaviors of chemical species such as hydrogen, hydrocarbons and other chemical species were analyzed using a gas chromatograph in JT-60U discharge cleaning experiments. In the experiments, glow discharge cleaning (GDC), Taylor discharge cleaning (TDC) and electron cyclotron resonance discharge cleaning (ECRDC) were adopted and the temperature of the first wall (room temp. - 300 °C) and working gas for the discharges (He, Ar and H₂) were varied as the major experimental parameters. Hydrogen, hydrocarbons and other chemical species were observed in the exhaust gas. The number of chemical species increased with the first wall temperature especially in GDC. The degassing rates in GDC were much larger than in TDC and ECRDC. This tendency was similar to that of tritium degassing. Observed chemical species of hydrocarbons were methane, acetylene, ethylene and ethane. They are considered to be produced by the reaction of hydrogen with carbon material of the first wall. The productivity of hydrocarbons was significant in GDC using H₂ and depended on the temperature of the first wall. From the viewpoint of application to the removal of carbon-tritium codeposited layers which is a crucial issue for ITER, consumption of carbon by the reaction was estimated. About monolayer of the carbon tile surface is expected to be removed with an hour operation of GDC.

Keywords: JT-60U, Discharge Cleaning, Exhaust Gas Composition, Gas Chromatograph, Hydrogen, Hydrocarbons, Glow Discharge, Taylor Discharge, Electron Cyclotron Resonance Discharge

⁺ Department of Fusion Facilities, ⁺⁺ Department of Fusion Engineering Research

* Kyoto University, ** Kyushu University

目 次

1. 緒 言.....	1
2. 放電洗浄試験.....	2
2.1 試験の概要.....	2
2.2 試験条件.....	2
3. 分析方法.....	3
3.1 分析装置.....	3
3.2 分析条件.....	3
3.3 標準ガスによる校正.....	4
3.4 同位体に起因する分析誤差.....	5
3.5 予備分析.....	6
4. 結果と考察.....	8
4.1 排ガス中の化学種.....	8
4.2 排出化学種の時間依存挙動.....	8
4.3 水素排出能力およびトリチウム排出能力との相関性.....	9
4.4 GDC における水素排出特性.....	10
4.5 炭化水素生成特性.....	11
4.6 放電洗浄による炭素消費量の評価.....	11
5. 結 言.....	12
謝 辞.....	12
参考文献.....	13
付 録.....	35

Contents

1. Introduction	1
2. Discharge Cleaning Experiments	2
2.1 Outline of Experiments	2
2.2 Experimental Conditions	2
3. Method of Analysis	3
3.1 Equipment for Analysis	3
3.2 Analyzing Condition	3
3.3 Calibration Using Standard Gases	4
3.4 Analyzing Error Causing by Hydrogen Isotopes	5
3.5 Test Analysis	6
4. Results and Discussion	8
4.1 Chemical Species Observed in Exhaust Gas	8
4.2 Time-dependent Characteristics of Exhausting Chemical Species	8
4.3 Ability of Hydrogen Isotopes Degassing and its Relativity to Ability of Tritium Degassing	9
4.4 Characteristics of Hydrogen Isotopes Degassing of GDCs	10
4.5 Characteristics of Hydrocarbons Production	11
4.6 Evaluation of Carbon Consumption by Discharge Cleaning	11
5. Concluding Remarks	12
Acknowledgment	12
References	13
Appendix	35

1. 緒言

真空容器内の過大なトリチウムインベントリは安全性の観点から運転上の制約となるため、真空容器内のトリチウムの除去は核融合における重要な課題である。プラズマ対向壁に炭素材を用いた核融合では、炭素タイル上に堆積する再堆積層に共堆積するトリチウムのインベントリが運転の制約になりうる。実際に、核融合実験炉 ITER ではクリチカルな問題の一つと考えられている。JET、TFTR におけるプラズマ対向壁へのトリチウム蓄積の研究では、トリチウムは主として炭素再堆積層に蓄積されている。JET のデータに基づいて ITER の真空容器内へのトリチウムの蓄積を評価すると、100~200 ショットの D-T 放電で、既に ITER におけるトリチウム利用許可制限値を超える量のトリチウムが炭素堆積層に蓄積されるとの予測がなされ、ITER の運転のためには再堆積層からのトリチウム除去が重要な問題とされている[1]-[3]。一方、JT-60U では重水素を実験放電の作動ガスとしており、D-D 反応で生成する約 1MeV の高エネルギーのトリチウムは、炭素タイルの深い位置 (~ μm) に打ち込まれることがわかっている[4],[5]。このような真空容器内に様々な形態で蓄積したトリチウムを効果的に除去する方法を確立することは、核融合炉実現へ向けて必須の開発課題である。

トリチウムの除去方法としていくつかの方法、例えば酸素ベーキング、レーザーアブレーション、グロー放電洗浄等の方法が考えられている[1],[2],[6],[7]。JT-60U では、不純物や水素のリサイクリングの制御を目的にテイラー放電やグロー放電といった第一壁コンディショニング法が用いられており[8]、このような放電洗浄方法のトリチウムを含む水素同位体の除去特性を詳細に調べることは、核融合炉の設計に有益である。真空容器内のトリチウムインベントリの低減法の評価を目的に、JT-60U で放電洗浄試験を実施した。

放電洗浄中の排ガスの組成を調べることは、水素同位体の除去特性の評価のための基本的な事項であるとともに、核融合炉の燃料サイクルシステム設計上有益なデータとなる。とくに水素の排出には炭素層にトラップされた水素の化合物の形での放出などが重要であり、排出化学種の分析、炭素および酸素排出の測定が重要な知見となる。そこで、これら化学種の分析法の確立を目的として、ガスクロマトグラフを用いて真空容器から排出される水素、炭化水素等の化学種の濃度およびそれらの時間挙動を測定し、各種洗浄方法における水素排出効果を評価するとともに、炭素再堆積層の除去効果についても検討した。

本報告の目的と内容は以下である。

- (1) JT-60U放電洗浄試験における排ガス組成分析
放電時排出ガスの組成分析手段の開発
- (2) 各種放電洗浄方法における化学種排出特性
- (3) 各種放電洗浄方法における水素排出能力、炭素除去能力の評価
- (4) 放電洗浄における水素（トリチウム）除去と炭化水素生成のメカニズムの研究

2. 放電洗浄試験

2.1 試験の概要

JT-60U の放電洗浄試験は、平成 14 年 10 月 9 日から 12 月 12 日にかけて合計 6 週間実施された。期間中、真空容器のベーキング温度はほぼ週単位に室温から 300 °C の間で変更され、放電洗浄方法や放電の作動ガスをパラメータとする試験を繰り返した。

2.2 試験条件

主要な試験パラメータは、真空容器のベーキング温度、放電洗浄方法および放電の作動ガスの 3 つである。

真空容器のベーキング温度は、前述のようにほぼ週単位で変更され、室温からスタートして、第一壁温度で 150 °C、250 °C および 300 °C に順次昇温され、最後に室温に降温してレファレンスとなるデータを採取するという手順であった。放電洗浄方法には、グロー放電洗浄 (GDC)、テイラー放電洗浄 (TDC) および電子サイクロトロン共鳴放電洗浄 (ECRDC) の 3 種類を用いた。また、放電洗浄の他に、作動ガスを真空容器内に流通するガスフローによる洗浄についても行った。放電の作動ガスには、2 種の希ガス (He および Ar) と軽水素 H₂ を用いた。

3. 分析方法

3.1 分析装置

排ガスの組成の分析には Agilent 社のマイクロガスクロマトグラフを用いた。図 1 に示すように、JT-60U の真空容器からの排ガスの一部を、真空排気系配管から分析装置に分岐吸引する。分析装置はマイクロガスクロマトグラフとトリチウム測定用の電離箱およびバブラーの系統で構成される。

マイクロガスクロマトグラフは、Molecular Sieve 5A を固定相とする分離カラム（全長 10 m、キャリアガスには Ar を使用）と、PoraPLOT Q を固定相とする分離カラム（全長 8 m、同 He を使用）の 2 チャンネル（以下各々 A チャンネル、B チャンネルと称することにする）から成り、前者は主として水素と He の分析に、後者は炭化水素の分析に用いた。分析は、放電洗浄の間（放電の種類により 10 分から最長約 5 時間）一定の時間間隔（標準 2 分）で連続的に行った。分析可能な化学種は水素、炭化水素、O₂、N₂、CO₂、希ガスなどである。低濃度の H₂O は現状分析困難である。また、水素同位体（軽水素、重水素、トリチウム）の弁別はできない。

真空排気系の出口において、排出される水素の濃度を爆発限界以下の濃度に調整することを目的に N₂ ガスが注入されているため、ガスクロマトグラフでは N₂ ガスに対する濃度を測定することになる。分析された化学種の濃度から、N₂ 注入流量を基に化学種の排出流量が求められる。N₂ 注入流量は約 12 NL/min×2 系統であるが、流量制御を行っていないため時間的、季節的に変動しうる（最大で数 10 % 程度）。化学種の排出流量の測定誤差には、ガスクロマトグラフの分析誤差や後述する同位体誤差に加えて、この N₂ 注入流量の不確かさによるものが加わる。各々の誤差の定量的な評価はできていないが、作動ガス（He や H₂）の注入流量と測定された排出流量の比較などから、誤差の合計は最大で 2 倍程度と推定される。

3.2 分析条件

ガスクロマトグラフの分析条件は、トカマク放電実験時に行った予備分析の経験をもとに、表 1 のように定めた。予備分析では排ガス中の炭化水素濃度が低く、ピークとしては観察されてもピーク面積の算出が困難なことがあったため、炭化水素の検出感度を上げる目的で B チャンネルの試料注入時間を長めにし、増幅率を High（100 倍）に設定した。A チャンネルについてはカラムの劣化が速いため、劣化状況を N₂ のピークの形状でモニターしたり、また作動ガスの注入量をモニターする等の目的のために、これらのピークがオーバーフローしないように増幅率は Medium（10 倍）に設定した。サンプリング時間やサンプリング間隔の設定値の根拠については 3.5 節で述べる。

3.3 標準ガスによる校正

標準ガスによる校正を実施し、検出可能な化学種と各々のクロマトグラム上のピーク位置、濃度とピーク面積との相関に関するデータを得た。標準ガスは表 2 に示すような成分のものを購入し、目的とする化学種と予想される濃度に応じて選んで使用した。

3.3.1 検出可能な化学種とピーク位置 (リテンションタイム)

標準ガスによる校正で検出された化学種と、各化学種のピーク位置 (リテンションタイム) を表 3 に示す。A チャンネルについては、カラムの破損に伴う交換修理後にリテンションタイムが大きくなる変化を生じている。修理時にカラムを接続した接着剤が流路を塞ぐなどして流路抵抗が増して、キャリアガスの流速が低下したことによるのではないかと推定されるが、分析には支障がないのでそのまま使用した。

検出された化学種は、A チャンネルについては H_2 、 CH_4 、 O_2 、 N_2 、 He 、 Ne 、 Kr 、 Xe である。ただし、 Ne と He とはピーク位置が近接しているため、共存する場合は重なって弁別できない。

B チャンネルについては、炭化水素の化学種として CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8 が検出された。その他の化学種でも検出可能なものが有りうるが未確認である。なお、 C_2H_2 と C_2H_4 とはピーク位置が近接しており、両者が共存する場合は重なって弁別できない。B チャンネルでは他に CO_2 、 H_2O 、 Kr 、 Xe が検出された。ただし、 H_2O は空気中の水分程度の濃度であればよいが、数 100ppm レベル以下の低い濃度になると負の妨害ピークのために検出できない。 Ne 、 Ar 、 O_2 、 N_2 はピーク位置が近接していて、これらの化学種が共存する場合は重なり合う。 H_2 はこれらの化学種のピーク位置よりわずかに先行する位置に負のピークを生ずるが、これら化学種と共存する場合は重なってしまい分離は難しい。 H_2O の位置に見られる妨害ピークについては、カラムのエージング操作や分析時間の推移などには関係なく常時出現し、また CO_2 の位置にも微少な負のピーク (CO_2 の検出には支障のない程度) が認められることから、参照カラムへの空気の混入などの不具合が疑われるが、原因は不明である。

経験的に、B チャンネルは劣化しにくいのに対し A チャンネルは吸湿して速やかに劣化するので、分析の前にはカラム温度 150~160 °C で最低 4 時間はエージングが必要である。ちなみに、放電洗浄試験中は毎日夜間にエージングを行うようにした (15 時間程度)。B チャンネルについてはこれほどの頻度は必要ないが、A チャンネルに合わせて行った。簡便な劣化確認方法は空気を分析することで、 O_2 と N_2 のピークが分離しなければ劣化しており正常な分析はできない。

3.3.2 校正線

化学種の濃度とクロマトグラム上のピーク面積の相関について図 2 に例を示す。いずれも良好な直線性を示している。 CH_4 の校正線が原点を通らないのは、ピークが N_2 の大ピークのテール上にあるため、ガスクロマトグラフに備え付けのピーク面積計算ソフトの直線の基底線方式では過小評価してしまうことによる。

3.4 同位体に起因する分析誤差

JT-60U の排ガスの水素同位体組成は放電の種類や時間により常に変化する。例え組成が一定であっても、軽水素-重水素-三重水素の混合ガスやこれらを成分に含む炭化水素の標準ガスの入手は簡単ではない。そこで、便宜的に軽水素や重水素を成分とする化学種の標準ガスによる校正線で代用せざるを得ない。この際にどの程度の分析誤差が生じるか検討した。

まず、ガスクロマトグラフの感度は、熱伝導度検出器 (TCD) の動作原理から主にキャリアガスと分析対象の化学種の熱伝導率の差に依存すると考えて、標準ガスによる校正データを上記の熱伝導率の差で整理する。整理結果から同位体ガスを分析した際に予想される誤差の程度を評価する。熱伝導率については伝熱工学資料[9]を参照して、

検出部のガス温度～カラム温度

同上圧力～大気圧

として求めた。感度は化学種の濃度当たりの実測のピーク面積で与えた。図3に各種化学種の感度とキャリアガスとの熱伝導率の差の相関を示す。図に示されるように感度はキャリアガスとの熱伝導率の差に依存すると考えられる。

JT-60U の排ガスに含まれると予想される化学種で同位体の影響が考えられるのは、水素、炭化水素および水である。流体の熱物性値集[10]から、25 °C、1 atm における H₂ と D₂ の熱伝導率は各々 180.6、139.9 mW/(m・K)である。HD、HT、T₂ その他については記載がない。水に関しては、例えば 380 °C、0.1 MPa の水蒸気において H₂O と D₂O は各々 25.28、24.78 mW/(m・K)である。炭化水素に関しては記載がない。H₂ と D₂ では 30 %程度の熱伝導率の違いがある。H₂O と D₂O では 2 %程度である。炭化水素についてはデータがないが水に近いのではないかと思われる。HT、DT、T₂ 等はさらに熱伝導率に違いがある可能性があるが、これらの JT-60U の排ガス中の濃度はごく低いと考えられるので分析誤差には影響しないであろう。したがって、分析誤差の最大値評価は H₂ と D₂ で行えば十分と思われる。前記の流体の熱物性値集から、25 °C、1 atm における Ar の熱伝導率は 17.63 mW/(m・K)である。よって、Ar キャリアガスとの熱伝導率の差は以下である。

$$\text{H}_2 ; 180.6 - 17.63 = 163.0 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\text{D}_2 ; 139.9 - 17.63 = 122.3 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

図3から、ガスクロマトグラフの感度とキャリアガスとの熱伝導率の差はほぼ直線の関係であると見なすと、D₂の感度はH₂の感度に対して

$$122.3/163.0=0.75$$

であることになる。したがって、例えば D₂ が主体の排ガスを分析して H₂ の校正線で濃度を算出した場合、実際の濃度のおよそ 75 %と過小評価される。

このようなことから、同位体に起因する分析誤差としては、水素の場合で最大でも 20～30 %、その他の化学種では数 %以下と評価され、重水素の比率の高い水素に関しては誤差に留意が必要であるが、その他の軽水素が主体の水素や炭化水素などに関しては、標準ガスによる校正線を使用しても定量の精度には問題はないと判断される。

3.5 予備分析

放電洗浄試験に先立ち、JT-60U で行われた実験放電や壁調整放電時の排ガスを対象に予備的な分析を実施し、実体系における分析の定量性の検証を始め、排ガス中の化学種の濃度の時間変化の確認と連続繰り返し分析の時間間隔の最適化を行った。

3.5.1 連続繰り返し分析のための時間間隔の最適化

分析の時間間隔は、分析する対象の時間変化、機器の仕様上の制約、分析化学種の分離カラムにおける保持時間（リテンションタイム）等を考慮して設定する必要がある。分析間隔が短いほどトカマク放電のような速い現象の解析には当然有利となる。

分析に供したガスクロマトグラフは自動的に連続分析でき、試料ガスをサンプリングする時間間隔（サンプリング間隔）、試料ガスの引き込み時間（サンプリング時間）、クロマトグラムの掃引時間（ランタイム）などを調節可能である。機器仕様上の制約としては、分析のリスタートに 5 秒を必要とするが、他の制約と較べるとはるかに短時間であるので問題にはならない。リテンションタイムについては、放電洗浄試験で分析の対象として予想される化学種は、水素、炭化水素（炭素数 1~2 程度のもの）および放電の作動ガス（He、H₂）が主体で、その他に N₂、O₂、H₂O といったものであるから、前述の校正結果に示されるように概ね 20~45 秒の範囲内である。したがって、ランタイムはピークの幅を考慮して 50 秒程度にまでは短縮できる。

サンプリング時間については、サンプリング配管内を試料ガスが移動する時間や、ガスクロマトグラフ内の既存の試料ガスを追い出して新しい試料ガスに置換するのに要する時間で決まる。多分に実体系に依存するので、実ガスを使ってパラメータ試験を行い適切なサンプリング時間を求めた。JT-60U のトカマク放電に対して、サンプリング時間をパラメータ（サンプリング間隔は 1 分）にして排ガス中の水素を対象に分析した結果を図 4 に示す。図では各時間の水素濃度を極大点の濃度で規格化して示してある。水素（D₂）は短時間にパルス状に真空容器に注入される。注入水素量はショットごとに異なるので、真空排気系に排出される水素の時間挙動としてはピークの高さは変わりうるが、形状は各ショットとも類似したものになると想像され、図に見られる時間挙動の変化はサンプリング時間の影響を示していると考えられる。サンプリング時間が短いほどピークが鈍化し、極大点の位置が後退することがわかる。これは、試料ガスの引き込みが不十分かまたはガス置換が不十分なためと考えられる。サンプリング時間が 5~10 秒程度では時間挙動を正しく捉えられないと思われる。この時はサンプリング時間が 30 秒以下のデータしか採取しなかったが、サンプリング時間を長くし過ぎると、逆に実挙動に対する分析の時間遅れが増しサンプリング間隔も増加するので、30 秒程度に設定するのが妥当と判断し、以降の分析では 30 秒を標準のサンプリング時間とした。

以上のリスタート所要時間、ランタイム、サンプリング時間の 3 つを考慮すると、サンプリング間隔は 85 秒まで短縮できる。しかしながら、放電洗浄試験では TDC で 10 分といった比較的短時間の放電があるものの、大半は 20、30 分以上、特に GDC では 2~5 時間の長時間放電であり、放電中の化学種の濃度の急激な変化はないと予想されたので、

2分を標準のサンプリング間隔と設定した。

3.5.2 分析の追従性および定量性の検証

図5に予備分析の例を示す。本分析はカラムの破損に伴う交換を行う前で、Aチャンネルのリテンションタイムが小さかったこともあり、速い時間変化が予測されるトカマク放電への追従性を見る意図で、サンプリング間隔を1分（サンプリング時間20秒、リテンションタイム35秒）に設定している。

図5-1の(a)の例では約15秒のトカマク放電を行っている。分析では、放電開始からおよそ1分後に排ガス中の水素とHeの濃度が急激に上昇し、極大点を経た後数10分をかけてゆっくりと減衰するのが観察された。図5-1の(b)および図5-2の(c)はディスラプションが発生したケースであるが、興味深いのは水素の濃度が数分後に再び緩慢に上昇するかのように見える点である。図5-2の(d)は図5-2の(c)で示したディスラプション直後の壁調整放電の例で、Heによる6分間のTDCを行っている。トカマク放電の場合と同様に、放電開始からおよそ1分後に排ガス中のHeと水素の濃度が急上昇し、Heは注入流量の変化に対応すると思われる変化を示して7分後には急速に減少する。Heに随伴するように水素が排出されており、TDCの洗浄効果が認められる。この放電では微量のメタンも検出された。

いずれの分析例でも、放電開始に対して排ガス中の成分は1分程度遅れて検出され始めるが、これは従来推定されている真空容器から排気系出口までの流通時間約30秒と、排気系出口においてガスクロマトグラフに吸引するサンプリング時間20秒の合計にほぼ一致する。サンプリング間隔が1分であるから、極大点の位置など放電とサンプリングのタイミング次第では1分以内のずれは生じうる。このような時間的なずれを除けば追従性については問題ないと判断した。

次に、濃度測定値から分析の定量性について検証した。水素とHeを対象に各時刻における濃度を流量に換算し、時間積分して放電ごとの排出量を求めて、注入量と比較した。表4に結果を示す。表からHeの排出量は注入量とほぼ一致するのに対して、水素の排出量は注入量のおよそ1~30%であることがわかる。前節で述べたようにD₂主体の水素では濃度を2~3割程度過小評価している可能性があるため、その誤差分を考慮しても、排出量が注入量に対して著しく小さいのは、実験時に作動していたNBI系のクライオポンプへの吸引の影響と推定される。

以上から、放電洗浄試験時には水素、炭化水素等の化学種の排出量（トリチウムの排出量についても同様に）を正確に測定するため、排気は真空排気系に一本化して行うことが必須であることがわかった。また、クライオポンプに吸引されないHeについては排出量が注入量とほぼ一致することから、ガスクロマトグラフによる濃度分析とこれに基づく排出量の算定は十分定量性を有すると判断され、クライオポンプ等との並列排気のケースを除けば、真空容器からの化学種の排出量の評価を行える見通しが得られた。

その他、水素の排出濃度は十分測定できるレベルであるが、炭化水素の排出濃度は低く検出には感度を上げる必要があるといった知見も予備試験を通じて得られた。

4. 結果と考察

4.1 排ガス中の化学種

表5に放電洗浄試験において排ガス中に検出された化学種を、洗浄方法および放電用の作動ガスについて第一壁温度別の一覧にして示す。排ガスからは水素、炭化水素を含む多様な化学種が検出された。作動ガスが H_2 の場合は炭化水素が多く排出され、とくにGDCで多い傾向を示した。炭化水素は希ガスを作動ガスとする放電でも検出された。検出された炭化水素の化学種は、 CH_4 、 C_2H_2 およびまたは C_2H_4 （両者はガスクロマトグラム上のピークが近接しており弁別が困難。広がりのあるピーク形状から両方とも存在することが推測される）ならびに C_2H_6 である。その他の炭化水素の化学種は検出されなかった。

4.2 排出化学種の時間依存挙動

排ガス中の化学種の濃度は、放電の種類と作動ガスに固有の時間挙動を示した。以下測定例にもとづき特徴を述べる。

4.2.1 GDC

図6にHe、Arおよび H_2 を作動ガスとするGDCにおける排ガス中の化学種の濃度の時間変化の例を示す。

作動ガスが希ガスの場合、HeおよびArのいずれでも水素とともに炭化水素が排出される。排出濃度は放電開始で急激に増加した後、時間とともに減少する傾向を示す。時定数は別途測定されたトリチウムの排出の時定数[11]と類似しており、両者の相関性が推測される。詳細な検討は4.3および4.4節で行う。Ar-GDCではHeも検出されたが、これはその前に実施したHe-GDCの作動ガスが残留していて排出されたものと考えられる。

作動ガスが H_2 の場合、検出される水素は作動ガスの H_2 が主体となり、壁から放出される水素を分離して測定することはできない。炭化水素の排出挙動は希ガスの場合と異なり、濃度が時間とともに一定になる傾向を示す。このことから、炭化水素は壁の炭素材と H_2 との反応によって生成していることが推定される。

前述のように、作動ガスが希ガスの場合にも炭化水素が排出されるが、放電直後にピークを生じ以後急速に減少する。これが壁に付着している水素と炭素材が放電で反応して生成したものか、 H_2 を作動ガスとする放電で生成して壁に付着していたものが排出されたものか、または両者が含まれるのかはわからない。作動ガスが H_2 の場合にも放電初期には濃度変化が見られることから、壁に付着した水素や炭化水素が影響している可能性がある。恐らく、放電中は化学スパッタリングや物理スパッタリング等による炭化水素の生成、壁からの脱着、壁への付着といったプロセスが混在しているのであろうが、現状では明確にできない。

4.2.2 ECRDC

図7に Ar および H₂ を作動ガスとする ECRDC における排ガス中の化学種の濃度の時間変化の例を示す。

作動ガスが希ガスの場合は炭化水素は検知されず、排出される水素の濃度は GDC と比べると 1/10~1/100 低かった。作動ガスが H₂ の場合は、GDC と同様に検出される水素は作動ガスの H₂ が主体となり、壁から放出される水素を分離して測定することはできない。GDC と同様に炭化水素が排出された。炭化水素濃度は GDC より低い。

ECRDC では、GDC および後述の TDC では見られない放電中の水素濃度の減少という特異な挙動が観察された。この現象は H₂-ECRDC で顕著で、図7(b)に示したように放電開始とともに排出される水素の濃度が急激に減少する。放電の継続とともに濃度は徐々に回復し、放電の終了で放電前の濃度に戻る。この間作動ガスの H₂ は一定流量で注入されているので、減少した濃度に相当する水素は壁に吸収されたと考えられる。吸収量を評価すると 20~30 分の放電 1 回当たり約 0.05 mol であった。これは例えば、前述した希ガス GDC~2 時間による水素排出量に匹敵する。炭化水素の濃度については、放電とともに上昇し放電終了で減少する。放電開始後一定の速度で生成されているとすれば水素同様一部が壁吸収されている可能性がある。Ar-ECRDC でも、図7(a)に示したように放電中水素の濃度が低く抑えられ、放電終了とともに立ち上がる現象が見られる。類似した挙動は別途測定されたトリチウム[11]でも認められた。

4.2.3 TDC

図8に、He、Ar および H₂ を作動ガスとする TDC における排ガス中の化学種の濃度の時間変化の例を示す。

作動ガスが希ガスの場合は炭化水素は検知されず、排出される水素の濃度も ECRDC 同様 GDC と比べると 1/10~1/100 低かった。作動ガスが H₂ の場合は、GDC および ECRDC と同様に検出される水素は作動ガスの H₂ が主体であり、壁から放出される水素を分離して測定することはできない。GDC および ECRDC と同様に炭化水素が排出された。炭化水素濃度は二者と比較すると低かった。

4.3 水素排出能力およびトリチウム排出能力との相関性

放電洗浄効果の観点から、希ガスを作動ガスとする各放電で排出された水素の量を求めて、洗浄能力を評価する。また、トリチウム排出量の測定値と比較して両者の相関性について考察する。水素の排出量は、放電中の各時間に測定された水素濃度を積算し、前章で述べた方法で mol 数に換算した。

図9に各放電洗浄方法の水素排出能力を第一壁温度 150 °C の場合を例に取り示す。ただし、GDC は放電時間が~2 時間であり、ECRDC の~20 分や TDC の~10 分の放電時間と比べると長い。図には放電時間当りの排出量についても示した。

図10に各放電洗浄方法における水素排出量とトリチウム排出量とを相関させて示す。水素排出量とトリチウム排出量には相関性が認められる。

4.4 GDC における水素排出特性

図 11 に He および Ar を作動ガスとする GDC における排ガス中の水素濃度の時間挙動を、第一壁温度をパラメータにして示す。いずれの温度においても、4.2 節で述べたように放電開始とともに水素の濃度は急激に増加した後減少する。減少速度は初期に大きく、時間とともに小さくなる。なお、Ar-GDC で見られる水素濃度のばらつきは、停止と再着火時の放電の不安定さによる影響である。

図 11 の水素濃度測定値から各々の放電における水素排出量を求めた。図 12 に水素排出量の第一壁温度依存性を示す。He および Ar-GDC のいずれでも、第一壁温度に対しては、室温から 250 °C までは水素排出量は温度に依存して増加するが、300 °C では逆に減少し単なる温度依存性では説明がつかない。温度依存性の他に試験履歴の影響があることが考えられる。すなわち、試験の進行に伴う放電初期条件の変化、つまり壁の水素付着量や付着状態の変化の影響が含まれていると見るべきである。例えば、図 11(a) に示されるように同じ室温の場合でも、一連の放電洗浄試験の初期に行ったもの (図の(1)) と終期に行ったもの (図の(2)) とでは水素の排出濃度は大幅に異なる。排出量も図 12 に示したように両者で異なる。放電洗浄に伴う壁表面の水素付着量の減少だけでなく H₂-ECRDC 時の壁吸収による増加が考えられる。

次に、水素排出の時間挙動について考察してみた。図 11 の測定値に対してフィッティングを行った結果の一例を図 13 に示す。なお、Ar-GDC では放電の不安定さの影響で測定値にばらつきがあるので、このようなデータは除外してフィッティングしている。GDC 時に排出される水素の濃度は、以下のような複数の時間成分の項を持つ式で近似できる。

$$C(t) = C_0 + A_1/t_1 \exp(-t/t_1) + A_2/t_2 \exp(-t/t_2)$$

ここに、 $C(t)$; 時間 t における水素排出濃度

C_0 ; 定数

A_1 ; プロセス 1 による排出可能量

t_1 ; プロセス 1 の時定数

A_2 ; プロセス 2 による排出可能量

t_2 ; プロセス 2 の時定数

上記においてプロセス 1、2 は仮に称したものである。プロセス 1 は表面に吸着した水素の物理スパッタリングによる排出で、結合エネルギーが小さいため小さい時定数で除去される。プロセス 2 は炭素層内の水素の物理スパッタリングによる排出で、除去の時定数が大きいと解釈される。参考までに、トリチウム濃度の測定値に対してフィッティングを行った例を図 14[11] に示す。トリチウムの時間挙動も水素と同様な式で近似できることがわかる。図 15 に時定数 t_1 、 t_2 を第一壁温度の逆数に対してプロットして示す。He-GDC、Ar-GDC いずれの時定数も明瞭な温度依存性は認められない。また、両者で同程度の値である。ばらつきはあるが、平均すると $t_1 \sim 300$ s、 $t_2 \sim 2000$ s で、この値はトリチウムで得られた値[11]に近い。

図 16 には C_0 、 A_1 および A_2 について示したが、これらについては上述の水素排出量の議論と同様に試験履歴の影響があると考えられる。今後より基礎的な試験装置による初期条件の一定した試験を行うことで、GDC における水素の排出特性を定式化でき、核融合炉設計の有益なデータが得られると考えられる。

4.5 炭化水素生成特性

H_2 を作動ガスとする放電における炭化水素生成特性について考察した。

図 17 に H_2 -GDC の場合の排ガス中の炭化水素濃度の時間挙動を、第一壁温度をパラメータにして示す。4.2 節でも述べたように炭化水素濃度は時間とともに定常に近付き、一定の速度で生成していることが推定される。ほぼ定常における炭化水素濃度をアレニウスプロットして図 18 に示す。炭化水素の生成は温度依存性を有することがわかる。ちなみに活性化エネルギーはおよそ 6~9 kJ/mol で、これは通常の気固反応の活性化エネルギー[12]と同程度である。図 19 に炭化水素の組成を示す。 CH_4 と C_2H_n の比は放電の種類、第一壁温度および時間で変化するが、 H_2 -GDC の定常状態ではおよそ 5 : 2 である。 H_2 -ECRDC および H_2 -TDC についてはデータが十分でなく明確なことは言えない。図 20 に作動ガスである H_2 の供給量に対する炭化水素の生成率を、3 種の放電において測定値の得られた C_2H_2 and/or C_2H_4 を例にとって示す。3 種の放電の中では H_2 -GDC の炭化水素の生成量が大きいことがわかる。生成率で比較すると H_2 -ECRDC および H_2 -TDC が大きいことがわかる。

4.6 放電洗浄による炭素消費量の評価

ITER では、炭素再堆積層に共堆積して蓄積したトリチウムの除去が運転上のクリチカルな課題となっている。上述のように水素を作動ガスとする放電洗浄では炭化水素が生成し、それにとまって炭素が消費される。放電洗浄試験で測定された炭化水素生成量をベースに炭素の反応量を評価した。評価の前提条件として、試験で最も炭化水素の生成量の多かった H_2 -GDC の以下のデータを使用することとする。

第一壁温度 300 °C のケース

H_2 作動ガス供給量 ; ~1.3 mmol/s

炭化水素の生成量 ; 2.1 μ mol/s

内訳 ; CH_4 : 1.4 μ mol/s (排出濃度 ~50 ppm)

C_2H_2 and/or C_2H_4 : 0.6 μ mol/s (同上 ~20 ppm)

C_2H_6 : 0.09 μ mol/s (同上 ~3 ppm)

これから炭素の反応速度は 2.8 μ mol/s と評価された。これは 1 時間の GDC 当り 0.12g の炭素の消費で、JT-60U の内面から均等に炭素が除去されると仮定すると、単分子層程度に相当する。なお、JT-60U の第一壁の表面積は ~200 m^2 である。JT-60U の炭素再堆積層のみに着目すると、実測された面積は ~1 m^2 である。また、実測された炭素再堆積層の平均厚さは ~50 μ m (ダイバータ領域) である。

5. 結 言

放電洗浄中の真空容器内からの排ガスの組成を調べることは、水素同位体の除去特性の評価のための基本的な事項であるとともに、核融合炉の燃料サイクルシステム設計上有益なデータとなる。とくに水素の排出には炭素層にトラップされた水素の化合物の形での放出などが重要であり、排出化学種の分析、炭素および酸素排出の測定が重要な知見となる。そこで、これら化学種の分析法の確立を目的として、JT-60U で行われた放電洗浄試験において、ガスクロマトグラフを用いて真空容器から排出される水素、炭化水素等の化学種の濃度およびそれらの時間挙動を分析した。放電洗浄試験では、放電洗浄方法としてグロー放電洗浄（GDC）、テイラー放電洗浄（TDC）および電子サイクロトロン共鳴放電洗浄（ECRDC）を、また、主な試験パラメータとして真空容器の第一壁温度（室温～300 °C）と放電用の作動ガス He、Ar、H₂を用いた。

分析の結果、排ガスからは水素、炭化水素その他が検出された。第一壁温度が高いほど、また洗浄方法では GDC において、化学種が増加する傾向が見られた。排出能力は GDC が最も高く TDC と ECRDC では低く、別途測定されたトリチウムの排出との相関が認められた。

炭化水素の化学種としてメタン、エチレン、アセチレンおよびエタンが検出された。炭化水素は第一壁の炭素材と水素との反応により生成するものと考えられ、その生成量は H₂ を作動ガスとして用いた GDC で大きく、また第一壁温度に依存する。ITER の重要課題であるトリチウム炭素共堆積層の除去への適用の観点から、反応に伴う炭素消費量を評価し、今回の試験条件での炭素の損耗は GDC 1 時間当たり単一層を除去する程度であることがわかった。

謝 辞

放電洗浄試験の実施に当たっては核融合装置試験部、炉心プラズマ研究部、核融合工学部他の JT-60 チームの多くの方々の協力を頂いた。また、本研究は原研—大学間協力研究の一環として実施されたものであり、日本原子力学会「核融合炉材料中における水素同位体挙動」研究専門委員会の委員他の方々からは貴重な討論、御意見を賜った。ここに感謝します。

参考文献

- [1] G. Federici, R. Anderl, J. N. Brooks, R. Causey, J. P. Coad, et al., Tritium inventory in the ITER PFC's: Predictions, uncertainties, R&D status and priority needs, *Fusion Eng. and Des.*, 39-40, 445 (1998).
- [2] G. Federici, C. H. Skinner, J. N. Brooks, J. P. Coad, C. Grisolia, et al., Plasma-material interaction in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors, *Nucl. Fusion*, 41, 1967 (2001).
- [3] 「核融合炉材料中における水素同位体挙動」研究専門委員会終了報告, 日本原子力学会誌, 45, 432 (2003).
- [4] Y. Oya, Y. Hirohata, Y. Morimoto, H. Yoshida, H. Kodama, et al., Hydrogen isotope behavior in in-vessel components used for DD plasma operation of JT-60U by SIMS and XPS technique, *J. Nucl. Mater.*, 313-316, 209 (2003).
- [5] K. Tobita, S. Nishio, S. Konishi, M. Sato, T. Tanabe, et al., First wall issues related with energetic particle deposition in a tokamak fusion power reactor, *Fusion Eng. and Des.*, to be published.
- [6] A. A. Haasz and J. W. Davis, The removal of codeposited layers from TFTR tiles by O₂ gas exposure, *J. Nucl. Mater.*, 256, 65 (1998).
- [7] W. M. Shu, Y. Kawakubo, K. Masaki and M. F. Nishi, Ablative removal of codeposits on JT-60 carbon tiles by an excimer laser, *J. Nucl. Mater.*, 313-316, 584 (2003).
- [8] 東島智、JT-60 チーム, JT-60U における第一壁コンデショニング不純物および水素リサイクリングの制御ー, *プラズマ・核融合学会誌*, 75, 1297 (1999).
- [9] 日本機械学会, 伝熱工学資料, 改訂第4版, 丸善, 328 (1986).
- [10] 日本機械学会, 流体の熱物性値集, 日本機械学会 (1983).
- [11] H. Nakamura et al., private communication.
- [12] 日本化学会, 化学便覧基礎編, 改訂3版, 丸善, II 428 (1984)

表1 ガスクロマトグラフの分析条件

チャンネル	A	B
カラム仕様	Molecular Sieve 5A 10 m	PoraPLOT Q 8 m
カラム温度 (°C)	60	70
キャリアガス	Ar	He
キャリアガス導入圧力 (psi)	~30	~30
サンプリング時間 (s)	30	30
試料注入時間 (ms)	30	100
ランタイム (s)	85	85
サンプリング間隔 (s)	120	120
増幅率	medium (10 倍)	high (100 倍)

表2 校正用標準ガスの成分一覧

- ① H₂; 1030 ppm, CH₄; 1020 ppm, C₂H₆; 1010 ppm, C₃H₈; 1040 ppm, N₂; balance
- ② H₂; 1040 ppm, He; 1040 ppm, CO₂; 1020 ppm, O₂; 1010 ppm, N₂; balance
- ③ He; 1010 ppm, Ne; 989 ppm, Ar; 1060 ppm, Kr; 1000 ppm, Xe; 1000 ppm, N₂; balance
- ④ H₂; 103 ppm, CH₄; 101 ppm, C₂H₆; 100 ppm, C₃H₈; 101 ppm, N₂; balance
- ⑤ H₂O; 315 ppm, N₂; balance
- ⑥ H₂; 199.9 ppm, He; 201.7 ppm, CH₄; 199.9 ppm, C₂H₄; 199.6 ppm, N₂; balance
- ⑦ H₂; 199.5 ppm, He; 202.8 ppm, CO₂; 50.1 ppm, C₂H₂; 49.3 ppm, N₂; balance
- ⑧ He; 200.7 ppm, CO₂; 25.24 ppm, C₂H₂; 24.65 ppm, C₂H₄; 100.0 ppm, N₂; balance
- ⑨ H₂; 24.94 ppm, He; 25.12 ppm, CH₄; 25.06 ppm, C₂H₄; 24.96 ppm, N₂; balance

表3 検出化学種とそのクロマトグラム上のピークの位置
(リテンションタイム)

(a) Aチャンネル

化学種	RT1 (s)	RT2 (s)	備 考
Ne	~20		Heとピークが近接し共存時は弁別困難。
He	20.4	26.4-26.5	
H ₂	21.0-21.4	28.0	
O ₂	24.3-25.0	36.0-37.0	
N ₂	26.1-26.6	40.4-42.3	
Kr	34.6		負のピーク
CH ₄	36.4-38.0	67.0-67.7	
Xe	105.5		負のピーク

(b) Bチャンネル

化学種	RT1 (s)	RT2 (s)	備 考
H ₂ , Ne, Ar, O ₂ , N ₂	20.7-21.3	~21	これらはピークが近接し共存時は弁別困難。
CH ₄	22.7-23.1	22.3-22.5	
Kr	23.5		
CO ₂	25.8-26.1	25.8-25.9	
妨害ピーク	26.3-26.4		微小な負のピーク
Xe	32.4		
C ₂ H ₂		31.7	C ₂ H ₂ とC ₂ H ₄ はピークが近接し共存時は弁別困難。
C ₂ H ₄		32.2	同上
C ₂ H ₆	37.5-38.0	37.2	
H ₂ O	42.8-45.0		低濃度では妨害ピークにキャンセルされる。
妨害ピーク	43.4-44.2		負のピーク
C ₃ H ₈	105.2-105.8	103.7-104.1	

注記) RT1 : '02. 4. 5校正時のリテンションタイム (Aチャンネルのカラム破損による交換前)

RT2 : '03. 1. 24校正時のリテンションタイム (同上後)

表4 ガスクロマトグラフによる濃度測定値から得た排出量と注入量の比較

shot No.	水素			He		
	排出量 (Ncm ³)	注入量 (Ncm ³)	比率 (%)	排出量 (Ncm ³)	注入量 (Ncm ³)	比率 (%)
E41726	8.8	355	2.5	2.2	0	—
E41727	9.9	111	8.9	8.4	9.9	85
E41728	2.4	156	1.5	0.13	0	—
E41729	2.7	186	1.5	0.48	0	—
E41730	3.8	212	1.8	0.23	0	—
E41731	3.8	388	1.0	0.13	0	—
E41732	2.3	110	2.1	0.04	0	—
E41733	3.1	10.9	28	0	0	—
～						
He-TDC	32	0	—	416	415	100
～						
E41758	7.7	112	6.9	0.14	0	—
E41759	8.5	126	6.7	0.06	0	—
E41760	7.3	112	6.5	0.01	0	—
E41761	6.6	144	4.6	0.08	0	—
E41762	10.9	124	8.8	0.06	0	—

表5 放電洗浄試験において排ガス中に検出された化学種

(a) 第一壁温度：室温

working gas	He	Ar	H ₂	remarks
gas flow	—	—		
ECRDC	—	—		
TDC	—	hydrogen		
GDC	hydrogen	hydrogen methane acetylene and/or ethylene helium	methane	

(b) 第一壁温度：150 °C

working gas	He	Ar	H ₂	remarks
gas flow	—	—		
ECRDC	—	/	methane acetylene and/or ethylene CO ₂ *	*after discharge finished.
TDC	hydrogen	hydrogen	methane acetylene and/or ethylene	
GDC	hydrogen methane acetylene and/or ethylene	hydrogen methane acetylene and/or ethylene helium	methane acetylene and/or ethylene	

(c) 第一壁温度：250 °C

working gas	He	Ar	H ₂	remarks
gas flow	hydrogen (BG level)	hydrogen (BG level)		
ECRDC	hydrogen	/	methane acetylene and/or ethylene ethane*	*rare case
TDC	/	hydrogen	methane acetylene and/or ethylene	
GDC	hydrogen methane acetylene and/or ethylene ethane	hydrogen methane acetylene and/or ethylene helium	methane acetylene and/or ethylene ethane	

(d) 第一壁温度：300 °C

working gas	He	Ar	H ₂	remarks
gas flow	hydrogen (BG level)	hydrogen (BG level)		
ECRDC	hydrogen	hydrogen methane* acetylene and/or ethylene*	methane acetylene and/or ethylene ethane**	*next of H ₂ -ECRDC **rare case
TDC	hydrogen	hydrogen	methane acetylene and/or ethylene	
GDC	hydrogen methane acetylene and/or ethylene	hydrogen methane acetylene and/or ethylene helium	methane acetylene and/or ethylene ethane	

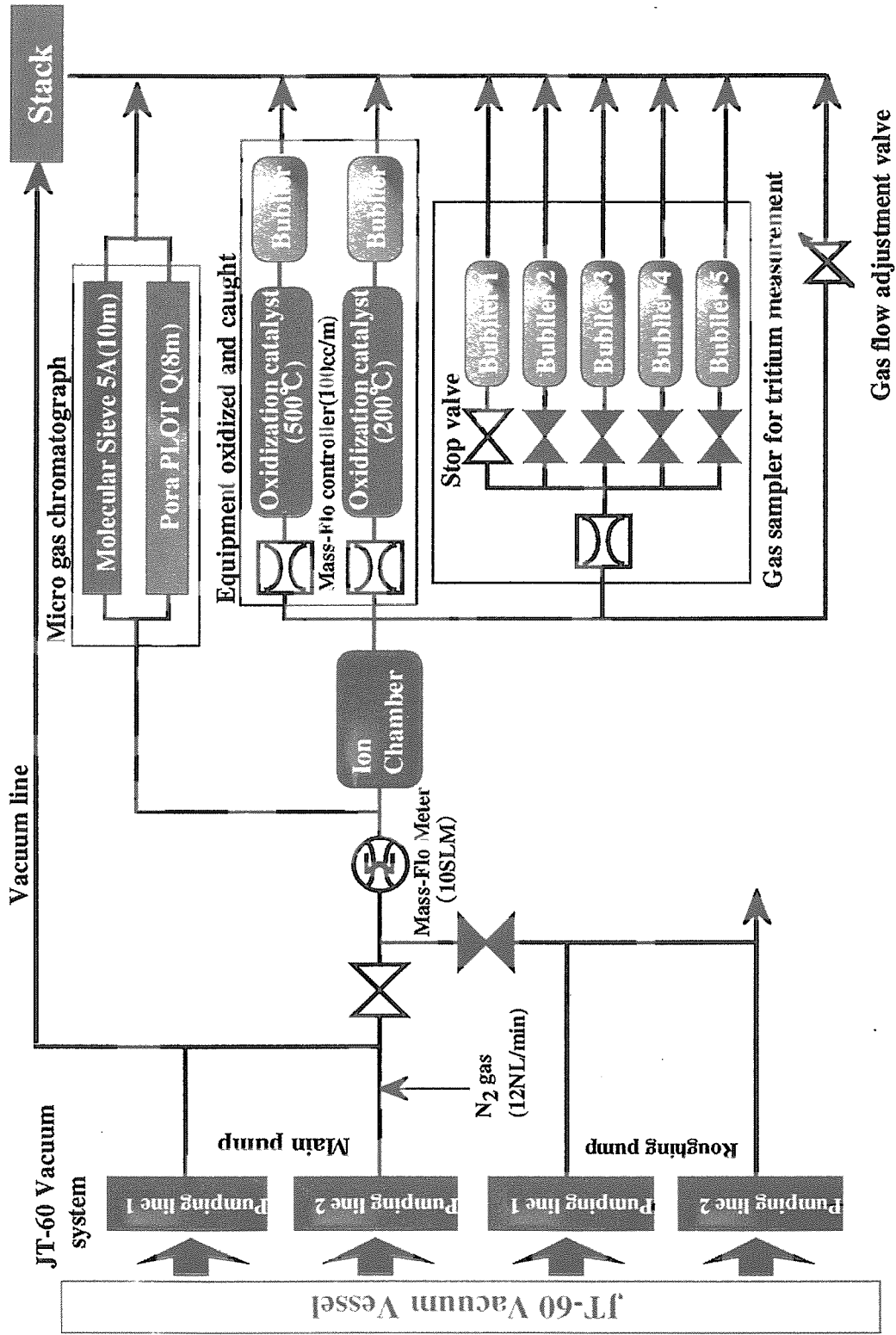


図1 JT-60U 排ガス分析装置の系統図

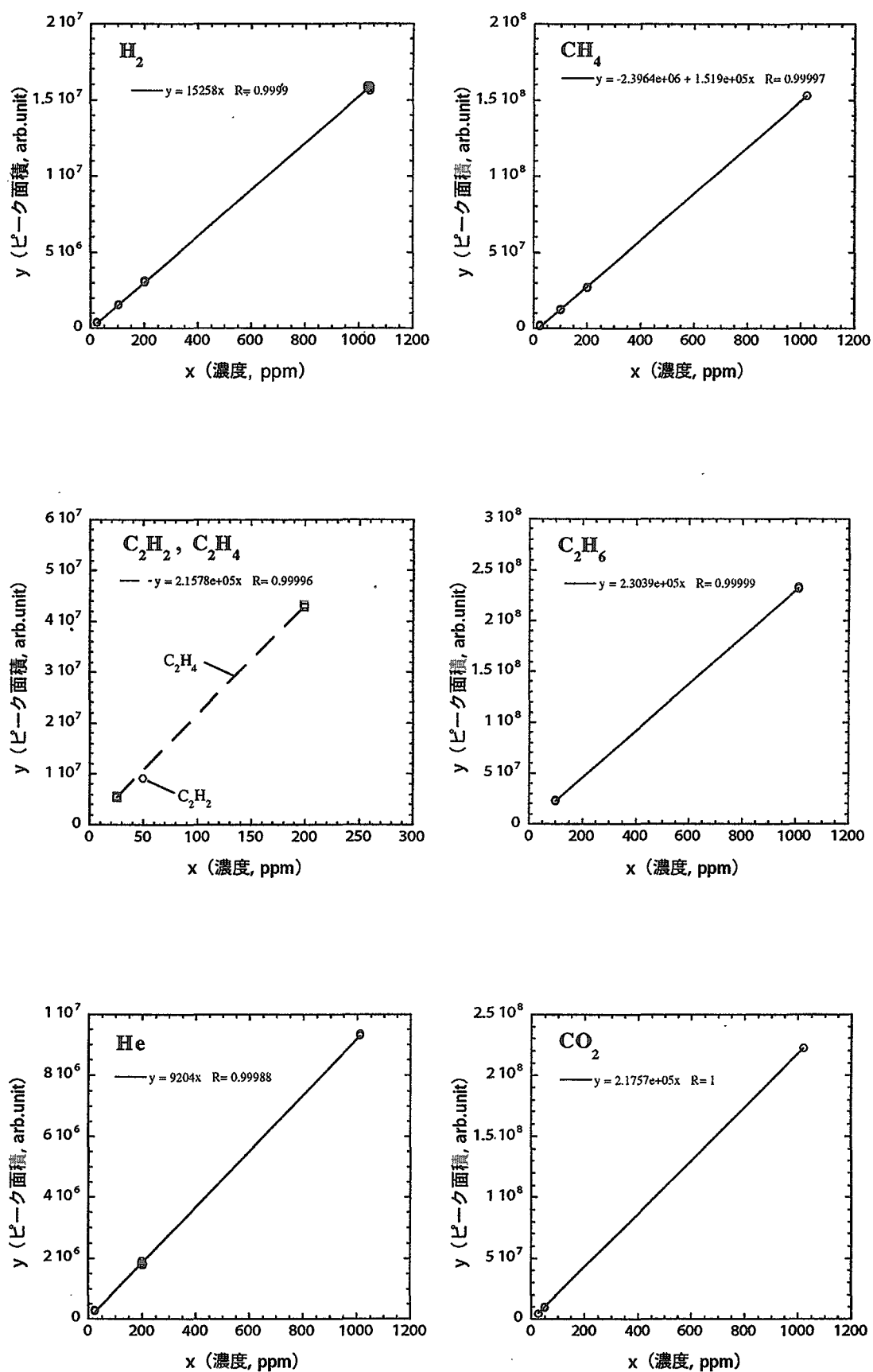


図2 化学種の濃度とクロマトグラム上のピーク面積の相関

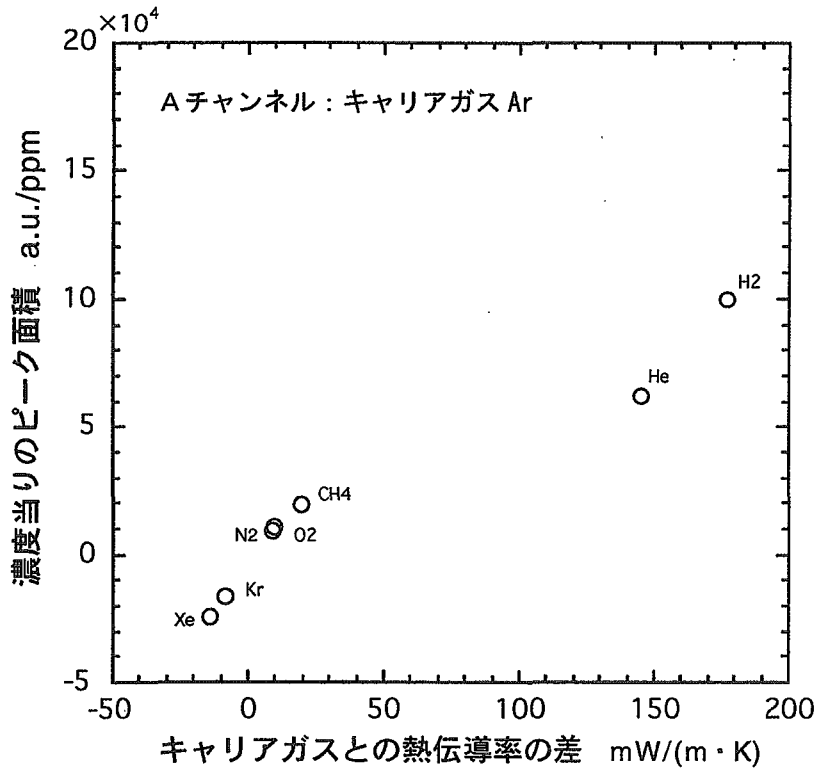


図3 ガスクロマトグラフの感度とキャリアガスとの熱伝導率の差の相関

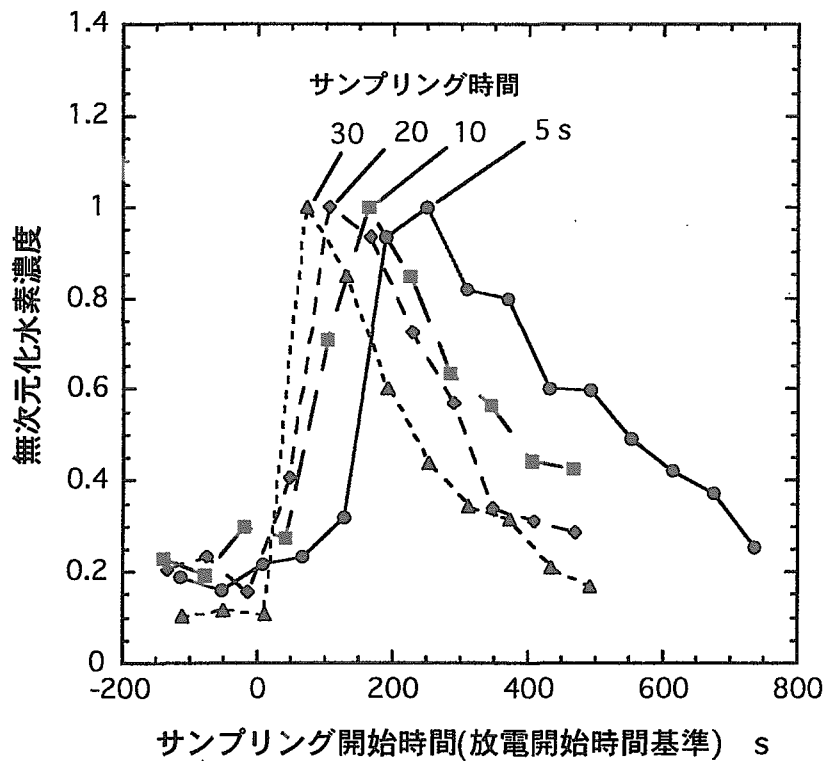
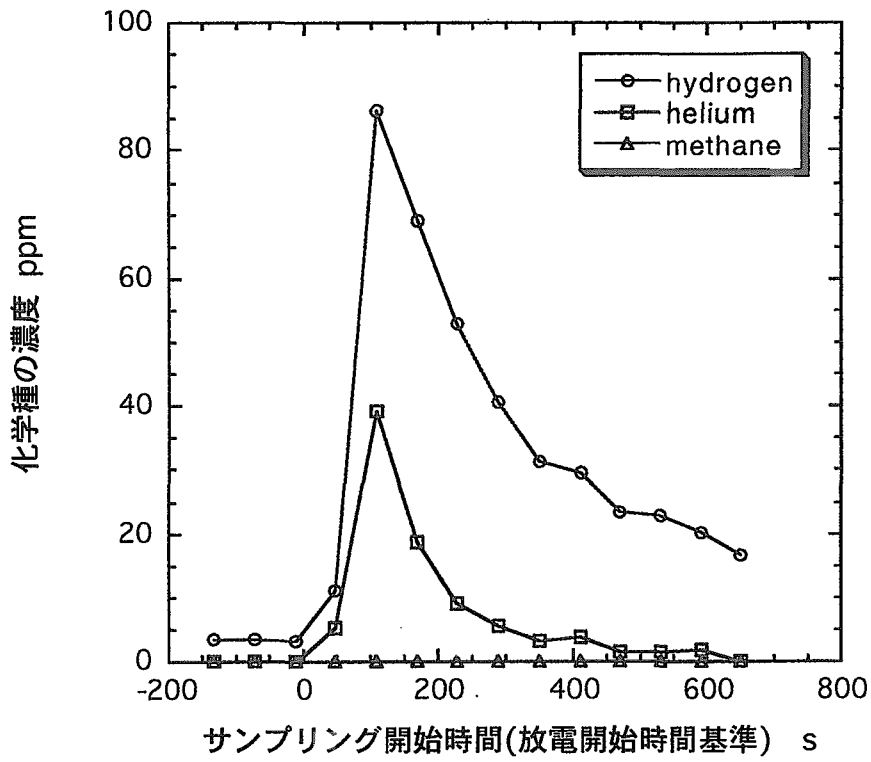
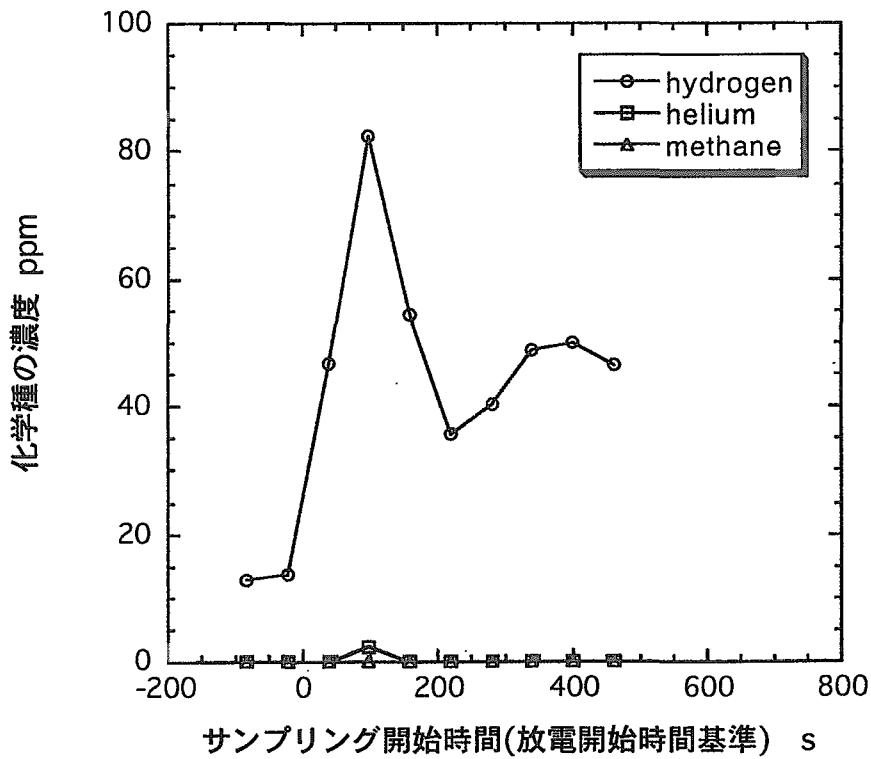


図4 サンプリング時間をパラメータとした時の水素濃度測定値の時間変化 (トカマク放電, サンプリング間隔 60 s)

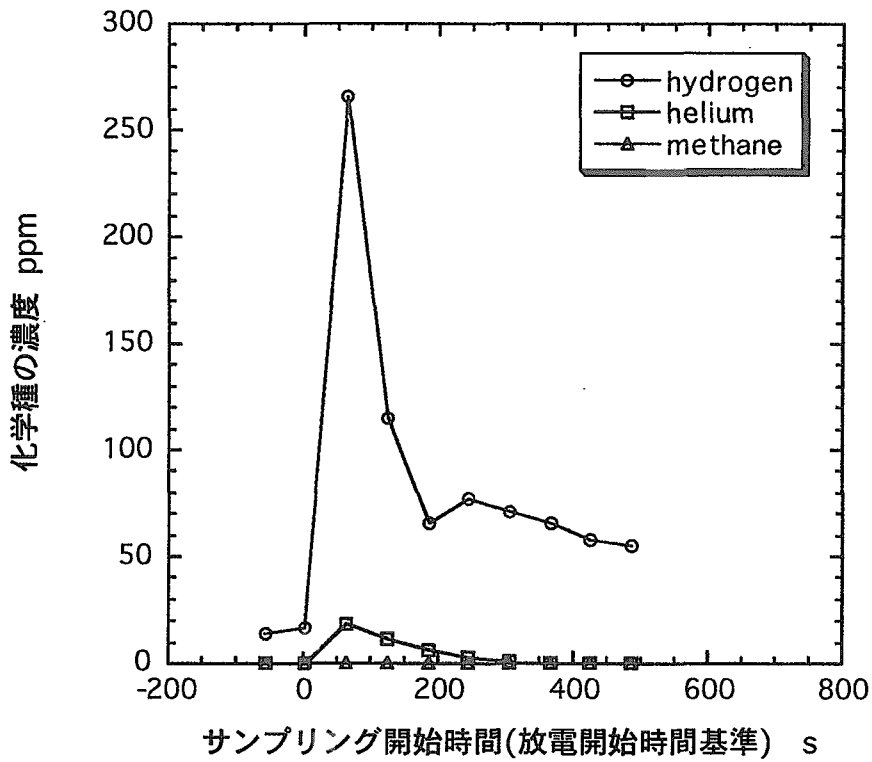


(a) トカマク放電 E41726

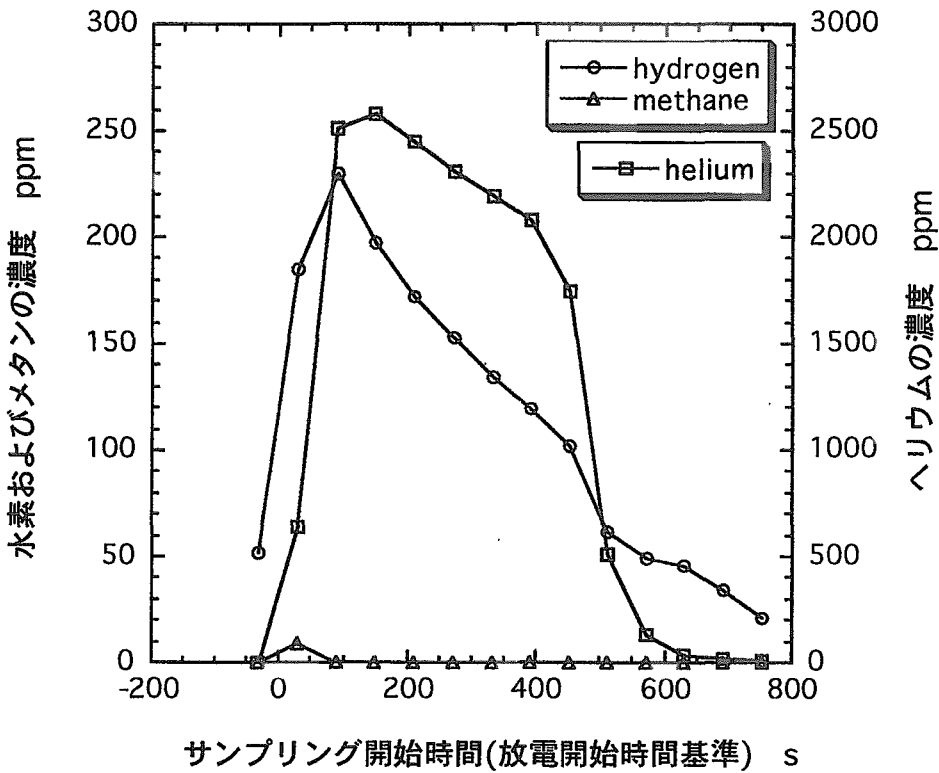


(b) トカマク放電 E41734 (ディスラプション発生)

図 5-1 放電実験での予備分析例 (その1)

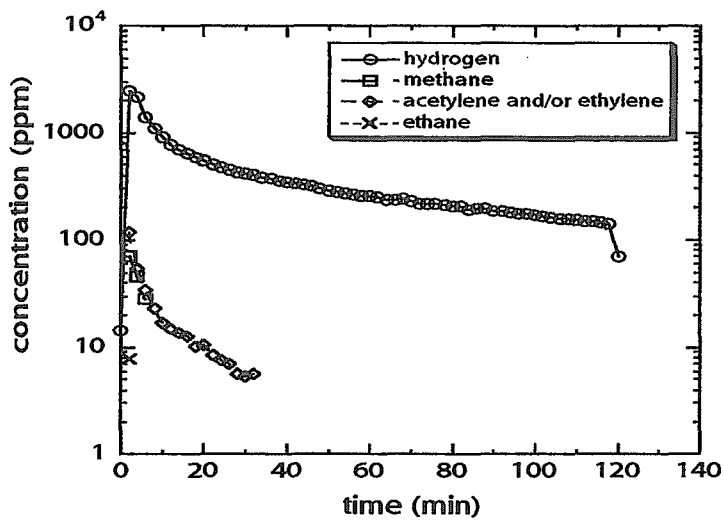


(c) トカマク放電 E41738 (ディスラプション発生)

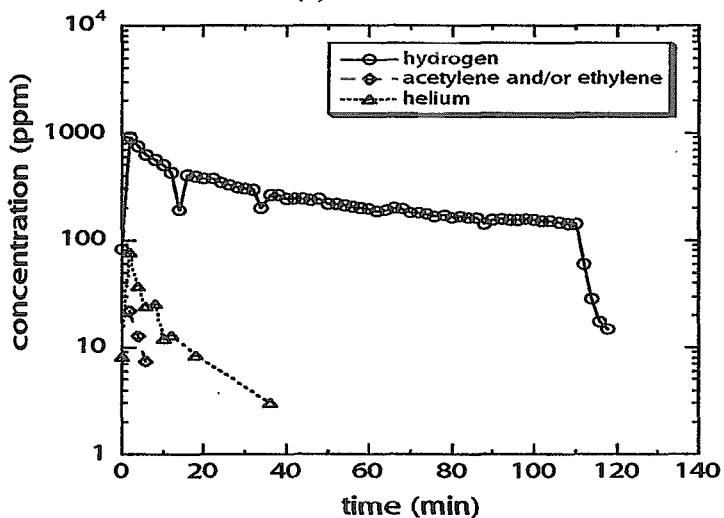


(d) He によるテイラー放電洗浄 (E41738 後、6 分間)

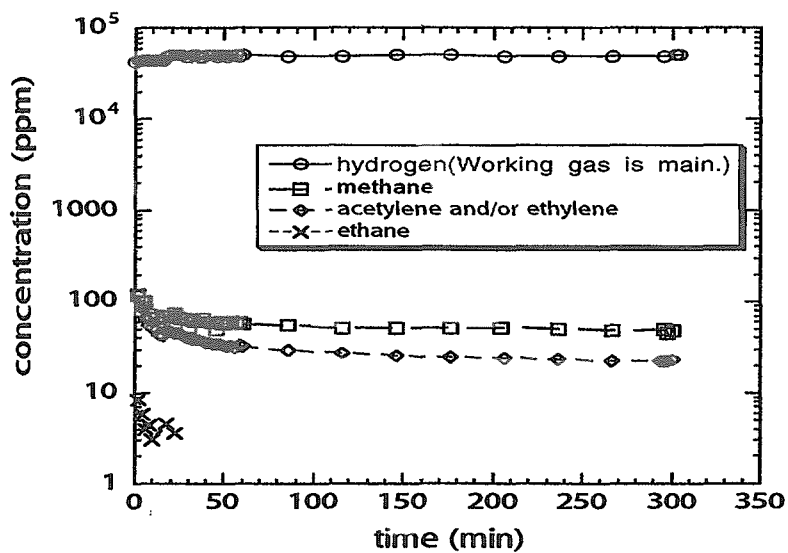
図 5-2 放電実験での予備分析例 (その 2)



(a) He-GDC

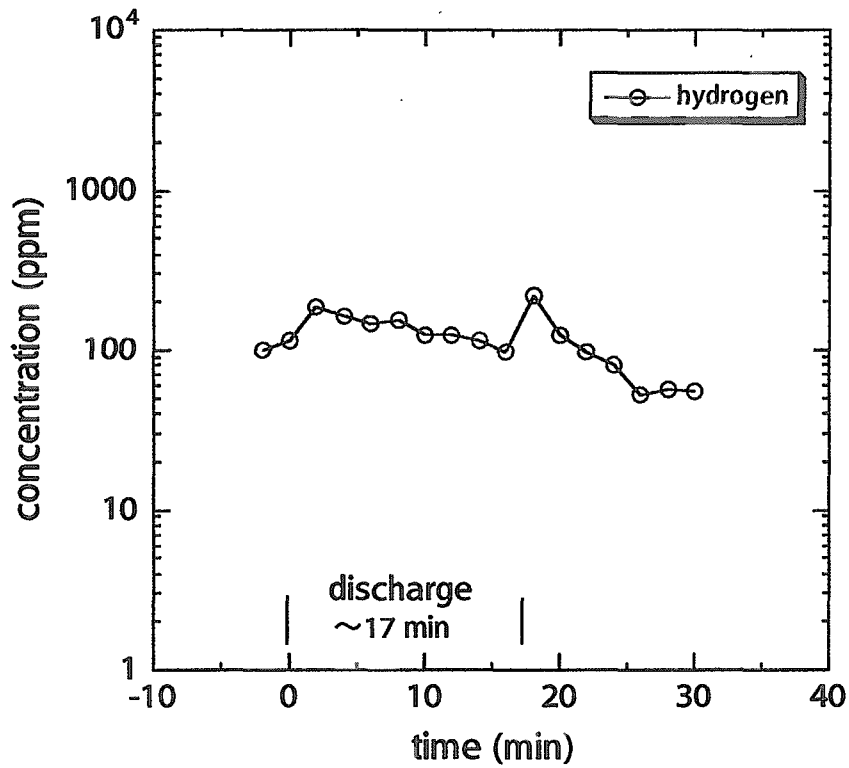


(b) Ar-GDC

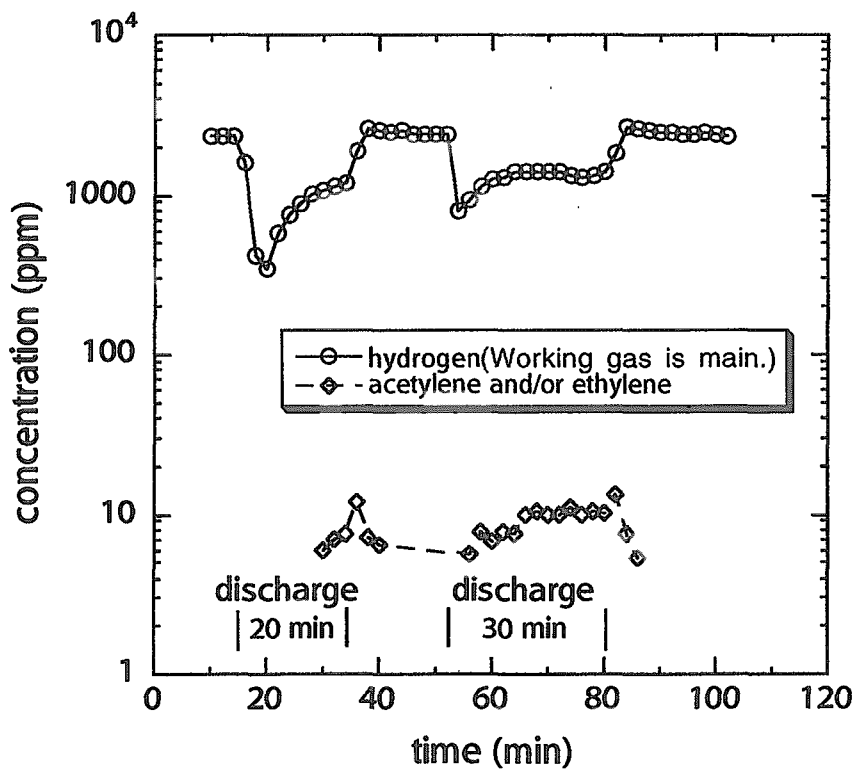


(c) H₂-GDC

図6 GDC 時の排ガス中の化学種濃度の時間変化例 (第一壁温度 250 °C).

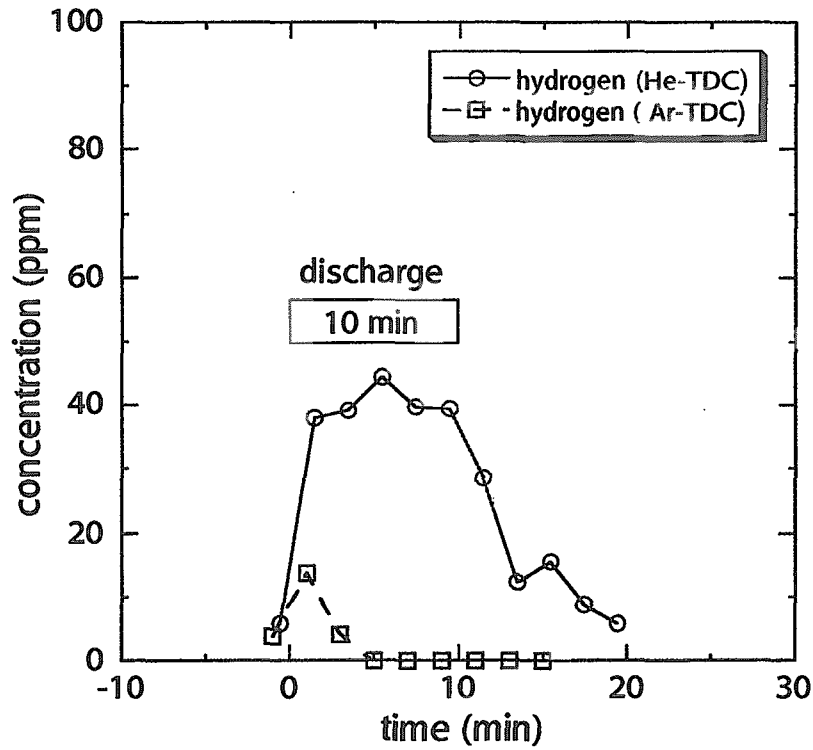


(a) Ar-ECRDC

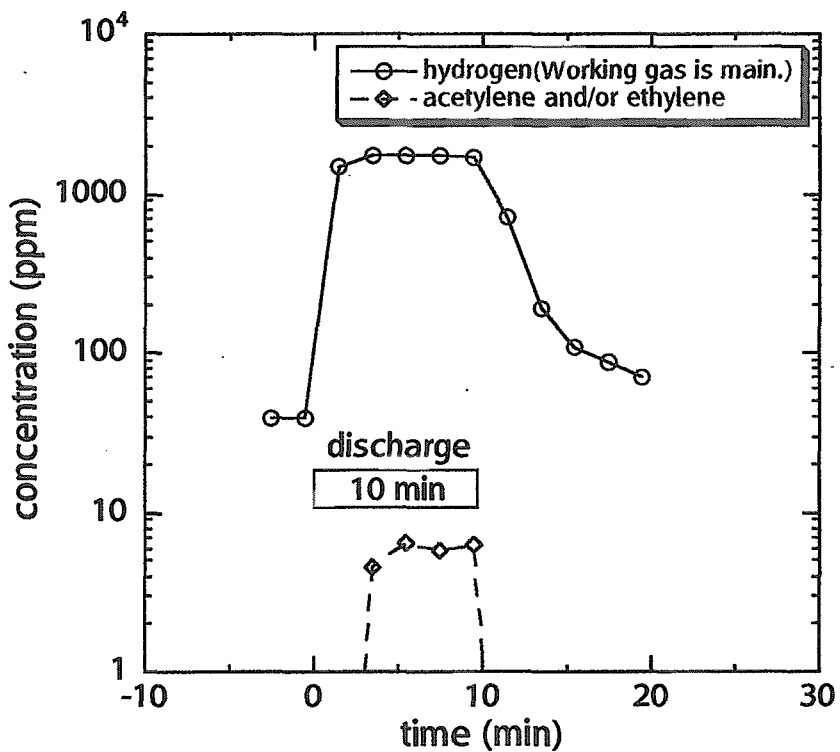


(b) H₂-ECRDC

図7 ECRDC 時の排ガス中の化学種濃度の時間変化例 (第一壁温度 300 °C)



(a) He および Ar-TDC (第一壁温度 150 °C)



(b) H₂-TDC (第一壁温度 300 °C)

図 8 TDC 時の排ガス中の化学種濃度の時間変化例

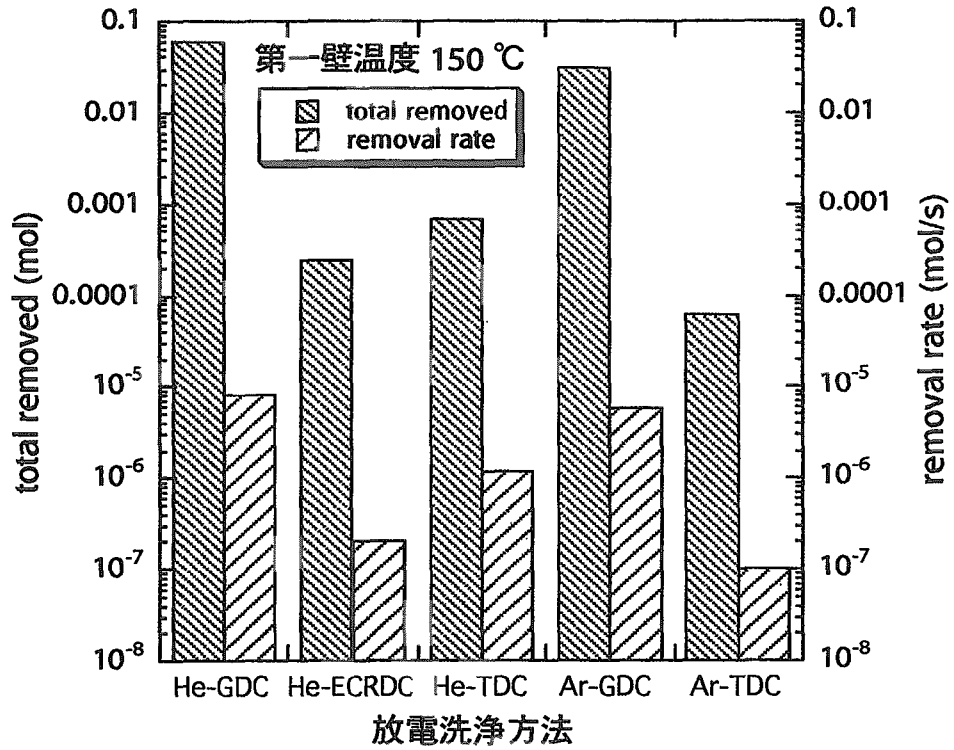


図9 各放電洗浄方法の水素排出能力の比較

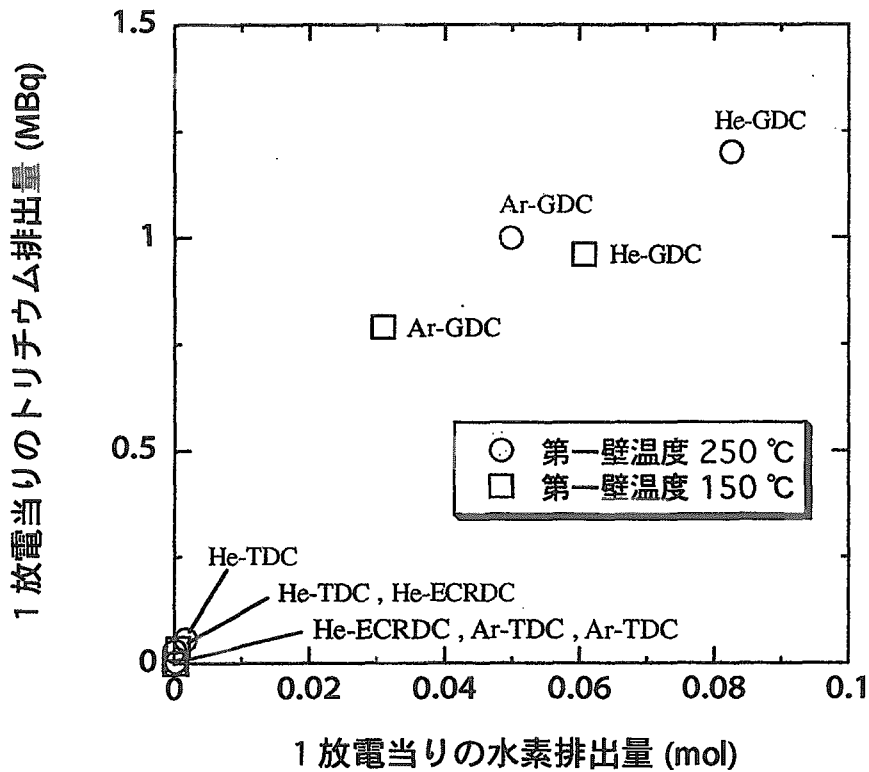
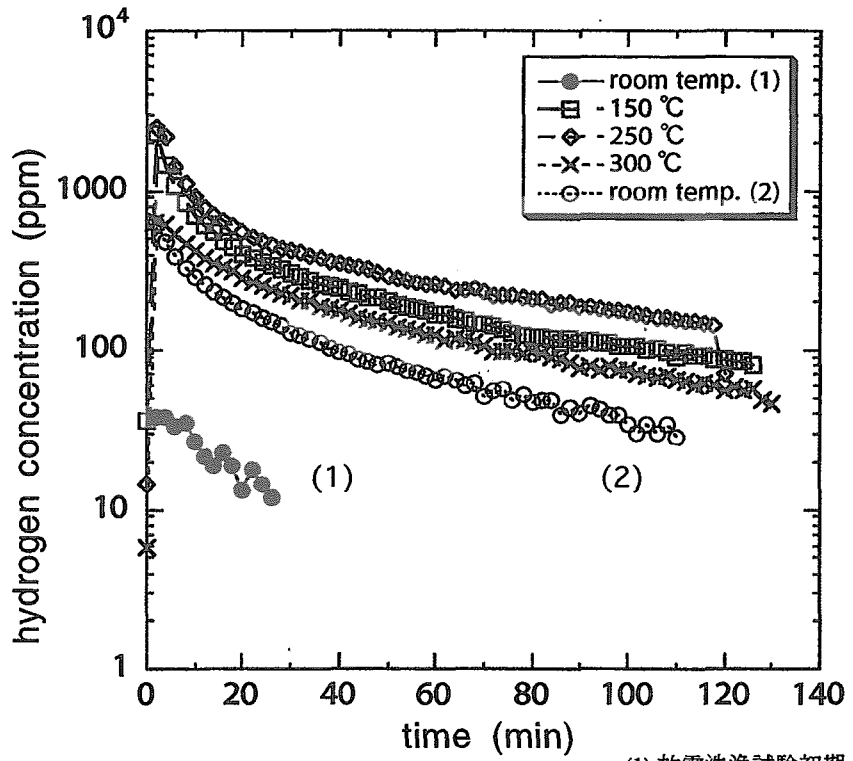
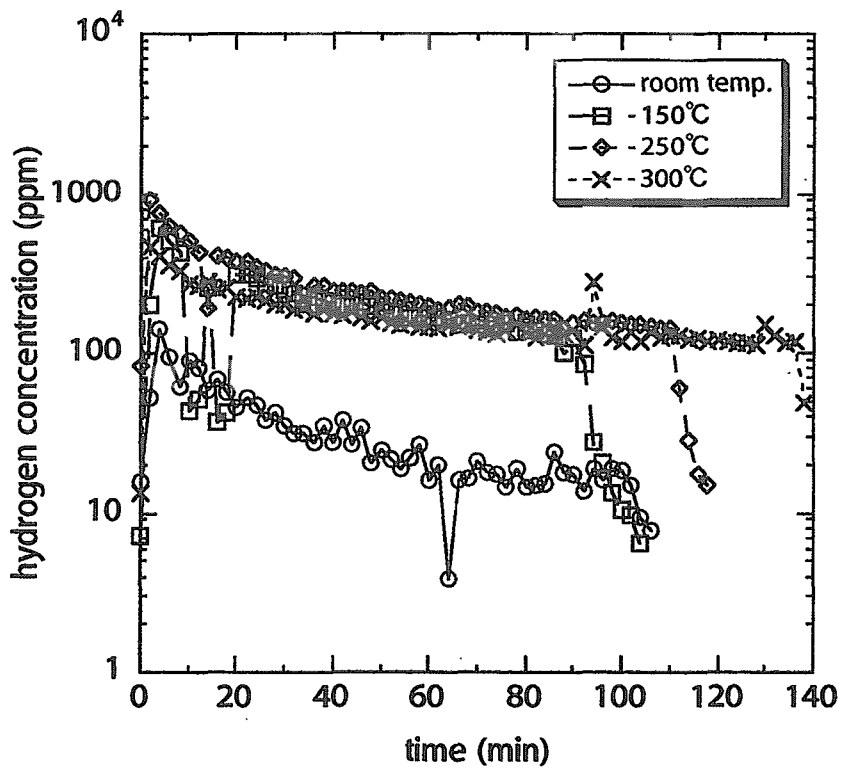


図10 水素排出とトリチウム排出の相関性



(1) 放電洗浄試験初期
(2) 放電洗浄試験終期
(a) He-GDC



(b) Ar-GDC

図 11 He および Ar-GDC における水素排出挙動 (第一壁温度パラメータ)

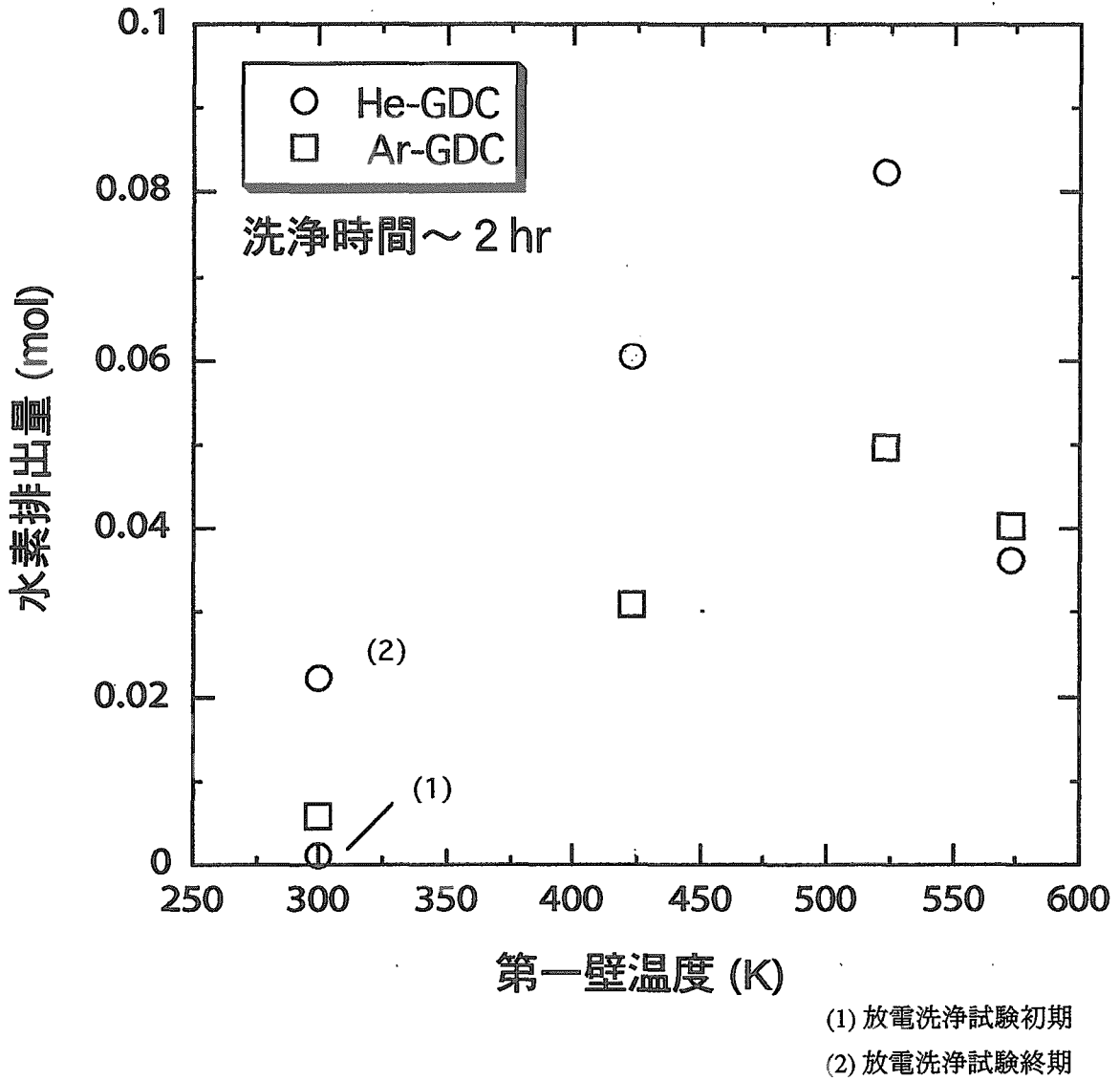
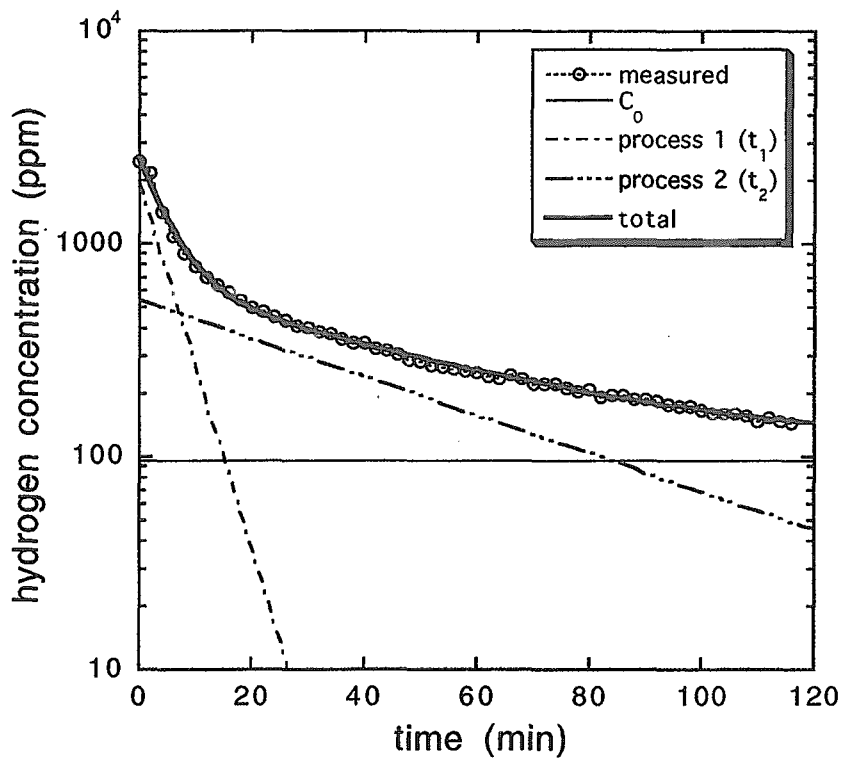
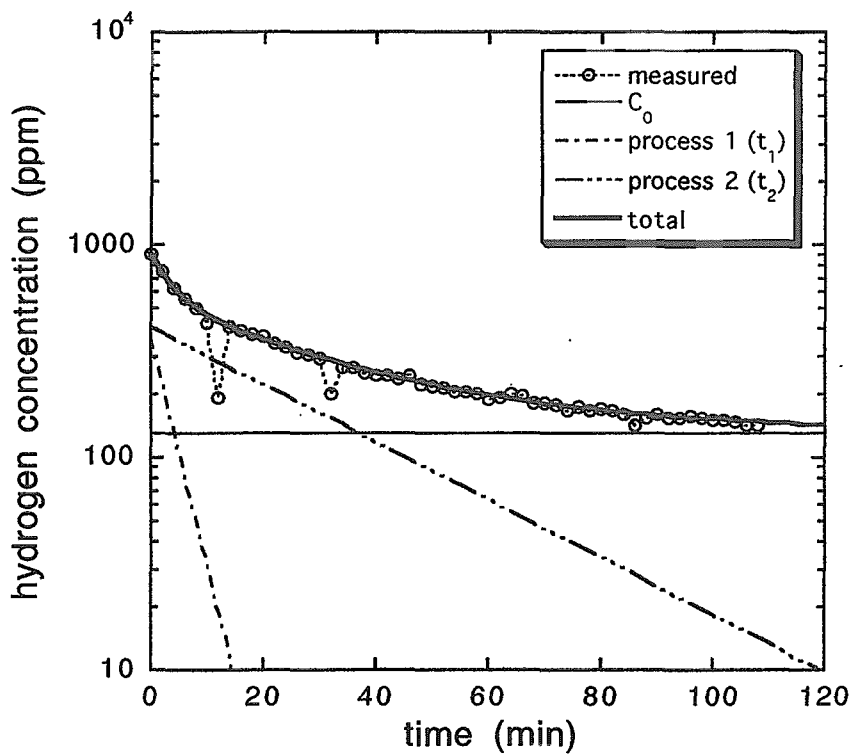


図 12 He および Ar-GDC における水素排出量の第一壁温度依存性



(a) He-GDC (第一壁温度 250 °C の例)



(b) Ar-GDC (第一壁温度 250 °C の例)

図 13 He および Ar-GDC における水素排出挙動のフィッティング

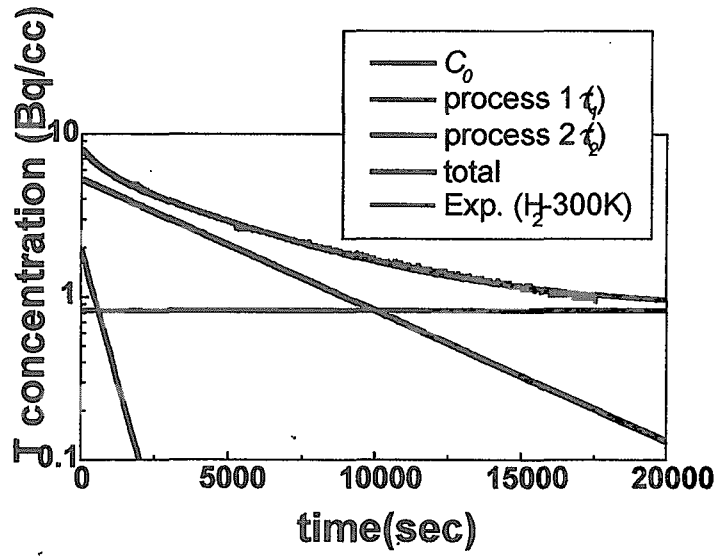


図 14 GDC におけるトリチウム排出挙動のフィッティング例 [文献 11 より]

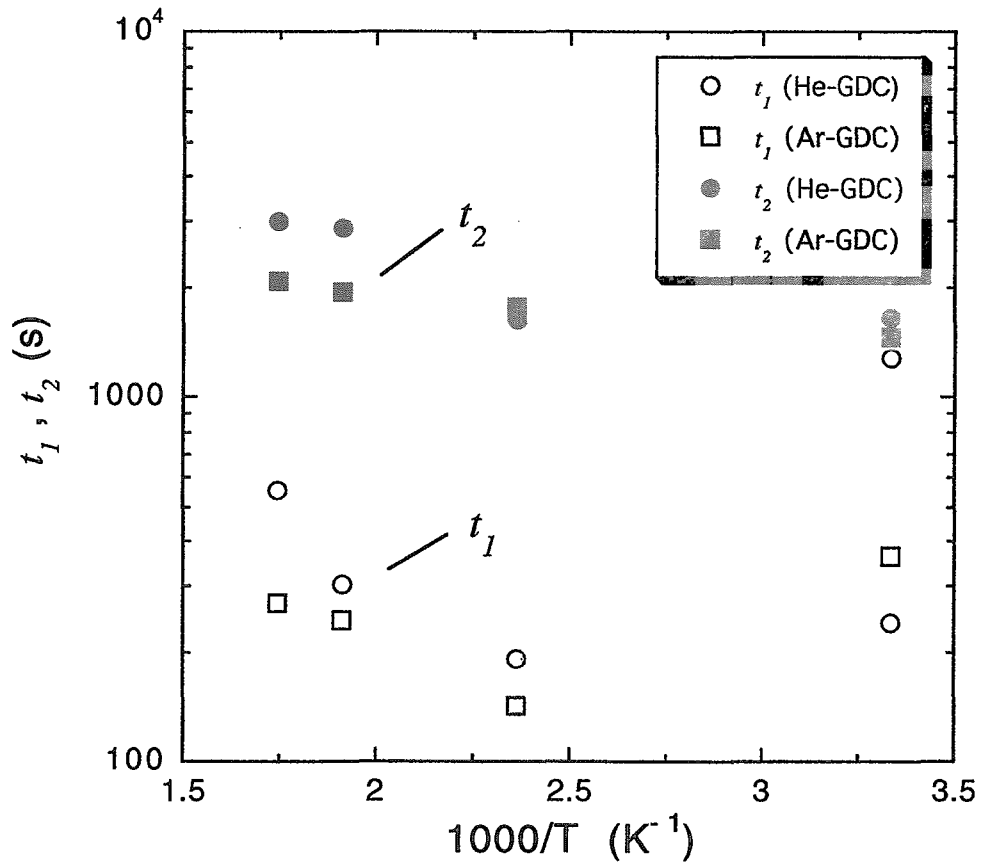
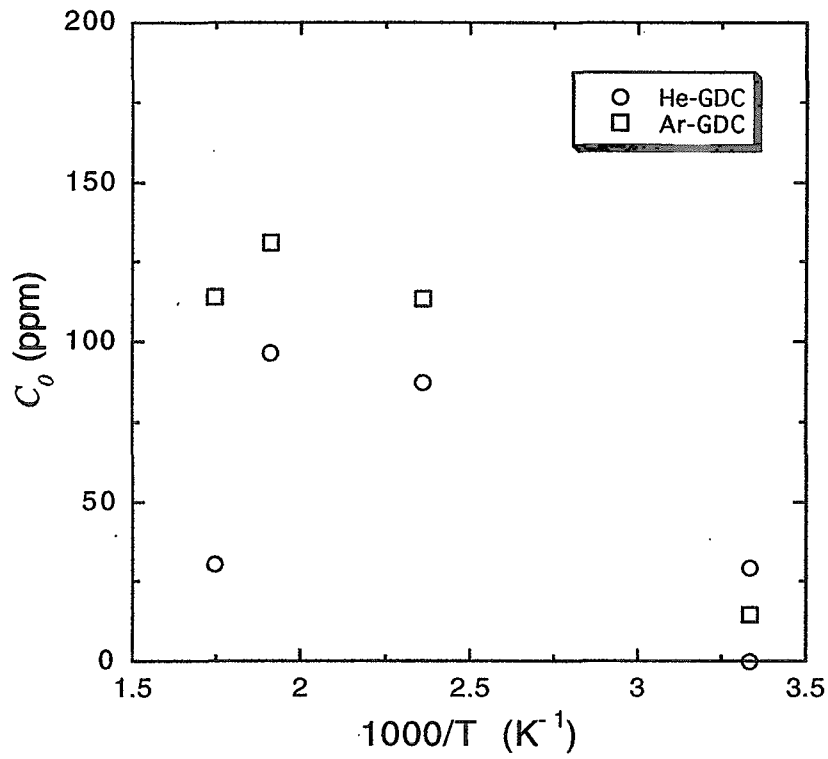
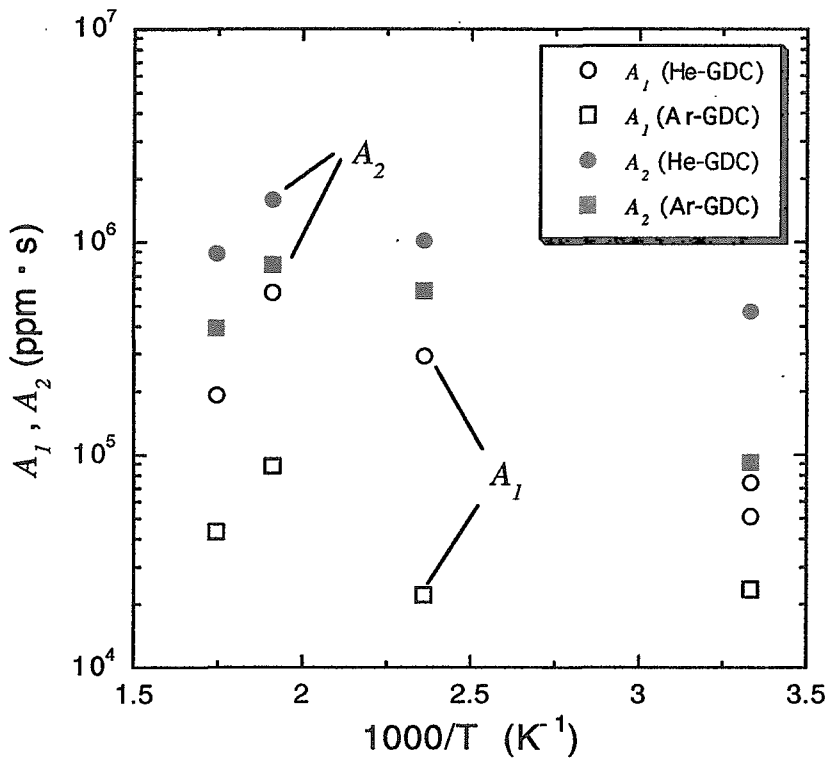


図 15 時定数 t_1 、 t_2 の第一壁温度依存性



(a) C_0



(b) A_1, A_2

図 16 C_0, A_1, A_2 の第一壁温度依存性

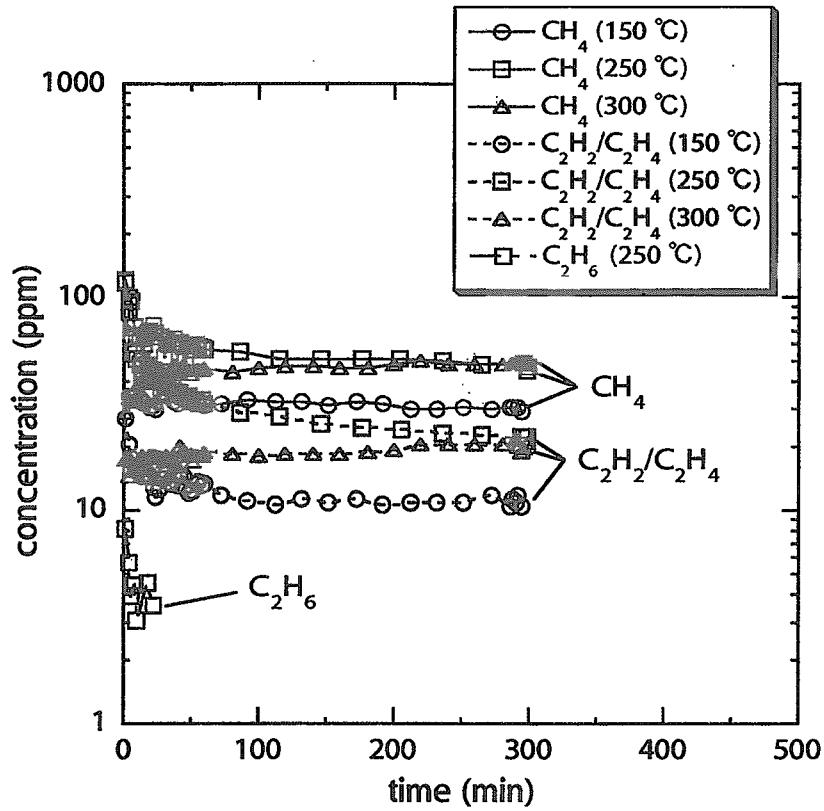


図 17 H₂-GDC における炭化水素生成挙動 (第一壁温度パラメータ)

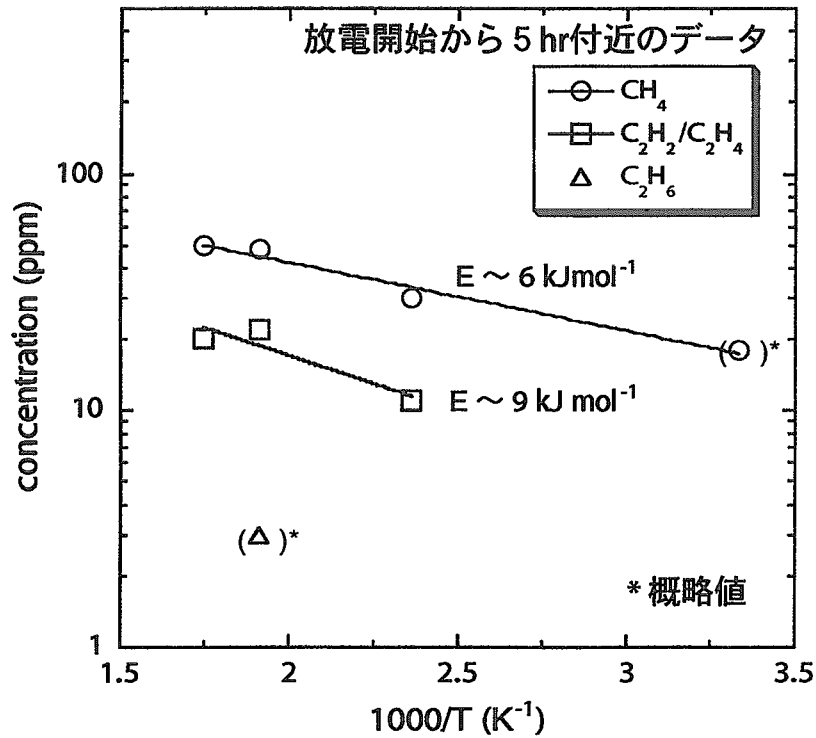


図 18 炭化水素生成の第一壁温度依存性

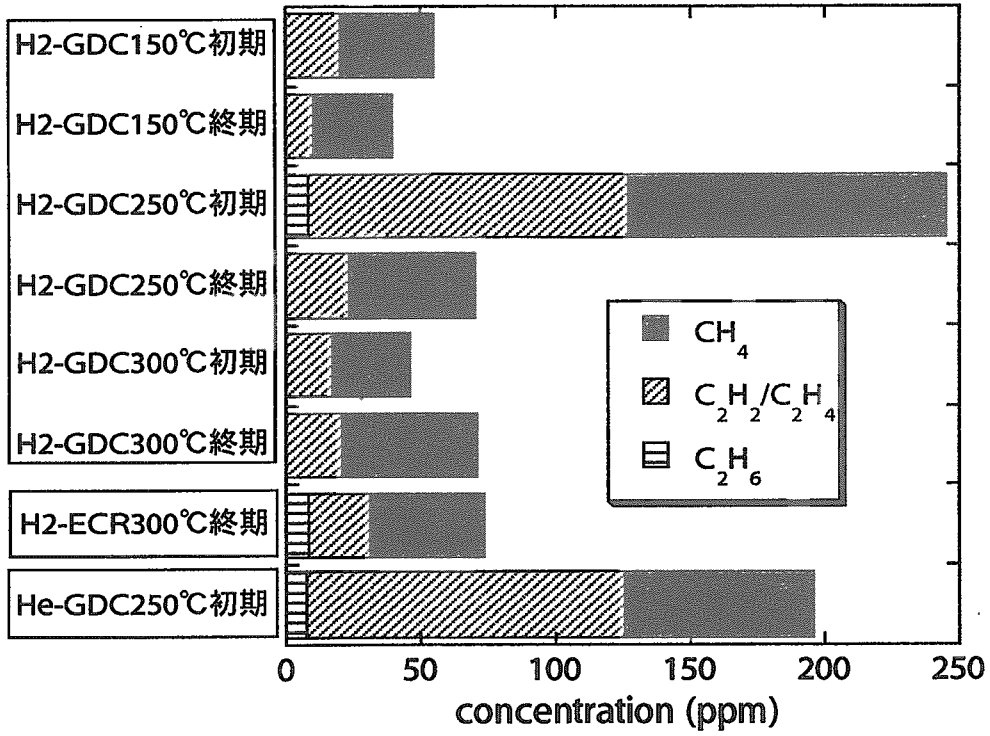


図 19 生成する炭化水素の組成

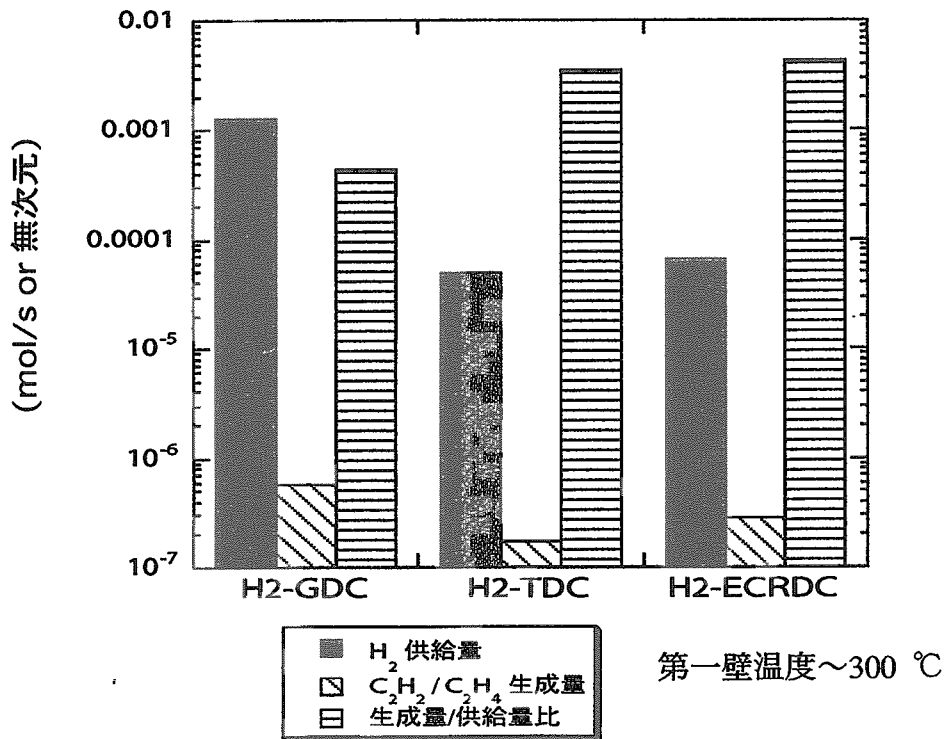


図 20 作動ガスの H_2 の供給に対する炭化水素 (C_2H_2 and/or C_2H_4) 生成の比率

This is a blank page.

付 録

図 2 ～図 13、図 15～20 の各図のもととなる数値データを末尾にまとめた。

This is a blank page.

	A	B
0		
1	24.940	3.8600e+05
2	24.940	3.7600e+05
3	24.940	3.7500e+05
4	103.00	1.5030e+06
5	103.00	1.5370e+06
6	103.00	1.5660e+06
7	199.50	3.0600e+06
8	199.50	3.1400e+06
9	199.50	3.0900e+06
10	199.90	3.0200e+06
11	199.90	3.1600e+06
12	1030.0	1.5820e+07
13	1030.0	1.5890e+07
14	1030.0	1.5750e+07
15	1040.0	1.5710e+07
16	1040.0	1.5920e+07
17	1040.0	1.5630e+07

	A	B	C	D	E
0					
1	25.060	1.8800e+06			
2	25.060	1.9290e+06			
3	25.060	2.1700e+06			
4	101.00	1.2450e+07			
5	101.00	1.2740e+07			
6	101.00	1.2770e+07			
7	199.90	2.7000e+07			
8	199.90	2.7800e+07			
9	1020.0	1.5250e+08			
10	1020.0	1.5270e+08			
11	1020.0	1.5270e+08			
12	49.300		9.1000e+06		
13	49.300		9.1200e+06		
14	49.300		9.1600e+06		
15	24.960			5.5300e+06	
16	24.960			5.3700e+06	
17	24.960			5.5600e+06	
18	199.60			4.2800e+07	
19	199.60			4.3300e+07	
20	100.00				2.3300e+07
21	100.00				2.3500e+07
22	100.00				2.3200e+07
23	1010.0				2.3200e+08
24	1010.0				2.3300e+08
25	1010.0				2.3300e+08

ページ #1 - “図2ヘリウム校正線data”

金曜日, 8月 29 5:04 PM 2003

	A	B
0		
1	25.120	3.0000e+05
2	25.120	2.6900e+05
3	25.120	2.6600e+05
4	200.70	1.7720e+06
5	200.70	1.8400e+06
6	200.70	1.8050e+06
7	201.70	1.9090e+06
8	201.70	1.8060e+06
9	202.80	1.7910e+06
10	202.80	1.7880e+06
11	202.80	1.8170e+06
12	1010.0	9.2900e+06
13	1010.0	9.3700e+06
14	1010.0	9.2900e+06

ページ #1 - “図2炭酸ガス校正線data”

金曜日, 8月 29 5:05 PM 2003

	A	B
0		
1	25.240	4.6200e+06
2	25.240	4.5000e+06
3	25.240	4.3000e+06
4	50.100	1.0060e+07
5	50.100	9.8700e+06
6	50.100	9.8100e+06
7	1020.0	2.2200e+08
8	1020.0	2.2200e+08
9	1020.0	2.2200e+08

ページ #1 - “図3data”

金曜日, 8月 29 5:06 PM 2003

	A	B
0	145.29	6.2200
1	176.79	10.000
2	9.7100	1.0740
3	8.9400	0.89500
4	-8.6100	-1.6700
5	-13.620	-2.4700
6	19.550	1.9400

	A	B	D	E	F
0	-114.00	0.18700			
1	-53.000	0.15900			
2	8.0000	0.21900			
3	68.000	0.23200			
4	128.00	0.32100			
5	189.00	0.93300			
6	249.00	1.0000			
7	309.00	0.81900			
8	369.00	0.79700			
9	430.00	0.60000			
10	492.00	0.59600			
11	553.00	0.49200			
12	614.00	0.42300			
13	675.00	0.37100			
14	736.00	0.25200			
15					
16	-139.00		0.22900		
17	-79.000		0.19400		
18	-18.000		0.29800		
19	42.000		0.27400		
20	103.00		0.70700		
21	163.00		1.0000		
22	224.00		0.84800		
23	284.00		0.63500		
24	345.00		0.56600		
25	405.00		0.44200		
26	466.00		0.42700		
27					
28	-134.00			0.20500	
29	-74.000			0.23300	
30	-13.000			0.15700	
31	47.000			0.40500	
32	107.00			1.0000	
33	167.00			0.93400	
34	228.00			0.72300	
35	288.00			0.57000	
36	348.00			0.33900	
37	409.00			0.31300	
38	469.00			0.28800	
39					
40	-110.00				0.10300
41	-50.000				0.11300
42	10.000				0.10600
43	71.000				1.0000
44	131.00				0.84600
45	192.00				0.60300
46	252.00				0.44000

ページ #2 - "図4data"

金曜日, 8月 29 5:07 PM 2003

	A	B	D	E	F
47	312.00				0.34200
48	372.00				0.31500
49	433.00				0.21100
50	493.00				0.16800

ページ #1 - "図5(a)data"

金曜日, 8月 29 5:07 PM 2003

	A	B	C	D
0	-133.00	3.5000	0.0000	0.0000
1	-73.000	3.5000	0.0000	0.0000
2	-12.000	3.3000	0.0000	0.0000
3	48.000	11.100	5.3000	0.0000
4	108.00	86.200	39.100	0.0000
5	169.00	69.100	18.700	0.0000
6	229.00	53.000	9.2000	0.0000
7	289.00	40.700	5.6000	0.0000
8	350.00	31.200	3.1000	0.0000
9	410.00	29.500	3.8000	0.0000
10	470.00	23.300	1.5000	0.0000
11	531.00	22.800	1.4000	0.0000
12	591.00	20.300	1.9000	0.0000
13	651.00	16.800	0.0000	0.0000

ページ #1 - "図5(b)data"

金曜日, 8月 29 5:08 PM 2003

	A	B	C	D
0	-82.000	13.000	0.0000	0.0000
1	-22.000	13.800	0.0000	0.0000
2	38.000	46.900	0.0000	0.0000
3	98.000	82.400	2.4000	0.0000
4	159.00	54.300	0.0000	0.0000
5	220.00	35.600	0.0000	0.0000
6	280.00	40.500	0.0000	0.0000
7	340.00	48.900	0.0000	0.0000
8	401.00	50.000	0.0000	0.0000
9	461.00	46.400	0.0000	0.0000

	A	B	C	D
0	-56.000	14.400	0.0000	0.0000
1	4.0000	16.300	0.0000	0.0000
2	64.000	266.00	18.700	0.0000
3	125.00	115.00	11.200	0.0000
4	185.00	65.400	5.9000	0.0000
5	245.00	76.900	2.5000	0.0000
6	306.00	71.500	1.3000	0.0000
7	366.00	66.100	0.0000	0.0000
8	426.00	57.900	0.0000	0.0000
9	487.00	55.200	0.0000	0.0000

	A	B	C	D
0	-32.000	51.500	0.0000	0.0000
1	29.000	185.00	643.00	9.2000
2	89.000	230.00	2509.0	0.0000
3	149.00	197.00	2581.0	0.0000
4	210.00	172.00	2449.0	0.0000
5	270.00	153.00	2308.0	0.0000
6	331.00	134.00	2192.0	0.0000
7	391.00	119.00	2083.0	0.0000
8	451.00	102.00	1745.0	0.0000
9	512.00	61.800	505.00	0.0000
10	572.00	49.500	136.00	0.0000
11	632.00	45.900	39.500	0.0000
12	693.00	33.900	15.900	0.0000
13	753.00	20.800	8.3000	0.0000

	A	D	F	G	H
0	0.0000	14.360			
1	2.0000	2453.0	70.400	118.00	7.7200
2	4.0000	2170.0	45.400	54.600	
3	6.0000	1403.0	28.600	34.000	
4	8.0000	1086.0		22.700	
5	10.000	909.00		17.000	
6	12.000	785.00		14.650	
7	14.000	697.00		13.600	
8	16.000	643.00		12.450	
9	18.000	590.00		10.050	
10	20.000	551.00		10.400	
11	22.000	508.00		8.4500	
12	24.000	481.00		7.6000	
13	26.000	456.00		6.8900	
14	28.000	434.00		5.6800	
15	30.000	415.00		5.3100	
16	32.000	401.00		5.5400	
17	34.000	384.00			
18	36.000	376.00			
19	38.000	356.00			
20	40.000	343.00			
21	42.000	340.00			
22	44.000	325.00			
23	46.000	316.00			
24	48.000	305.00			
25	50.000	289.00			
26	52.000	279.00			
27	54.000	270.00			
28	56.000	262.00			
29	58.000	260.00			
30	60.000	256.00			
31	62.000	247.00			
32	64.000	239.00			
33	66.000	234.00			
34	68.000	241.00			
35	70.000	232.00			
36	72.000	221.00			
37	74.000	221.00			
38	76.000	218.00			
39	78.000	212.00			
40	80.000	205.00			
41	82.000	206.00			
42	84.000	191.50			
43	86.000	194.80			
44	88.000	194.10			
45	90.000	188.20			
46	92.000	186.90			

	A	D	F	G	H
47	94.000	182.90			
48	96.000	176.40			
49	98.000	174.40			
50	100.00	172.40			
51	102.00	165.90			
52	104.00	160.60			
53	106.00	158.70			
54	108.00	158.00			
55	110.00	154.70			
56	112.00	148.20			
57	114.00	151.50			
58	116.00	146.90			
59	118.00	143.60			
60	120.00	71.400			
61	122.00				
62	124.00				
63	126.00				
64	128.00				
65	130.00				

	A	D	F	G
0	0.0000	81.900		8.2000
1	2.0000	902.00	21.800	76.300
2	4.0000	747.00	12.700	36.500
3	6.0000	631.00	7.2600	23.900
4	8.0000	561.00		25.500
5	10.0000	508.00		11.850
6	12.0000	430.00		12.870
7	14.0000	189.50		
8	16.0000	409.00		
9	18.0000	395.00		8.3500
10	20.0000	376.00		
11	22.0000	371.00		
12	24.0000	346.00		
13	26.0000	329.00		
14	28.0000	313.00		
15	30.0000	305.00		
16	32.0000	291.00		
17	34.0000	200.00		
18	36.0000	266.00		2.9800
19	38.0000	264.00		
20	40.0000	246.00		
21	42.0000	245.00		
22	44.0000	245.00		
23	46.0000	235.00		
24	48.0000	241.00		
25	50.0000	218.00		
26	52.0000	216.00		
27	54.0000	210.00		
28	56.0000	205.00		
29	58.0000	203.00		
30	60.0000	197.40		
31	62.0000	188.20		
32	64.0000	190.80		
33	66.0000	199.30		
34	68.0000	195.40		
35	70.0000	179.00		
36	72.0000	181.60		
37	74.0000	177.70		
38	76.0000	166.50		
39	78.0000	173.10		
40	80.0000	164.60		
41	82.0000	167.80		
42	84.0000	164.60		
43	86.0000	160.60		
44	88.0000	140.30		
45	90.0000	153.40		
46	92.0000	158.70		

	A	D	F	G
47	94.000	153.40		
48	96.000	152.10		
49	98.000	157.40		
50	100.00	153.40		
51	102.00	150.80		
52	104.00	150.80		
53	106.00	146.20		
54	108.00	141.60		
55	110.00	141.00		
56	112.00	59.800		
57	114.00	28.500		
58	116.00	17.310		
59	118.00	14.950		
60	120.00			
61	122.00			
62	124.00			
63	126.00			
64	128.00			
65	130.00			
66	132.00			
67	134.00			
68	136.00			
69	138.00			
70	140.00			

	A	B	C	D	E
0	0.0000	42900			
1	2.0000	45300	117.50	119.00	8.2600
2	4.0000	45300	99.200	84.900	5.6800
3	6.0000	45300	96.000	65.000	3.9400
4	8.0000	44900	71.900	54.800	4.4400
5	10.000	45100	66.700	51.000	3.0400
6	12.000	45000	64.600	48.000	
7	14.000	45000	50.600	44.000	
8	16.000	44900	60.600	42.400	
9	18.000	50000	68.600	47.300	4.5100
10	20.000	50600	69.000	45.800	
11	22.000	50300	73.400	45.600	3.5500
12	24.000	50300	68.100	44.400	
13	26.000	50400	65.200	42.800	
14	28.000	50100	64.900	40.300	
15	30.000	50200	52.800	39.100	
16	32.000	50400	62.900	38.200	
17	34.000	50400	61.000	37.900	
18	36.000	50100	60.500	38.000	
19	38.000	50200	64.200	36.400	
20	40.000	50500	61.400	35.900	
21	42.000	50300	61.200	35.800	
22	44.000	50400	59.500	34.200	
23	46.000	50100	50.100	34.300	
24	48.000	50300	60.300	34.400	
25	50.000	50400	56.800	32.800	
26	52.000	50000	59.400	32.600	
27	54.000	50300	60.500	32.700	
28	56.000	50400	58.800	31.500	
29	58.000	50200	58.500	32.900	
30	60.000	50400	57.200	31.900	
31	62.000				
32	64.000				
33	66.000				
34	68.000				
35	70.000				
36	72.000				
37	74.000				
38	76.000				
39	78.000				
40	80.000				
41	82.000				
42	84.000				
43	86.000	50200	55.700	28.900	
44	88.000				
45	90.000				
46	92.000				

	A	B	C	D	E
47	94.000				
48	96.000				
49	98.000				
50	100.00				
51	102.00				
52	104.00				
53	106.00				
54	108.00				
55	110.00				
56	112.00				
57	114.00				
58	116.00	50200	51.400	27.400	
59	118.00				
60	120.00				
61	122.00				
62	124.00				
63	126.00				
64	128.00				
65	130.00				
66	132.00				
67	134.00				
68	136.00				
69	138.00				
70	140.00				
71	142.00				
72	144.00				
73	146.00	50300	51.200	25.600	
74	148.00				
75	150.00				
76	152.00				
77	154.00				
78	156.00				
79	158.00				
80	160.00				
81	162.00				
82	164.00				
83	166.00				
84	168.00				
85	170.00				
86	172.00				
87	174.00				
88	176.00	50400	51.200	24.200	
89	178.00				
90	180.00				
91	182.00				
92	184.00				
93	186.00				

	A	B	C	D	E
94	188.00				
95	190.00				
96	192.00				
97	194.00				
98	196.00				
99	198.00				
100	200.00				
101	202.00				
102	204.00		51.200		
103	206.00	50200		24.000	
104	208.00				
105	210.00				
106	212.00				
107	214.00				
108	216.00				
109	218.00				
110	220.00				
111	222.00				
112	224.00				
113	226.00				
114	228.00				
115	230.00				
116	232.00				
117	234.00				
118	236.00	50200	49.900	23.100	
119	238.00				
120	240.00				
121	242.00				
122	244.00				
123	246.00				
124	248.00				
125	250.00				
126	252.00				
127	254.00				
128	256.00				
129	258.00				
130	260.00				
131	262.00				
132	264.00				
133	266.00	50200	48.800	22.500	
134	268.00				
135	270.00				
136	272.00				
137	274.00				
138	276.00				
139	278.00				
140	280.00				

	A	B	C	D	E
141	282.00				
142	284.00				
143	286.00				
144	288.00				
145	290.00				
146	292.00				
147	294.00			22.200	
148	296.00	50200	49.300	22.100	
149	298.00		45.500	21.800	
150	300.00		47.700	23.300	
151	302.00	50500			
152	304.00	50400			

	A	B
0	-2.0000	100.20
1	0.0000	113.90
2	2.0000	184.90
3	4.0000	162.60
4	6.0000	144.90
5	8.0000	152.80
6	10.000	123.00
7	12.000	125.00
8	14.000	113.10
9	16.000	98.400
10	18.000	216.00
11	20.000	124.40
12	22.000	98.500
13	24.000	79.800
14	26.000	52.300
15	28.000	57.200
16	30.000	55.700
17	32.000	
18	34.000	
19	36.000	
20	38.000	
21	40.000	

	K	A	B	C
0	0.0000			
1	2.0000			
2	4.0000			
3	6.0000			
4	8.0000			
5	10.000	2328.0		
6	12.000	2334.0		
7	14.000	2315.0		
8	16.000	1593.0		
9	18.000	416.00		
10	20.000	346.00		
11	22.000	581.00		
12	24.000	750.00		
13	26.000	884.00		
14	28.000	1017.0		
15	30.000	1081.0		6.0000
16	32.000	1134.0		6.9400
17	34.000	1187.0		7.5000
18	36.000	1875.0		11.850
19	38.000	2623.0		7.1000
20	40.000	2518.0		6.3900
21	42.000	2498.0		
22	44.000	2512.0		
23	46.000	2393.0		
24	48.000	2393.0		
25	50.000	2414.0		
26	52.000	2387.0		
27	54.000	807.00		
28	56.000	940.00		5.6600
29	58.000	1128.0		7.7200
30	60.000	1255.0		6.7900
31	62.000	1276.0		7.8000
32	64.000	1390.0		7.5900
33	66.000	1390.0		9.8600
34	68.000	1396.0		10.500
35	70.000	1410.0		10.000
36	72.000	1396.0		9.9000
37	74.000	1344.0		10.900
38	76.000	1306.0		9.9600
39	78.000	1311.0		10.350
40	80.000	1390.0		10.150
41	82.000	1816.0		13.400
42	84.000	2662.0		7.5500
43	86.000	2597.0		5.3400
44	88.000	2551.0		
45	90.000	2479.0		
46	92.000	2439.0		

	K	A	B	C
47	94.000	2414.0		
48	96.000	2414.0		
49	98.000	2446.0		
50	100.00	2400.0		
51	102.00	2354.0		
52	104.00			
53	106.00			
54	108.00			
55	110.00			

	A	B	C
0	-0.50000	5.8000	
1	1.5000	38.000	
2	3.5000	39.200	
3	5.5000	44.400	
4	7.5000	39.800	
5	9.5000	39.400	
6	11.500	28.600	
7	13.500	12.400	
8	15.500	15.400	
9	17.500	8.7000	
10	19.500	5.8000	
11			
12	-1.0000		3.8700
13	1.0000		13.640
14	3.0000		4.0800
15	5.0000		0.0000
16	7.0000		0.0000
17	9.0000		0.0000
18	11.000		0.0000
19	13.000		0.0000
20	15.000		0.0000

ページ #1 - "図8(b)data"

金曜日, 8月 29 5:13 PM 2003

	A	B	C
0	-2.5000	39.200	0.0000
1	-0.50000	39.500	0.0000
2	1.5000	1488.0	0.0000
3	3.5000	1738.0	4.4900
4	5.5000	1738.0	6.4800
5	7.5000	1724.0	5.8200
6	9.5000	1679.0	6.2600
7	11.500	709.00	0.0000
8	13.500	192.10	0.0000
9	15.500	107.80	0.0000
10	17.500	87.200	0.0000
11	19.500	71.400	0.0000

ページ #1 - "図9data"

金曜日, 8月 29 5:14 PM 2003

	A	B	C
0	He-GDC	0.060520	8.0050e-06
1	He-ECRDC	0.00024440	2.0370e-07
2	He-TDC	0.00069320	1.1550e-06
3	Ar-GDC	0.030920	5.7250e-06
4	Ar-TDC	6.1110e-05	1.0180e-07

ページ #1 - "図10data"

金曜日, 8月 29 5:15 PM 2003

	A	B	K	C	L	D	E	F
0	3.7700e-05	3.1400e-08	0.030000		10.900		He-ECRDC	250°C
1	0.00024800	4.1400e-07	0.0050000		4.1700		Ar-TDC	250°C
2	0.0016260	2.7100e-06	0.057000		95.000		He-TDC	250°C
3	0.049700	7.5300e-06	1.0000		153.00		Ar-GDC	250°C
4	0.082400	1.1640e-05	1.2000		171.00		He-GDC	250°C
5								
6	6.1110e-05	1.0180e-07		0.0000		0.0000	Ar-TDC	150°C
7	0.00024440	2.0370e-07		0.0000		0.0000	He-ECRDC	150°C
8	0.00069320	1.1550e-06		0.034000		56.700	He-TDC	150°C
9	0.030920	5.7250e-06		0.79000		148.00	Ar-GDC	150°C
10	0.060520	8.0050e-06		0.96000		127.00	He-GDC	150°C

	A	B	C	D	E	F
0	0.0000		35.700	14.360	5.8300	
1	2.0000	37.900	2269.0	2453.0	649.00	624.00
2	4.0000	37.800	1442.0	2170.0	613.00	479.00
3	6.0000	33.100	1073.0	1403.0	529.00	386.00
4	8.0000	34.600	843.00	1086.0	463.00	329.00
5	10.000	27.000	705.00	909.00	413.00	283.00
6	12.000	21.600	604.00	785.00	379.00	260.00
7	14.000	19.080	545.00	697.00	348.00	233.00
8	16.000	22.700	481.00	643.00	325.00	215.00
9	18.000	18.820	441.00	590.00	308.00	196.10
10	20.000	13.310	395.00	551.00	279.00	182.90
11	22.000	17.900	373.00	508.00	263.00	169.80
12	24.000	14.490	359.00	481.00	253.00	156.70
13	26.000	11.860	334.00	456.00	239.00	149.50
14	28.000		319.00	434.00	224.00	143.60
15	30.000		301.00	415.00	216.00	129.30
16	32.000		290.00	401.00	201.00	125.10
17	34.000		274.00	384.00	199.30	116.70
18	36.000		260.00	376.00	188.20	110.50
19	38.000		250.00	356.00	181.60	101.60
20	40.000		244.00	343.00	177.00	97.100
21	42.000		232.00	340.00	165.20	94.700
22	44.000		222.00	325.00	159.30	87.000
23	46.000		210.00	316.00	154.10	85.900
24	48.000		211.00	305.00	149.50	81.700
25	50.000		199.30	289.00	144.20	82.000
26	52.000		193.40	279.00	137.00	78.700
27	54.000		188.20	270.00	135.10	74.800
28	56.000		179.00	262.00	130.50	72.600
29	58.000		175.70	260.00	123.80	69.300
30	60.000		167.20	256.00	125.10	64.800
31	62.000		165.20	247.00	115.50	68.200
32	64.000		160.00	239.00	118.50	65.800
33	66.000		154.10	234.00	113.50	59.500
34	68.000		144.80	241.00	111.50	62.400
35	70.000		147.50	232.00	105.70	51.600
36	72.000		142.30	221.00	98.300	55.000
37	74.000		135.10	221.00	97.200	56.600
38	76.000		127.20	218.00	98.100	48.700
39	78.000		122.60	212.00	94.100	53.000
40	80.000		121.90	205.00	96.300	47.600
41	82.000		120.60	206.00	94.600	48.100
42	84.000		118.00	191.50	90.100	48.900
43	86.000		112.10	194.80	86.800	39.200
44	88.000		117.30	194.10	84.000	43.400
45	90.000		111.40	188.20	77.500	40.300
46	92.000		114.10	186.90	79.000	45.100

	A	B	C	D	E	F
47	94.000		112.10	182.90	75.100	41.800
48	96.000		111.80	176.40	79.000	39.100
49	98.000		106.70	174.40	74.000	38.600
50	100.00		105.30	172.40	75.000	33.800
51	102.00		105.00	165.90	70.800	30.000
52	104.00		100.00	160.60	68.300	34.300
53	106.00		102.60	158.70	67.000	30.100
54	108.00		98.400	158.00	69.400	33.800
55	110.00		89.500	154.70	65.300	27.900
56	112.00		98.000	148.20	62.500	
57	114.00		91.600	151.50	59.600	
58	116.00		92.900	146.90	61.100	
59	118.00		86.600	143.60	59.600	
60	120.00		86.400	71.400	56.100	
61	122.00		84.500		58.800	
62	124.00		84.200		56.100	
63	126.00		80.500		57.000	
64	128.00				48.800	
65	130.00				45.800	

	A	B	C	D	E
0	0.0000	15.540	7.2100	81.900	13.180
1	2.0000	51.800	200.00	902.00	463.00
2	4.0000	141.60	607.00	747.00	407.00
3	6.0000	95.600	505.00	631.00	356.00
4	8.0000	62.200	429.00	561.00	325.00
5	10.000	89.100	43.800	508.00	272.00
6	12.000	81.000	51.000	430.00	262.00
7	14.000	58.500	256.00	189.50	275.00
8	16.000	68.700	36.900	409.00	250.00
9	18.000	57.100	41.800	395.00	254.00
10	20.000	46.400	313.00	376.00	227.00
11	22.000	52.100	308.00	371.00	220.00
12	24.000	47.700	294.00	346.00	223.00
13	26.000	38.000	273.00	329.00	214.00
14	28.000	41.800	263.00	313.00	202.00
15	30.000	35.000	247.00	305.00	203.00
16	32.000	31.100	238.00	291.00	186.20
17	34.000	31.500	230.00	200.00	193.40
18	36.000	27.200	225.00	266.00	175.10
19	38.000	35.200	212.00	264.00	188.20
20	40.000	27.400	205.00	246.00	177.70
21	42.000	37.500	198.00	245.00	173.80
22	44.000	26.600	199.30	245.00	181.00
23	46.000	34.100	206.00	235.00	165.20
24	48.000	20.300	196.70	241.00	160.00
25	50.000	25.000	184.30	218.00	166.50
26	52.000	21.700	179.70	216.00	155.40
27	54.000	18.950	175.10	210.00	150.10
28	56.000	22.400	169.20	205.00	156.00
29	58.000	27.000	170.50	203.00	144.90
30	60.000	15.870	167.80	197.40	146.20
31	62.000	19.930	167.80	188.20	142.30
32	64.000	3.8000	162.60	190.80	148.20
33	66.000	16.190	149.50	199.30	144.20
34	68.000	16.650	155.40	195.40	150.80
35	70.000	21.000	151.50	179.00	137.00
36	72.000	17.830	142.90	181.60	136.40
37	74.000	17.370	150.10	177.70	132.40
38	76.000	14.550	156.00	166.50	137.70
39	78.000	19.010	136.40	173.10	148.80
40	80.000	14.550	139.00	164.60	135.70
41	82.000	14.880	138.30	167.80	123.90
42	84.000	15.080	130.50	164.60	130.50
43	86.000	24.300	126.50	160.60	133.10
44	88.000	17.770	99.600	140.30	132.40
45	90.000	17.370	123.90	153.40	137.70
46	92.000	13.640	85.700	158.70	110.80

	A	B	C	D	E
47	94.000	18.950	27.200	153.40	277.00
48	96.000	16.130	20.700	152.10	146.20
49	98.000	18.950	13.440	157.40	122.60
50	100.00	18.290	10.420	153.40	116.70
51	102.00	14.620	9.6300	150.80	133.10
52	104.00	9.4400	6.3500	150.80	118.00
53	106.00	7.6700		146.20	134.40
54	108.00			141.60	124.60
55	110.00			141.00	129.10
56	112.00			59.800	128.50
57	114.00			28.500	121.30
58	116.00			17.310	122.60
59	118.00			14.950	118.00
60	120.00				119.30
61	122.00				118.70
62	124.00				116.00
63	126.00				114.10
64	128.00				112.90
65	130.00				148.80
66	132.00				126.50
67	134.00				114.30
68	136.00				117.60
69	138.00				48.700
70	140.00				

	A	B	C
0	300.00	0.0010710	0.0058860
1	423.00	0.060520	0.030920
2	523.00	0.082400	0.049730
3	573.00	0.036410	0.040510
4	300.00	0.022170	

	A	D	F	G	H	I
0	0.0000	2453.0	96.776	1916.0	545.50	2558.3
1	2.0000	2170.0	96.776	1293.7	523.33	1913.8
2	4.0000	1403.0	96.776	873.51	502.05	1472.3
3	6.0000	1086.0	96.776	589.79	481.65	1168.2
4	8.0000	909.00	96.776	398.23	462.07	957.08
5	10.0000	785.00	96.776	268.89	443.28	808.95
6	12.0000	697.00	96.776	181.55	425.27	703.60
7	14.0000	643.00	96.776	122.59	407.98	627.34
8	16.0000	590.00	96.776	82.770	391.40	570.94
9	18.0000	551.00	96.776	55.890	375.49	528.15
10	20.0000	508.00	96.776	37.740	360.22	494.73
11	22.0000	481.00	96.776	25.480	345.58	467.81
12	24.0000	456.00	96.776	17.204	331.53	445.51
13	26.0000	434.00	96.776	11.616	318.06	426.45
14	28.0000	415.00	96.776	7.8430	305.13	409.75
15	30.0000	401.00	96.776	5.2960	292.72	394.80
16	32.0000	384.00	96.776	3.5760	280.83	381.18
17	34.0000	376.00	96.776	2.4140	269.41	368.60
18	36.0000	356.00	96.776	1.6302	258.46	356.87
19	38.0000	343.00	96.776	1.1007	247.95	345.83
20	40.0000	340.00	96.776	0.74320	237.87	335.39
21	42.0000	325.00	96.776	0.50180	228.21	325.48
22	44.0000	316.00	96.776	0.33880	218.93	316.04
23	46.0000	305.00	96.776	0.22880	210.03	307.03
24	48.0000	289.00	96.776	0.15447	201.49	298.42
25	50.0000	279.00	96.776	0.10430	193.30	290.18
26	52.0000	270.00	96.776	0.070420	185.44	282.29
27	54.0000	262.00	96.776	0.047550	177.91	274.73
28	56.0000	260.00	96.776	0.032110	170.67	267.48
29	58.0000	256.00	96.776	0.021680	163.74	260.53
30	60.0000	247.00	96.776	0.014640	157.08	253.87
31	62.0000	239.00	96.776	0.0098800	150.70	247.48
32	64.0000	234.00	96.776	0.0066730	144.57	241.35
33	66.0000	241.00	96.776	0.0045060	138.69	235.47
34	68.0000	232.00	96.776	0.0030420	133.06	229.84
35	70.0000	221.00	96.776	0.0020540	127.65	224.43
36	72.0000	221.00	96.776	0.013870	122.46	219.24
37	74.0000	218.00	96.776	0.00093700	117.48	214.26
38	76.0000	212.00	96.776	0.00063200	112.71	209.48
39	78.0000	205.00	96.776	0.00042700	108.12	204.90
40	80.0000	206.00	96.776	0.00028800	103.73	200.51
41	82.0000	191.50	96.776		99.510	196.29
42	84.0000	194.80	96.776		95.470	192.24
43	86.0000	194.10	96.776		91.590	188.36
44	88.0000	188.20	96.776		87.860	184.64
45	90.0000	186.90	96.776		84.290	181.07
46	92.0000	182.90	96.776		80.870	177.64

	A	D	F	G	H	I
47	94.000	176.40	96.776		77.580	174.36
48	96.000	174.40	96.776		74.430	171.20
49	98.000	172.40	96.776		71.400	168.18
50	100.00	165.90	96.776		68.500	165.27
51	102.00	160.60	96.776		65.710	162.49
52	104.00	158.70	96.776		63.040	159.82
53	106.00	158.00	96.776		60.480	157.26
54	108.00	154.70	96.776		58.020	154.80
55	110.00	148.20	96.776		55.660	152.44
56	112.00	151.50	96.776		53.400	150.18
57	114.00	146.90	96.776		51.230	148.01
58	116.00	143.60	96.776		49.150	145.92
59	118.00		96.776		47.149	143.93
60	120.00		96.776		45.233	142.01

	A	D	E	F	G	H
0	0.0000	902.00	131.29	363.99	410.57	905.85
1	2.0000	747.00	131.29	222.98	385.83	740.10
2	4.0000	631.00	131.29	136.60	362.57	630.46
3	6.0000	561.00	131.29	83.680	340.72	555.69
4	8.0000	508.00	131.29	51.260	320.18	502.74
5	10.000	430.00	131.29	31.400	300.89	463.58
6	12.000	189.50	131.29	19.240	282.75	433.28
7	14.000	409.00	131.29	11.790	265.71	408.79
8	16.000	395.00	131.29	7.2200	249.70	388.21
9	18.000	376.00	131.29	4.4200	234.65	370.36
10	20.000	371.00	131.29	2.7100	220.51	354.51
11	22.000	346.00	131.29	1.6600	207.22	340.17
12	24.000	329.00	131.29	1.0200	194.73	327.03
13	26.000	313.00	131.29	0.62000	182.99	314.90
14	28.000	305.00	131.29	0.38000	171.96	303.63
15	30.000	291.00	131.29	0.23000	161.60	293.12
16	32.000	200.00	131.29	0.14000	151.86	283.29
17	34.000	266.00	131.29	0.090000	142.71	274.08
18	36.000	264.00	131.29	0.050000	134.11	265.45
19	38.000	246.00	131.29	0.030000	126.02	257.35
20	40.000	245.00	131.29	0.020000	118.43	249.74
21	42.000	245.00	131.29	0.0100000	111.29	242.59
22	44.000	235.00	131.29	0.0100000	104.58	235.88
23	46.000	241.00	131.29		98.280	229.57
24	48.000	218.00	131.29		92.360	223.65
25	50.000	216.00	131.29		86.790	218.08
26	52.000	210.00	131.29		81.560	212.85
27	54.000	205.00	131.29		76.640	207.93
28	56.000	203.00	131.29		72.020	203.32
29	58.000	197.40	131.29		67.680	198.97
30	60.000	188.20	131.29		63.600	194.89
31	62.000	190.80	131.29		59.770	191.06
32	64.000	199.30	131.29		56.170	187.46
33	66.000	195.40	131.29		52.780	184.07
34	68.000	179.00	131.29		49.600	180.89
35	70.000	181.60	131.29		46.610	177.90
36	72.000	177.70	131.29		43.800	175.09
37	74.000	166.50	131.29		41.160	172.45
38	76.000	173.10	131.29		38.680	169.97
39	78.000	164.60	131.29		36.350	167.64
40	80.000	167.80	131.29		34.160	165.45
41	82.000	164.60	131.29		32.100	163.39
42	84.000	160.60	131.29		30.170	161.46
43	86.000	140.30	131.29		28.349	159.64
44	88.000	153.40	131.29		26.640	157.93
45	90.000	158.70	131.29		25.035	156.32
46	92.000	153.40	131.29		23.526	154.82

	A	D	E	F	G	H
47	94.000	152.10	131.29		22.108	153.40
48	96.000	157.40	131.29		20.775	152.07
49	98.000	153.40	131.29		19.523	150.81
50	100.00	150.80	131.29		18.347	149.64
51	102.00	150.80	131.29		17.241	148.53
52	104.00	146.20	131.29		16.202	147.49
53	106.00	141.60	131.29		15.225	146.52
54	108.00	141.00	131.29		14.308	145.60
55	110.00		131.29		13.445	144.74
56	112.00		131.29		12.635	143.93
57	114.00		131.29		11.874	143.16
58	116.00		131.29		11.158	142.45
59	118.00		131.29		10.485	141.78
60	120.00		131.29		9.8530	141.14
61	122.00					
62	124.00					
63	126.00					
64	128.00					
65	130.00					
66	132.00					
67	134.00					
68	136.00					
69	138.00					
70	140.00					

	A	B	C	E	F
0	3.3330	1271.0	366.90		1462.0
1	2.3640	189.70	141.50	1619.0	1761.0
2	1.9120	305.50	244.90	2892.0	1930.0
3	1.7450	550.50	272.40	3036.0	2073.0
4	3.3330	238.90		1657.0	

ページ #1 - "図16(a)data"

金曜日, 8月 29 5:23 PM 2003

	A	B	C
0	3.3330	0.0000	14.400
1	2.3640	86.900	113.50
2	1.9120	96.800	131.30
3	1.7450	30.500	113.80
4	3.3330	29.500	

ページ #1 - "図16(b)data"

金曜日, 8月 29 5:23 PM 2003

	A	B	C	D	E
0	3.3330	51900	23590		92300
1	2.3640	2.9050e+05	22030	1.0260e+06	5.9800e+05
2	1.9120	5.8500e+05	39100	1.5770e+06	7.9300e+05
3	1.7450	1.9020e+05	44000	8.8000e+05	3.9800e+05
4	3.3330	73200		4.7500e+05	

	A	B	C	D	E	K	F	G	H
0	0.0000								
1	2.0000			117.50	28.700		26.700	119.00	17.200
2	4.0000		34.300	99.200	33.800		20.300	84.900	14.350
3	6.0000		33.800	96.000			17.550	65.000	17.150
4	8.0000		34.300	71.900	32.300		16.200	54.800	15.500
5	10.0000			66.700	34.500		15.800	51.000	15.400
6	12.0000		32.100	64.600	40.000		15.650	48.000	17.150
7	14.0000		32.900	50.600	34.800		14.500	44.000	18.100
8	16.0000		31.800	60.600	39.700		14.700	42.400	17.300
9	18.0000			68.600	41.300		14.400	47.300	16.000
10	20.0000		30.500	69.000	43.900		14.550	45.800	17.850
11	22.0000		30.900	73.400	49.000		12.750	45.600	17.850
12	24.0000		30.000	68.100	41.200		11.450	44.400	18.000
13	26.0000			65.200	43.300		12.450	42.800	17.550
14	28.0000		35.500	64.900	42.000		14.100	40.300	17.650
15	30.0000		35.700	52.800			14.200	39.100	16.850
16	32.0000		34.100	62.900	42.600		14.900	38.200	17.900
17	34.0000			61.000	44.300		13.600	37.900	17.250
18	36.0000		35.700	60.500	43.700		13.300	38.000	17.650
19	38.0000		32.500	64.200	48.000		14.800	36.400	16.950
20	40.0000		31.800	61.400	44.200		12.950	35.900	15.900
21	42.0000			61.200	43.500		14.450	35.800	19.750
22	44.0000		34.400	59.500	48.600		14.300	34.200	19.200
23	46.0000		33.200	50.100	45.300		12.850	34.300	18.800
24	48.0000		33.900	60.300	45.500		11.900	34.400	18.000
25	50.0000			56.800	43.500		12.200	32.800	18.400
26	52.0000		33.600	59.400			12.300	32.600	17.050
27	54.0000		32.700	60.500	45.900		13.300	32.700	17.850
28	56.0000		31.800	58.800	45.500		13.450	31.500	17.900
29	58.0000			58.500	45.700		13.050	32.900	18.100
30	60.0000		31.300	57.200	46.500		13.300	31.900	18.700
31	62.0000								
32	64.0000								
33	66.0000								
34	68.0000								
35	70.0000								
36	72.0000		31.800				11.750		
37	74.0000								
38	76.0000								
39	78.0000								
40	80.0000				44.800				18.400
41	82.0000								
42	84.0000								
43	86.0000			55.700				28.900	
44	88.0000								
45	90.0000								
46	92.0000		32.700				11.050		

	A	B	C	D	E	K	F	G	H
47	94.000								
48	96.000								
49	98.000								
50	100.00				46.700				18.000
51	102.00								
52	104.00								
53	106.00								
54	108.00								
55	110.00								
56	112.00		32.600				10.700		
57	114.00								
58	116.00			51.400				27.400	
59	118.00								
60	120.00				47.000				18.500
61	122.00								
62	124.00								
63	126.00								
64	128.00								
65	130.00								
66	132.00		32.300				11.200		
67	134.00								
68	136.00								
69	138.00								
70	140.00				47.600				18.450
71	142.00								
72	144.00								
73	146.00			51.200				25.600	
74	148.00								
75	150.00								
76	152.00		31.100				10.950		
77	154.00								
78	156.00								
79	158.00								
80	160.00				46.700				18.250
81	162.00								
82	164.00								
83	166.00								
84	168.00								
85	170.00								
86	172.00		32.200				11.350		
87	174.00								
88	176.00			51.200				24.200	
89	178.00								
90	180.00				46.400				18.600
91	182.00								
92	184.00								
93	186.00								

	A	B	C	D	E	K	F	G	H
94	188.00								
95	190.00								
96	192.00		31.600				10.550		
97	194.00								
98	196.00								
99	198.00								
100	200.00				48.200				19.250
101	202.00								
102	204.00			51.200					
103	206.00							24.000	
104	208.00								
105	210.00								
106	212.00		30.000				10.850		
107	214.00								
108	216.00								
109	218.00								
110	220.00				50.600				20.100
111	222.00								
112	224.00								
113	226.00								
114	228.00								
115	230.00								
116	232.00		29.500				10.750		
117	234.00								
118	236.00			49.900				23.100	
119	238.00								
120	240.00				48.700				20.500
121	242.00								
122	244.00								
123	246.00								
124	248.00								
125	250.00								
126	252.00		30.600				10.850		
127	254.00								
128	256.00								
129	258.00								
130	260.00				48.700				20.100
131	262.00								
132	264.00								
133	266.00			48.800				22.500	
134	268.00								
135	270.00								
136	272.00		29.600				11.650		
137	274.00								
138	276.00								
139	278.00								
140	280.00				48.600				20.500

	A	B	C	D	E	K	F	G	H
141	282.00								
142	284.00								
143	286.00		30.700				10.500		
144	288.00		30.400		49.300		11.300		
145	290.00				49.000		10.750		21.500
146	292.00		30.100		50.100		11.650		19.800
147	294.00		29.200				10.400	22.200	18.800
148	296.00			49.300	49.400			22.100	19.550
149	298.00			45.500	50.100			21.800	20.600
150	300.00			47.700					

	A	B	C	D	E
0	3.3330	300.00	18.000		
1	2.3640	423.00	30.000	11.000	
2	1.9120	523.00	48.000	22.000	3.0000
3	1.7450	573.00	50.000	20.000	

	A	B	C	D
0	H2-GDC150℃初期	34.300	20.300	
1	H2-GDC150℃終期	29.200	10.400	
2	H2-GDC250℃初期	117.50	119.00	8.3600
3	H2-GDC250℃終期	47.200	23.300	
4	H2-GDC300℃初期	28.700	17.200	
5	H2-GDC300℃終期	50.100	20.600	
6	H2-ECR300℃終期	42.300	23.400	8.0600
7	He-GDC250℃初期	70.400	118.00	7.7200

	A	B	C	D
0	H2-GDC	0.0012950	5.7500e-07	0.00044400
1	H2-TDC	4.9500e-05	1.7260e-07	0.0034900
2	H2-ECRDC	6.7000e-05	2.8770e-07	0.0042900

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	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

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 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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	Å
バ	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

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	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(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, ヘクタ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 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

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

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 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 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

JT-60U 洗濯機洗淨試験における排水組成の分析

R100

古紙配合率100%
白紙率70%再生紙を使用しています。