

JAERI-Tech
2001-012



JP0150338



JT-60Uに於ける重水素デカボランを用いたボロナイゼーション

2001年3月

柳生 純一・新井 貴・神永 敦嗣・宮田 克行・荒井 優*

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

IBARI

RESEARCH



日本原子力研究所

RC 81008

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。
入手の問合わせは、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, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

JT-60U に於ける重水素デカボランを用いたボロナイゼーション

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

柳生 純一・新井 貴・神永 敦嗣・宮田 克行・荒井 優*

(2001年1月31日受理)

臨界プラズマ試験装置(JT-60U)では第一壁コンディショニングとして、ボロンを第一壁に蒸着させるデカボラン($B_{10}H_{11}$)を用いたボロナイゼーションを実施している。ボロナイゼーションは、他の Discharge-cleaning(DC)に比べて酸素不純物量及び水素リサイクリング量低減に有効であるが、ボロン膜中に含まれる軽水素の低減と DC グロー放電の安定化に於いて問題があった。これらを解決するために、従来の軽水素によるデカボランに代って重水素デカボラン($B_{10}D_{11}$)を使用したボロナイゼーション処理技術の開発を進めた。この結果、ボロン膜中の軽水素は激減し、ボロナイゼーション直後の実験運転に於ける調整放電の数が従来比で 1/10 まで削減した。また、ヘリウム雰囲気中に行えるため、DC グロー放電が安定し、ボロナイゼーションに要する処理時間が最大 30 時間節約でき、重水素デカボランを用いたボロナイゼーションが、非常に効率的、且つ効果的な第一壁コンディショニング手法であることを示した。

Deuterated-decaborane using Boronization on JT-60U

Jun-ichi YAGYU, Takashi ARAI, Atsushi KAMINAGA, Katsuyuki MIYATA, Masaru ARAI*

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

(Received January 31, 2001)

In JT-60U, boronization using hydride-decaborane ($B_{10}H_{14}$) vaporization has been conducted for the first wall conditioning. Compared to other discharge cleaning (DC), boronization is claimed to be efficient in reduction of oxygen impurities and hydrogen recycling in plasma. However, there are some problems in reduction of hydrogen included in boron film and stabilization of DC glow discharge during the boronization. To solve these problems, a new boronization method using deuterated-decaborane ($B_{10}D_{14}$) was adopted instead of the conventional hydride-decaborane. As a result, hydrogen content in the boron film decreased clearly and discharge conditioning shots, for decreasing hydrogen content in plasmas, after the boronization were reduced to 1/10 in comparison to the conventional process. Furthermore, DC glow discharge became stable, with only helium carrier gas, and it was possible to save 30 hours in maximum of the time necessary to boronization. It is shown that the boronization using deuterated-decaborane is very efficient and effective method for the first wall conditioning.

Keywords: Deuterated-decaborane, Boronization, Wall Conditioning, Hydrogen Reduction,
Stability of DC Glow Discharge

* Kaihatsu Denki Co, Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. ボロナイゼーションの概要	1
2.1 軽水素デカボランの導入	1
2.2 ボロナイゼーションシステム	2
2.3 ボロン膜の分析法	3
2.4 軽水素デカボランによるボロナイゼーションの経緯	3
3. 軽水素デカボランを用いたボロナイゼーションの問題と対策	3
3.1 トーラス方向への均一化	3
3.2 支持ガスとボロン膜の特性	4
4. 重水素デカボラン	5
4.1 重水素デカボランの導入	5
4.2 重水素デカボランの物性	5
4.3 製造プロセス	6
4.4 重水素デカボランの重水素化率	6
4.5 既存システムとの整合性	8
5. 重水素デカボランを用いたボロナイゼーション	9
5.1 ボロン膜中の軽水素の低減	9
5.2 ボロナイゼーション処理時間の短縮	9
5.3 重水素デカボランの特徴	10
5.4 プラズマ実験に対するボロナイゼーションの効果	10
6. おわりに	10
謝辞	11
参考文献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Boronization	1
2.1 Introduction of Hydride Decaborane	1
2.2 Boronization System	2
2.3 Analysis Method of Boron Film	3
2.4 Progress of Boronization in JT-60U	3
3. Problems of the Hydride Decaborane and Measures	3
3.1 Uniformity to Torus Direction	3
3.2 Characteristics of Boron Film and the Support Gas	4
4. Deuterated Decaborane	5
4.1 Introduction of Deuterated Decaborane	5
4.2 Physical Properties of Deuterated Decaborane	5
4.3 Production Process	6
4.4 Deuteride Ratio of Deuterated Decaborane	6
4.5 Consistency with the Existent Boronization System	8
5. Boronization using Deuteride Decaborane	9
5.1 Reduction of Hydrogen in Boron Film	9
5.2 Shortening of Boronization Time	9
5.3 Characteristics of Deuterated Decaborane	10
5.4 Effect of Boronization for Plasma Experimental	10
6. Summary	10
Acknowledgement	11
References	11

1. はじめに

トカマク装置真空容器内壁に薄いボロン膜層を蒸着するボロナイゼーション(Boronization)は良好な Wall-conditioning を得る手法として広く実施されており、ベーキング、放電洗浄(TDC)、DC グロー放電(GDC)等の他の Discharge-cleaning(DC)に比べて格段有効であることが明らかにされている。ボロンコーティング用ガスとしては、爆発性や自燃性を有するジボラン(B_2H_6)が TEXTOR[1]や DIII-D[2]等の核融合実験装置に於いて用いられてきた。ジボランは、毒性があるため、より毒性の少ない且つ取り扱いが容易であるトリメチルボロン ($B(CH_3)_3$)、カーボレン ($C_2B_{10}H_{12}$)等を用いる試みがなされている。しかし、それらは原料中に炭素を含むため、プラズマ中の炭素不純物が増加するという難点があった。そこで JT-60U では、1992 年よりボロンコーティング用材料として、ジボランと同じボロン化合物であり、しかも爆発性や自燃性のない軽水素デカボラン($B_{10}H_{14}$; 常温で固体)を用いたボロナイゼーションを採用し、これを最適化する装置の設計・製作及び技術開発を行ってきた[3,4]。ボロナイゼーションは真空容器内に存在する酸素を第一壁表面上に固定化し、不純物としてプラズマ中に混入する酸素量を低減させること、水素リサイクリング量の低減、更にはボロン(boron)は原子番号 5 の物質であるので、第一壁の低 Z 材料化を目的としている。しかし、現在 JT-60U で行われている Plasma Chemical Vapour Deposition(PCVD)によるボロナイゼーションには改善すべき点が幾つか存在した。それは、成膜(ボロン膜)中に含まれる軽水素の低減とボロナイゼーション初期に於ける DC グロー放電の安定化である。即ち、軽水素デカボランを使用することでボロン膜中には軽水素が含まれるため、実験放電に於いてプラズマ燃料の重水素を希釈してしまうこと。また、この軽水素量を予め減らしておくためにボロナイゼーションの支持ガスに重水素を用いた場合にはメタンが多量に発生し、DC グロー放電が継続できないことである。これらの問題を解決する方法として軽水素に換えて重水素を使用したデカボランを採用した。

本報告書では、JT-60U で行ってきた軽水素デカボランを用いたボロナイゼーションの概要について述べるとともに、重水素デカボランを用いたボロナイゼーションの効果について述べる。

2. ボロナイゼーションの概要

2.1 軽水素デカボランの導入

Fig.1 に不純物除去に於けるボロナイゼーションの効果を示す。従来、ベーキングや TDC、DC グロー放電(GDC)を組合せ、約 1 ヶ月かけて達成する不純物レベルに 1 回のボロナイゼーションで到達することが出来る。JT-60U では純粋なボロンコーティングを行うため、トリメチルボロンやカーボレンと異なり炭素を含有しないジボランと軽水素デカボランをボロナイゼーション原料の候補に挙げ、検討を行った。ジボランをボロナイゼーションに使用する場合、(1)供給は、ガスボンベから減圧して供給すること、(2)ガスボンベは、安全装置付きの格納庫に格納する必要があること、(3)配管は、二重管にすること等のジボランガスとしての爆発、自燃、毒性に対する安全対策上の制約が課せられる。このため、JT-60U に適用するには、ガス供給源(ガスボンベ

の据付け場所)からトカマク装置のガス導入口までの距離が長くなり(100m程度)、且つ、反応性の高いガスを長い輸送管を通して供給する必要があり、その実現には長期間を要する等の問題があった。一方、軽水素デカボランの場合、(1)常温で固体であるデカボランを必要量扱うため、原料容器の取り扱いが容易になること、(2)デカボランガスの供給は、原料容器を加熱して行うこと、(3)ガス導入口近傍に原料容器を設置することができるため、短い輸送管(10m程度)でのガス供給が可能となること、(4)ガス発生部及びガス輸送系を含め、供給蒸気圧が $\sim 10^3$ Pa であるため大気圧より低い圧力下でのガス供給が可能となる等、ジボランと比較して多くの固有の安全性の高い装置にすることができる特徴があった。これらの理由から、JT-60U に適用するボロナイゼーション用ガスとして、軽水素デカボランを選択した。

2.2 ボロナイゼーションシステム

JT-60U 用ボロナイゼーションシステムは、真空容器内に軽水素デカボランとヘリウムを供給するデカボランガス供給系と未反応ガス及び反応生成物を安全に系外に排出させるためのデカボラン排気系からなり、グロー放電装置を含めたかたちで構成されている。Fig.2 にボロナイゼーションシステムを示す。JT-60U のボロナイゼーションの特徴は、固体の軽水素デカボランを充填した原料容器を加熱してデカボランガスを適量発生させ、これを DC グロー放電の支持ガスであるヘリウムと混合して JT-60U 真空容器内に導入することにある。このため、原料容器を加熱すると共にガス輸送系も $\sim 100^\circ\text{C}$ 程度に加熱して安定な混合ガスの供給を行っている。デカボラン原料容器に充填する量として、1 回のボロンコーティングに必要な最小量としている。JT-60U の場合、真空容器内表面は 200 m^2 程度であるので、平均 300nm の厚さのボロン膜を一様に得るために、最大 100 g の軽水素デカボランを原料容器に充填して実施した。

通常、第一壁が加熱されている温度の $250^\circ\text{C} \sim 300^\circ\text{C}$ では、デカボランガス供給のみでも、軽水素デカボランが第一壁表面で熱分解され、ボロンコーティングされることが報告されている[5]。これを PCVD によるボロンコーティングと区別するために、熱分解によるボロンコーティング(熱 CVD)と言うことにする。熱 CVD に関しては、軽水素デカボランの方がジボランよりもコーティング速度が大きく、JT-60U のように 300°C まで壁温を上げられる装置では、十分に利用できる。しかし PCVD によるボロンコーティングが、軽水素デカボランをプラズマでほぼ 100% 分解して化学活性種(ラジカル)を気相中に生み出し、その活性種が第一壁に到着して表面化学反応を起こすことによって新しいボロン膜相が成長するのに対し、熱 CVD によるボロンコーティングは、気体分子が高温の第一壁に到達した時に振動励起状態になって解離を起こし、表面反応によってボロン膜が成長する。このため、一部の未反応デカボランガスがデカボラン排気系に流出してしまう可能性がある。また、熱 CVD の場合、ガス導入口近傍に於いてボロン膜ができ易く、トラス方向の膜厚分布がばらつく等の問題がある。このため、JT-60U ではグロー放電装置を使用した PCVD によるボロナイゼーションを実施している。

2.3 ボロン膜の分析法

JT-60U 真空容器の高真空状態を破らずにボロナイゼーションに於いて作製したボロン膜の情報を得るには、ボロン化膜厚測定装置[6]を用いる。本装置はトロイダル方向に約 180 度離れた P-4 と P-13 の 2 箇所の上側垂直ポートに取り付けるため、同じ構造のものを 2 台準備する必要がある。本装置では、JT-60U 真空容器を高真空状態に維持したまま、テストピースを取り付けた試料ホルダーを、所定の第一壁表面と同じレベルまでワイヤーによって降ろすことができる。ボロナイゼーション実施中は、テストピースを第一壁表面と同じレベルに保持して、第一壁表面と同じ条件でボロンコーティングを行う。そして、ボロナイゼーション終了後には速やかにテストピースを取り出し、走査形電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy ; SEM) や超深度形状測定顕微鏡並びに、X 線光電子分光装置 (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis ; ESCA) 等の表面分析装置を用いて所定の分析を実施している。Fig.3,4 に SEM 及び ESCA の概要を示す。Fig.5 には膜厚の違いによる形状を確認するために、第 4 回及び第 13 回ボロナイゼーションに於いて作製したボロン膜のテストピースを SEM と超深度形状測定顕微鏡を用いて観察した画像を示す。SEM 像からボロン膜の膜厚が増す程に緻密な膜となっていることが、また、超深度形状測定顕微鏡の像からボロン膜が色彩の異なる数種類の堆積層で形成されていること等が判る。

2.4 軽水素デカボランによるボロナイゼーションの経緯

Table.1 にこれまでに実施したボロナイゼーションの履歴を示す。1992 年に軽水素デカボランと支持ガスにヘリウムを使ったボロナイゼーションを開始し、1995 年にはボロン膜中の軽水素を低減させるため、支持ガスをヘリウムと重水素からなる混合ガスに変更した。更に同年より、重水素デカボランとヘリウムを用いたボロナイゼーションを行っている。混合ガスの利用及び重水素デカボランの導入については、次章以降で詳しく述べる。

3. 軽水素デカボランを用いたボロナイゼーションの問題と対策

3.1 トーラス方向への均一化

JT-60U 真空容器は、主半径 3.32m (容器内半径/外半径 ; 2.21m/4.59m)、トロイダル断面 3.26m の大きさである。このため、Fig.6 に示すようにガス導入口が 1 箇所の場合、ボロン膜のトーラス方向への厚み分布は、ガス導入口から 180 度離れた場所では 2 桁低下することが判った。これを改善するために、真空容器内に 12 箇所の出口を持つデカボランガス輸送管を 1992 年 11 月に敷設した (Fig.2 参照)。デカボランガス輸送管の構成は、主配管 (内径 11 mm) と枝管の組合せで、12 箇所の出口から軽水素デカボランとヘリウムのガスが同じ流量で供給できることを条件に設計、敷設した。従って、12 箇所の出口を構成する枝管については、デカボランガス導入口が設置されている P-5 近傍に於いては内径が小さく (5 mm)、約 180 度離れた P-13,15 ではその内径が大きい (11 mm)。更に、グロー電極をトーラス方向に約 180 度離れた P-3,11 の 2 箇所に設置し、できるだけ一様な DC グロー放電となるように工夫をした。この結果、ボロン

膜のトラス方向への厚み分布は、デカボランガス輸送管布設前後に於いて大幅に改善し、ほぼ均一化することができている。

3.2 支持ガスとボロン膜の特性

JT-60U のボロナイゼーションに於いては、原料として軽水素デカボランを使用するため、ボロン膜中には軽水素が含まれる。その結果、ボロナイゼーション後の実験では、実験放電により第一壁から叩き出された軽水素が、プラズマ燃料の重水素を希釈するという問題があった。このために軽水素の追い出しの実験放電が必要であった。これに対して、1993 年に行った原研と名古屋大学との共同研究[7]で、軽水素デカボラン及びヘリウムと重水素の混合ガスを DC グロー放電中に導入してボロナイゼーションを行うことにより、ボロン膜中に取り込まれる軽水素量が低減出来る見通しを得た。この成果に基づいて JT-60U では、ヘリウムと重水素の混合ガス中でのボロナイゼーション(混合ガス法)を 1995 年より実施した。混合ガス法によるボロナイゼーション終了後、ボロン化膜厚測定装置を用いて作製したボロン膜試料中の水素濃度を ^{16}O 及び ^{58}Ni を用いた反跳粒子検出法(Elastic Recoiled Detection Analysis ; ERDA)で測定したところ、軽水素濃度は 12%から約 3%に減少したことを確認した。混合ガス法によるボロナイゼーションの効果は、実験放電の結果に於いても明らかに現れた。即ち、Fig.7 に見るように、従来のボロナイゼーション(従来法)では、プラズマ中の水素同位体比($\text{H}/[\text{H}+\text{D}]$)が検出限界(5%)以下となるまでに約 200 回の実験放電が必要であった。これに対して混合ガス法は、ボロナイゼーション終了直後の実験放電から水素同位体比が 30%未満と少なく、従来法の 1/2 で検出限界以下となる[8]。

このようにボロン膜中の軽水素と重水素の置き換え(H-D 置換)に於いて混合ガス法は有効であるが、ボロナイゼーションの処理時間に関しては、状況が異なっている。従来法によるボロナイゼーションでは、DC グロー放電が安定状態を保つので短時間での処理が可能である。これに対して混合ガス法では、活性重水素が発生するので第一壁の Chemical sputtering による炭素と化合してボロナイゼーションの初期にメタン(CD_4)が多量に発生し、これが安定な DC グロー放電の維持を阻害してボロナイゼーション自体に多くの時間を必要としてしまう。Fig.8 に第 7 回ボロナイゼーションの情報を示す。本データは、ボロン化膜厚測定装置を用いて作製したボロン膜試料を ESCA を使って分析したものと、ボロナイゼーション期間中の真空容器内のメタン挙動を残留ガス分析装置(RGA)で測定した結果である。Chemical sputtering の影響でボロン膜中の炭素含有量は 20%と高く、特に界面近傍に於いては 60%と最も顕著で、これは真空容器内で生成されるメタンのピーク位置と一致している。Fig.9 に従来法と混合ガス法のボロナイゼーション処理時間の比較を示す。この図から分かるように混合ガス法の場合、同一量のデカボランを処理するのに従来法の約 2 倍の時間を費やしている。

ボロン膜中の軽水素の低減に関しては、DC グロー放電中の支持ガス(混合ガス)に占める重水素の割合を増やせば、ボロン膜の生成時に H-D 置換が促進し、軽水素の含有量が減少する。また、DC グロー放電の安定維持に関しては、ボロナイゼーションの初期段階に於いて炭化水素系、特にメタンの発生量が多く、これは重水素の供給量に比例している。従って、ボロナイゼーションの支持ガスに占める重水素の割合を減らせば、メタンの発生量が減少し、DC グロー放電も安

定する。しかし、双方を成り立たせるには、ポロナイゼーションの際に軽水素の供給を無くし、且つ、重水素の供給も極力抑えることが必要となる。これは軽水素デカボランを使用する限り実現できない。この解として重水素化したデカボランを使用し、ヘリウムの支持ガスでポロナイゼーションを行えば、ボロン膜中の軽水素がミニマムとなる上、メタンの発生も抑制できる可能性がある。この結果、ポロナイゼーションに要する時間が大幅に短縮でき、また、ポロナイゼーション直後の実験放電に於いても、迅速な軽水素の低減が実現するものと期待される。

4. 重水素デカボラン

4.1 重水素デカボランの導入

混合ガス法によるポロナイゼーションの場合、DC グロー放電の支持ガスとしてヘリウム(62%)と重水素(38%)の混合ガスを約 450sccm 供給して放電を安定化させ、そこにデカボラン 5sccm を加える。このため、PCVD 時に真空容器内に存在するガスの割合は、真空容器内構造物等の放出ガスを完全に無視すると、ヘリウム；59.3%、重水素=39.6%、ボロン=0.4%、軽水素=0.7%となっている。これに対して、重水素デカボランを使用したポロナイゼーションでは、ボロン膜生成時の H-D 置換が不要となるので、DC グロー放電の支持ガスはヘリウム単独(450sccm)となる。この場合真空容器内に存在するガスの割合は、ヘリウム；98.9%、重水素=0.64%、ボロン=0.46%となり、真空容器内に存在する重水素量は混合ガス法の 1/60 と極端に少なくなる。この結果、メタンの発生量が抑制され、DC グロー放電の安定化に伴い、ポロナイゼーション所要時間も短縮できる。また、実験放電時の水素同位体比に於いても、デカボランや支持ガスの影響を受けないので、ポロナイゼーション前の壁状態のみ考慮すれば良いことになる。これらのことから、重水素デカボランを導入することとした。

4.2 重水素デカボランの物性

重水素デカボランの JT-60U へ適用に際しては、既存の設備を使用し、従来と同様に加熱してガス化させることが可能かどうかを調べるため、蒸気圧特性や融点等の物性について従来の軽水素デカボランと比較調査した。Fig.10 にデカボラン及び重水素デカボランの蒸気圧曲線を示す。図から判るように、デカボランとほぼ同じ蒸気圧曲線が得られている。また、ボロン膜中の軽水素低減の観点から、重水素デカボランに含まれる軽水素は極力除外する必要がある。以下に重水素デカボランの物性を示す。性質的にもほぼデカボランと同様であり、軽水素含有量は5%以下である。

	B ₁₀ D ₁₁	B ₁₀ H ₁₁
融点	100.6~101.6	98.8~99.7
分子量	136.2	122.2
重水素化率	95atom%以上* ¹	—
化学組成	99%以上* ²	同左
毒性	有り	同左
溶解度	ヘキサン、エタノールに溶解	同左
沸点	200℃	213℃
蒸気圧	2.27kPa(17.0mmHg)/100	2.5kPa(18.75mmHg)/100

*¹ ; NMR及び質量分析による。

*² ; 液体クロマトグラフ(LC)及び赤外分光(IR)分析による。

4.3 製造プロセス

重水素デカボランの製造に関しては、反応温度面等で多少軽水素デカボランの製造プロセスとは異なる。Fig.11 にジボランサイクルと軽水素デカボラン平面構造式を示す。基本的には、軽水素と重水素の置換えとなるが、重水素デカボランは、主原料である NaBD₄(SBD)と BF₃(三フッ化ホウ素)を重合反応させて B₂D₆(重水素化ジボラン)を生成し、更に熱重合させることで重水素デカボランを製造する。以下にデカボランと重水素デカボラン製造法の概略を示す。重水素デカボランの製造に際しては、JT-60U の実験を考慮し、特に原料中の重水素化率の向上に着目してR&Dを行い、SBD並みの重水素化率を確保した。

(1)デカボラン製造法の概略

- ① B₂H₆ + 熱重合反応(180℃) → B₁₀H₁₁
- ② NaBH₄ + 酸 → B₁₁H₁₁ → 酸化(H₂O₂) → B₁₀H₁₁

(2)重水素デカボラン製造法の概略

- ① B₂D₆ → 5B₂D₆ → 熱重合反応(180~200℃) → B₁₀D₁₁ + 8D₂

4.4 重水素デカボランの重水素化率

前節の重水素デカボランの物性の項で示した重水素化率を更に向上させるために、製造工程で軽水素が混入しないよう、生成チャンバー内部に存在する軽水素の追い出しを行う等の工夫を凝らした。その効果を確認するため、核磁気共鳴法及び質量分析法を用いて重水素デカボランの重水素化率の測定を第一化成産業(株)の協力を得て実施した。その結果、各々の分析装置から得られた重水素化率としては、97.4atom%と 99.3atom%であり、平均約 98atom%まで重水素化率を高めることに成功した。以下に各々の測定結果を示す。

(1)核磁気共鳴法による重水素化率の測定

- ① 重水素デカボラン 0.1g とアントラセン(内部標準物質)1.9mg を重水素化クロロホルムに溶解し、核磁気共鳴装置(Nuclear magnetic resonance spectrometer ; NMR)用サンプルチューブに入れ、¹H-NMR(軽水素原子を用いた核磁気共鳴法)測定を行った。

8.4ppm のアントラセンのピークの積分値を 1 として、5 から 2ppm、1.8 から-0.4ppm、-1.4 から-2.9ppm の積分値を各々測定した。Fig.12 に NMR の概要を示す。

- ②天然存在比のデカボラン 0.1 g とアントラセン(内部標準物質)1.9mg を重水素化クロロホルムに溶解し、NMR 用サンプルチューブに入れ、¹H-NMR 測定を行った。8.4ppm のアントラセンのピークの積分値を 1 として、5 から 2ppm、1.8 から-0.4ppm、-1.4 から-2.9ppm の積分値を各々測定した。

上記の測定結果及びその値をもとに求めた重水素化率を以下に示す。

化学シフト	5 から 2ppm(8H)	1.8 から-0.4ppm(2H)	-1.4 から-2.9ppm(4H)
重水素デカボラン	5.14	3.10	2.86
天然存在比デカボラン	37.71	9.56	19.35

以下の計算式により、重水素化率を求める。

$$\text{重水素化率} = 1 - \frac{\text{重水素化物の積分値} \times \text{アントラセン量} \times \text{天然存在比物の重量}}{\text{天然存在比物の積分値} \times \text{アントラセン量} \times \text{重水素化物の重量}}$$

これにより、各ピーク位置、トータルの重水素化率は以下ようになる。

化学シフト	5 から 2ppm	1.8 から-0.4ppm	-1.4 から-2.9ppm	トータル
重水素化率	97.8%	94.9%	97.7%	97.4%

以上の結果より、核磁気共鳴法によって求められた重水素化率は、97.4atom%であった。

(2)質量分析法による重水素化率の測定

重水素デカボラン 0.01 g (試料)を加熱気化させ、二重収束(電場+磁場の順)型質量分析計(Double-focusing mass spectrometer ; MS)に直接導入し、以下の条件にて質量スペクトルを測定した。Fig.13 に MS の概要を示す。スペクトルの内、M/Z=137 及び M/Z=138 のピーク強度に着目し、これらのピークを与える化学種は以下であることから試料の重水素化率を求めた。

○質量数 137 ; ¹¹B₁₀HD₁₃(a)または、¹¹B⁹₁₀BD₁₄(b)

○質量数 138 ; ¹¹B₁₀D₁₄(c)

すなわち、試料中に於ける(a)、(b)及び(c)の各分子イオンの存在比率を順に α、β、γ とすれば M/Z=137 及び M/Z=138 のピーク強度比(137 のピーク強度に対する 138 のピーク強度比)は、γ/(α+β)に等しくなること、及び各分子イオンの存在比率である α、β、γ は以下の式により表せることから、重水素化率を求めることとした。

$$\alpha = (0.801)^{10} \times 14C1 \times (1-X) \times X^{13} \quad [1]$$

$$\beta = {}_{10}C1 \times (0.801)^9 \times (0.199) \times X^{11} \quad [2]$$

$$\gamma = (0.801)^{10} \times X^{11} \quad [3]$$

(尚、試料中に於けるホウ素原子の存在比は、 ${}^{11}\text{B} : {}^{10}\text{B} = 0.801 : 0.199$ とし、試料中の重水素存在比を X とした。また、 $nCm = n! / (m! \times (n-m)!)$ とする。)

算出式[1]、[2]、[3]及び質量スペクトルの測定結果から、質量分析法により求められた重水素化率は 99.3atom% であった。

4.5 既存システムとの整合性

(1) ガス検知

ボロナイゼーションシステムは負圧で使用するが、安全のために除害装置(DFL)の二次側にブレークモニタ(TG-4000BM)を、真空容器とデカボランガス供給系の取合い部分ならびに原料容器の加熱部にガス検知器(EC-572、GK-K34PNX)を設置してある。ガス検知に於いては、デカボラン 1 分子が 5 分子のジボランに相当して検知が行われる。ブレークモニタは隔膜電極式で、検知感度は 1ppm である。ガス検知器は定電位電解式で、検出感度は 0.05ppm、検出範囲は ~ 0.3 ppm である。重水素デカボランの使用に先立ち、既存システムのガス検出機器の適応性について確認した。試験方法は、0.05ppm \sim 0.25ppm 程度の重水素デカボランの濃度にブレークモニタ、ガス検知器並びに原料容器脱着作業等で使用する簡易ガスモニタ(EC-565S、SC-90)を晒し、軽水素デカボランと比較して動作状態に異常が無いことを確認した。

(2) 排ガス処理

ボロナイゼーションシステムのガス排気部には、未反応ガスを処理するための DFL が取付けてある。除害装置には吸着剤(過マンガン酸カリウム)が充填されており、これがデカボランガス中に含まれるジボラン成分を吸着除去するものである。吸着剤の重水素デカボランに対する処理能力を評価し、軽水素デカボランのそれと比較した結果、吸着剤の処理能力は、軽水素デカボランでは 60 g/kg であったのに対して、重水素デカボランでは 67 g/kg であり、同程度の処理が可能であることを確認した。

(3) システム内に残留する熱 CVD によって作製されたボロン膜の影響

1996 年までに 500 g の軽水素デカボランを使用し、計 8 回のボロナイゼーションを実施している。この過程で、システム内には熱 CVD によって作製されたボロン膜が存在した。その厚みは 0.5 \sim 3.4 μm で、膜中には当然、軽水素が存在する。ボロナイゼーション時に熱 CVD によって作製されたボロン膜から放出される軽水素が重水素デカボランに及ぼす影響を調査するため、昇温脱離法(thermal desorption spectrometry ; TDS)を用いてボロン膜からの軽水素及び重水素の脱離温度と量を評価した。Fig.14 にシステム内に残留する熱 CVD によって作製されたボロン膜の放出ガス特性を示す。この結果、250 $^{\circ}\text{C}$ で軽水素の放出がはじまり、600 $^{\circ}\text{C}$ で放出量のピークを向かえることが明らかとなった。即

ち、ボロナイゼーションシステムは 100℃程度にベーキングして使用することから、JT-60U のボロナイゼーション環境下に於いては、重水素デカボランに影響を与える軽水素の脱離が起こらないことを確認した。

5. 重水素デカボランを用いたボロナイゼーション

2000 年 3 月にはじめて重水素デカボランを使用し、JT-60U で実際にボロンコーティングを行い、ボロン膜中の軽水素の低減、ボロナイゼーション処理時間の短縮並びに実験に与える効果について確認した。

5.1 ボロン膜中の軽水素の低減

Fig.15 に重水素デカボランを用いた第 12 回ボロナイゼーション時の軽水素分圧の挙動(a)とボロナイゼーション後の長期的な水素同位体比の推移(b)を示す。尚、(b)は Fig.7 に重水素デカボラン使用後の結果を追加したものである。図(a)に見るように、重水素デカボランを用いることで、真空容器に存在する軽水素は、従来法によるボロナイゼーションの 1/750、同じく混合ガス法の 1/25 までに減少した。また、図(b)から混合ガス法では、直後の実験放電に於いてプラズマ中に軽水素が検出できなくなるまでに、120 ショットの調整放電を必要としていた。これに対して、重水素デカボランを用いたボロナイゼーション(重水素化法)では、ボロナイゼーション直後の水素同位体比が第一壁からの拡散等の影響で一旦増加したが、数ショットの調整放電を行うだけで検出限界以下となり、混合ガス法によるボロナイゼーションと比べて 1/10 と大幅に節約できている。これは、従来 4 日間かけていた壁調整の期間が半日で完了することを示している。

5.2 ボロナイゼーション処理時間の短縮

Fig.16 に重水素デカボランを用いた第 13 回ボロナイゼーションの情報を示す。本データは、ボロン化膜厚測定装置を用いて作製したボロン膜試料を ESCA を使って分析したものと、ボロナイゼーション期間中の真空容器内のメタン挙動を RGA で測定した結果である。真空容器内に存在する重水素の量が僅かとなったことで、メタンの分圧は極端に低く抑えられ、混合ガス法によるボロナイゼーションの 1/10 以下となっている。また、これを反映してボロン膜中の炭素も減少し、特に界面部分の炭素は従来 1/3 まで激減している。この効果は、ボロナイゼーション処理時間の短縮にも顕著に現われている。Fig.17 にボロナイゼーション処理時間の短縮を示す。混合ガス法によるボロナイゼーションでは、開始から 20 時間以上経過し、第一壁表面に一定量のボロン膜が蒸着しなければ DC グロー放電が安定せず、デカボランの流量が確保できなかったのに対し、重水素化法の場合は、ボロナイゼーション開始直後からデカボランの最大流量が確保できていることが分かる。この結果、処理時間の飛躍的な短縮が可能となり、例えば、デカボラン 20 g を処理する場合、混合ガス法では 30 時間要していたものが、重水素化法では約 1/4 の 8 時間で終了できるようになった。

5.3 重水素デカボランの特徴

軽水素デカボランを用いた従来法によるボロナイゼーションでは、3.2 章で述べたように、DC グロー放電は安定状態を保つので短時間でのボロナイゼーションが可能である。ところが、ボロナイゼーション後の実験放電に於いては、ボロン膜から叩き出された軽水素がプラズマ燃料を希釈してしまう。この結果、ボロナイゼーション後の調整放電に 200 ショット以上を要する。これに対して、混合ガス法によるボロナイゼーションの場合は、PCVD 時に H-D 置換が起こり、ボロン膜に取り込まれる軽水素の割合を減らすことができ、その後の調整放電が短縮される。しかしこのケースでは、多量のメタンが発生し、これが安定な DC グロー放電の維持を阻害してボロナイゼーションに多くの時間を必要としてしまう。これらを解決するために、JT-60 では軽水素デカボランに代って重水素デカボランを使用したボロナイゼーションを採用した。重水素デカボランの特徴は、(1)メタンの発生が抑制できるので、ボロナイゼーション処理時間が短いこと、(2)軽水素をほとんど含まないので、ボロナイゼーション後の調整放電が極僅かで済むことである。Table.2 に JT-60 のボロナイゼーションの特徴を示す。

5.4 プラズマ実験に対するボロナイゼーションの効果

重水素デカボラン 70 g (平均膜厚 210nm) を使用してボロナイゼーションを行い、実験放電に於いて、その長期的な持続効果について調べた。中性粒子線加熱 (NB)4MW(L-モード) に於いて、定めた電子密度 ($n_e = 1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) になるように密度フィードバック制御を用いた放電を繰り返す、また、直前の放電の影響をなくすために、同じ放電条件で 2 ショットの放電を続けて行い、2 番目の放電で実効電荷数 (Z_{eff}) 及び電子密度に対する酸素とボロンの密度割合を評価した。

(1) 不純物量

ボロナイゼーションの前後では、実効電荷数が 2.5 から 2.0 に減少し、電子密度に対する酸素密度割合は 1.5 から 0.7 に減少した。また、ボロナイゼーション後の電子密度に対するボロン密度割合は 1% であり、この状態が 100 ショット継続した。

(2) リサイクリング

ボロナイゼーション後には、設定した密度を得るために必要な燃料(重水素)供給量が第一壁が低リサイクリング状態となり、約 5 倍に増加した。これは、ボロン膜による壁排気効果であり、この効果は約半月、100 ショット継続した。

6. おわりに

JT-60U のボロナイゼーションに重水素デカボランを導入した結果、従来の軽水素デカボランを使ったボロナイゼーションに比べて迅速な軽水素低減及び処理時間の大幅な短縮の実現に成功した。

今後はこの成果を踏まえ、有効な壁調整法である重水素化法によるボロナイゼーションが更に

効率的に実施できるよう、ボロナイゼーションシステムの改修を行う予定である。また、実験の目的毎に要求される壁状態を迅速且つ、安全に確保できるよう、新たなボロナイゼーションの実施手順を検討している。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、有意義なコメント及び御指導を戴いた宮直之 JT-60 第 2 試験室長及び清水正亜核融合装置試験部部长、栗山正明同次長に深く感謝します。また、ボロナイゼーションの持続性に関する実験データを提示し、議論して頂いた仲野友英研究員、久保博孝主任研究員、東島智研究員、伊丹潔副主任研究員に感謝します。更に、重水素デカボランの製造にあたった第一化成産業㈱の平塚保幸氏、伊藤幸夫氏に感謝します。

参考文献

- [1] J. Winter, H.G. Esser, L. Kennen et al., J. Nucl. Mater. 162-164 (1989) 713.
- [2] G.L. Jackson and the DIII-D Team, J. Vac. Sci. Technol. A 10 (1992) 1244.
- [3] M. Saidoh, N. Ogiwara, M. Shimada et al., Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993) 3276.
- [4] M. Saidoh, H. Hiratsuka T. Arai et al., Fusion Egn. Design 22 (1993) 271.
- [5] M. Yamage, T. Ejima, M. Saidoh, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 32 (1993) 3968.
- [6] 柳生純一, 他, JAERI-M 93-249 (1994)
- [7] M. Yamage, H. Sugai, T. Saito, et al., J. Nucl. Mater. 220-222 (1995) 743.
- [8] J. Yagyu, N. Ogiwara, M. Saidoh, et al., J. Nucl. Mater. 241-243 (1997) 579-584.

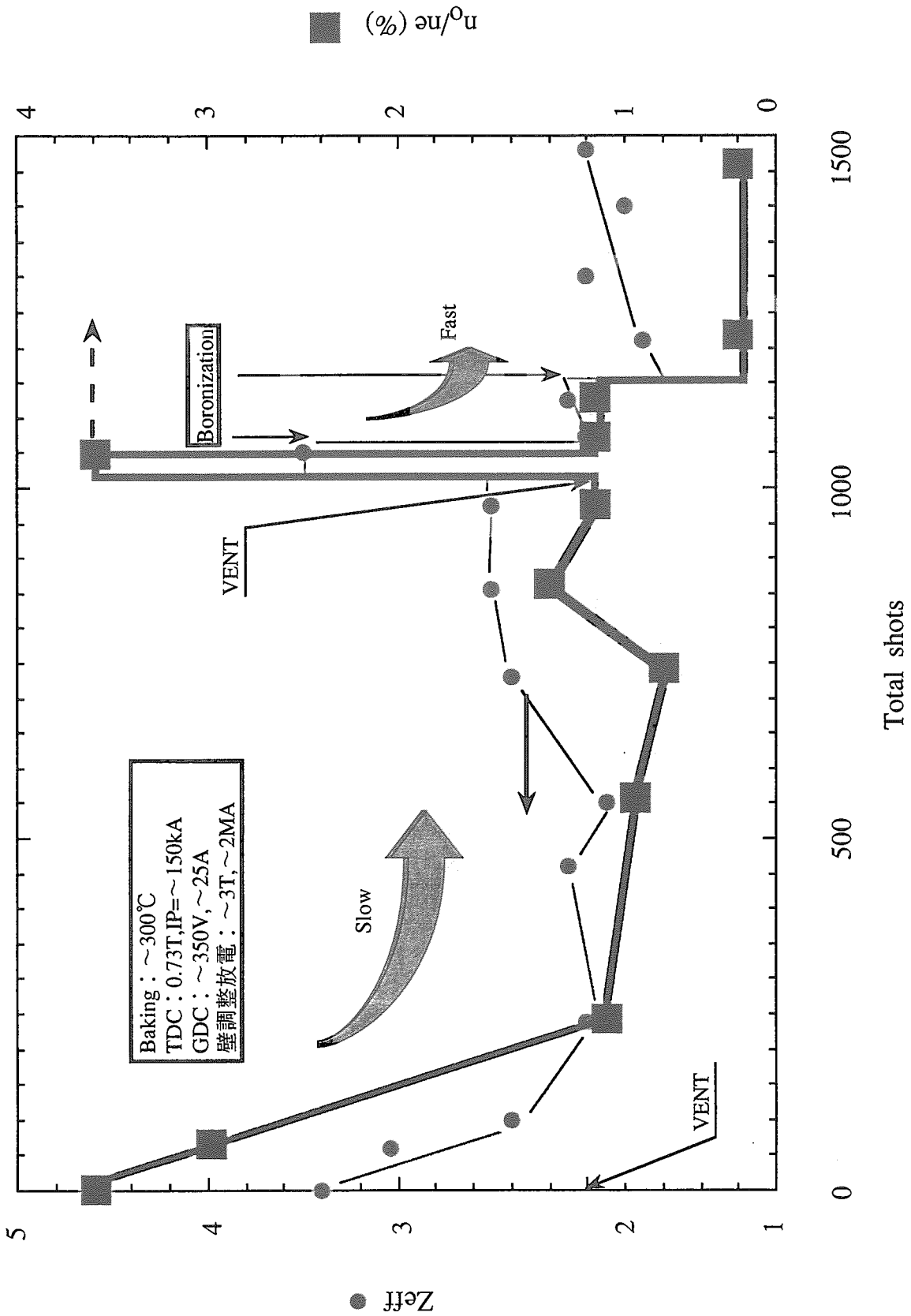
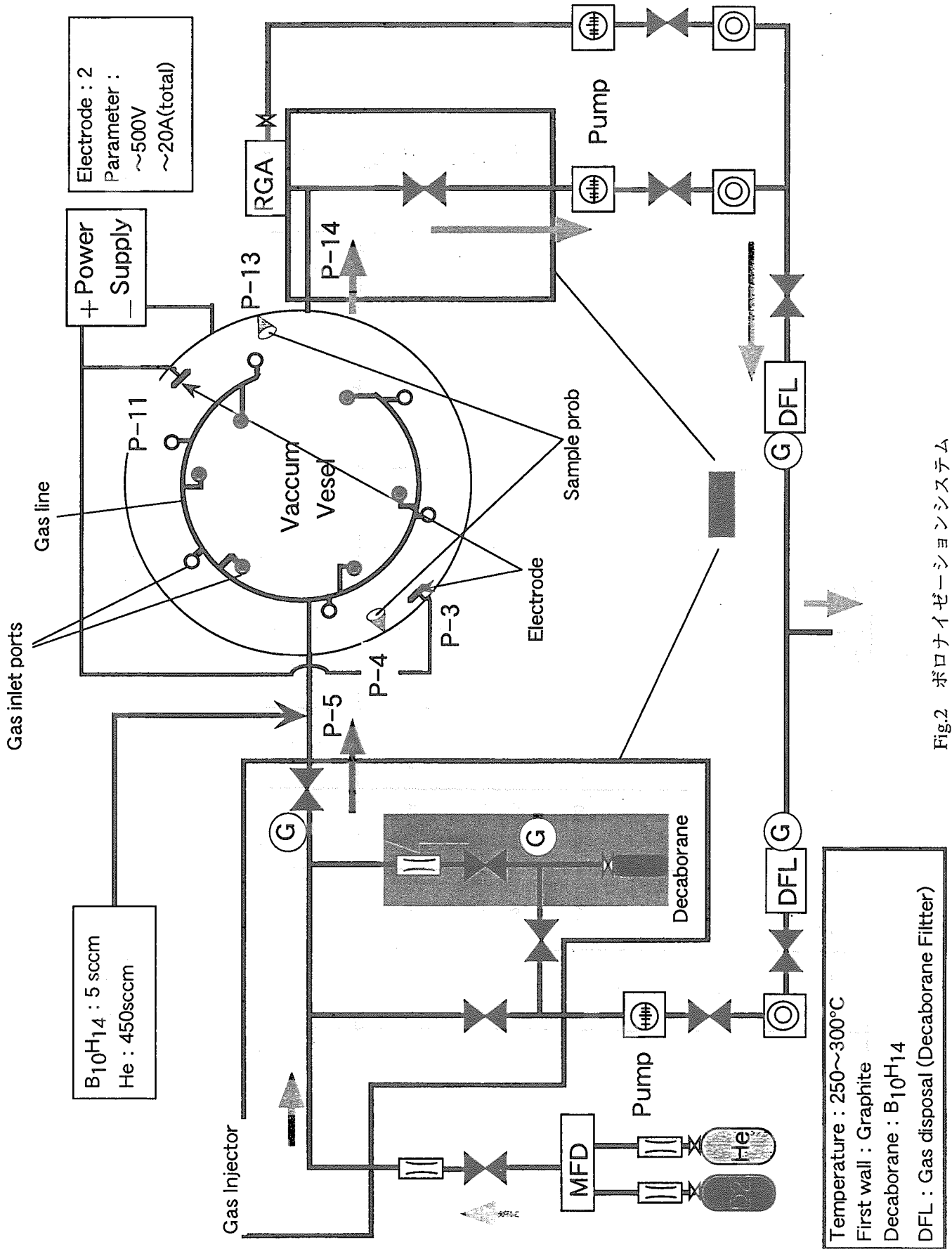


Fig.1 ボロナイゼーションの効果
 重水素放電に於いて確認したボロナイゼーション前後の実効電荷数と酸素不純物の変化。通常、ベーキングやTDC、GDC等を行わないが200ショット以上かけて到達する不純物レベルに、1回のボロナイゼーションで到達することができる。



Temperature : 250~300°C
 First wall : Graphite
 Decaborane : B₁₀H₁₄
 DFL : Gas disposal (Decaborane Filter)

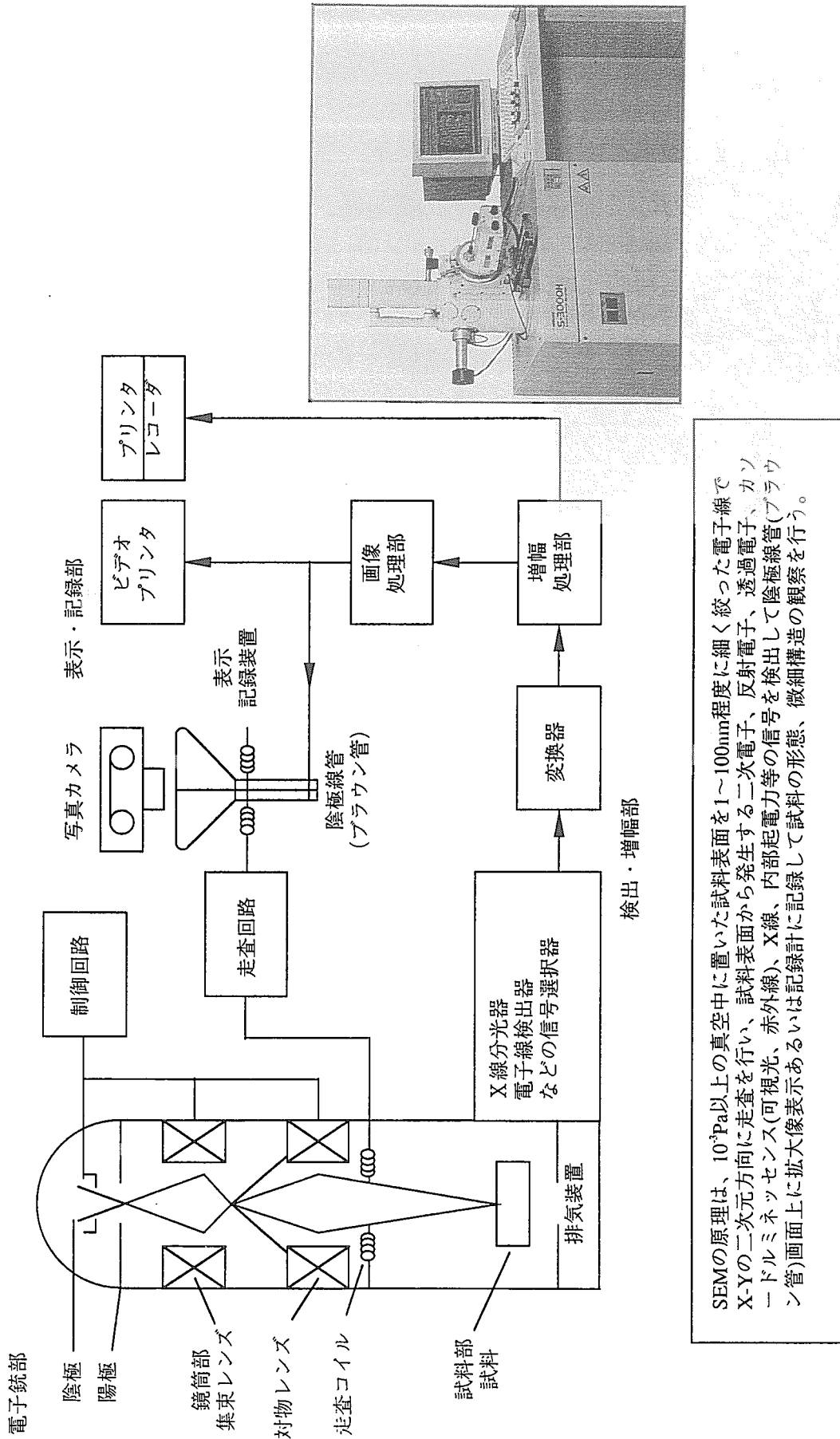
Fig.2 ボロナイズーションシステム

Table.1 ポロナイゼーションの実施履歴

項	回数	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	第7回	第8回	第9回	第10回	第11回	第12回	第13回
実施日		'92-7-30	'92-9-1	'93-2-17	'93-7-2	'94-2-4	'95-3-3	'96-3-6	'96-6-17	'97-7-14	'98-3-13	'99-3-12	'00-3-3	'00-9-4
使用量(g)		10	15	50	100	100	100	75	50	70	50	70	70	20
処理時間(h)		10	10	36	57	43	55.5	41.6	41.2	37.2	42	59.0	30.0	8.0
壁温(°C)		300	300	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	300
ガス吹出口		1	1	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
支持ガス		He	He	He	He	He	He+D ₂	He+D ₂	He+D ₂	He	He+D ₂	He+D ₂	He	He
ポロン膜平均膜厚(nm)		30	45	150	300	300	300	225	150	210	150	210	210	60
ポロン膜測定値(nm)		—	2-80	100-400	210-1500	—	320-	200-300	—	195-950	—	193-262	30-136	-145
組成比(母材)		—	95	85-90	>90	—	75	80	—	95	—	80	85	>90
ポロン(%)		—	<5	10-15	<10	—	25	20	—	5	—	20	15	<10
炭素(%)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
軽(重)水素濃度		—	10	10-14	10-12	—	2-4	5-7	—	—	—	—	—	—
軽水素(H/Host) (%)		—	—	—	—	—	26-32	22-28	—	—	—	—	—	—
重水素(D/Host) (%)		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
DCグロ-放電 電極数			2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	1	3
総電流(V)			16	16	16	20	20	20	15~20	20	8~20	20	3	13

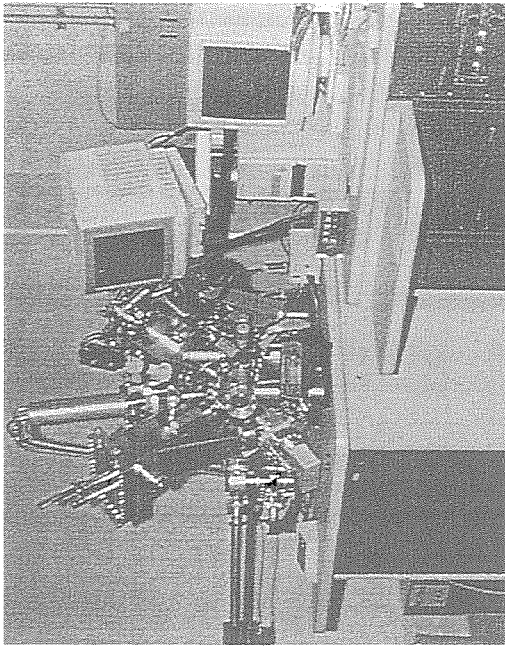
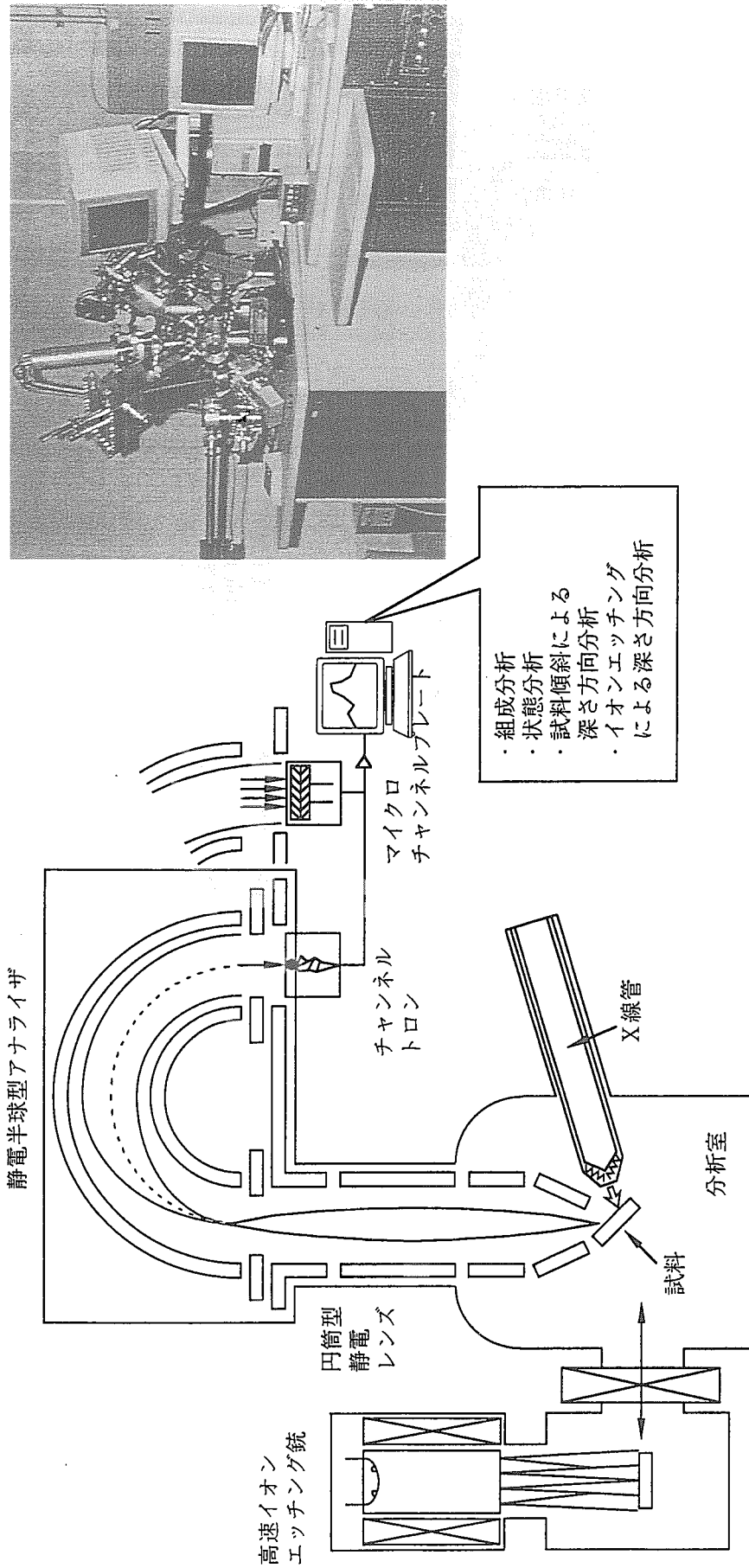


1992年に軽水素デカポランと支持ガスにヘリウムを使ったポロナイゼーションを開始し、1995年にはポロン膜中に含まれる軽水素を低減させるため、支持ガスをヘリウムと重水素から成る混合ガス(混合ガス法)に変更した。更に2000年からは、重水素デカポランとヘリウムを使ったポロナイゼーション(重水素化法)を実施。



SEMの原理は、 10^{-3} Pa以上の真空中に置いた試料表面を1~100nm程度に細く絞った電子線でX-Yの二次元方向に走査を行い、試料表面から発生する二次電子、反射電子、透過電子、コンドルミネセンス(可視光、赤外線)、X線、内部起電力等の信号を検出して陰極線管(ブラウン管)画面上に拡大像表示あるいは記録計に記録して試料の形態、微細構造の観察を行う。

Fig.3 走査電子顕微鏡(SEM)の概要



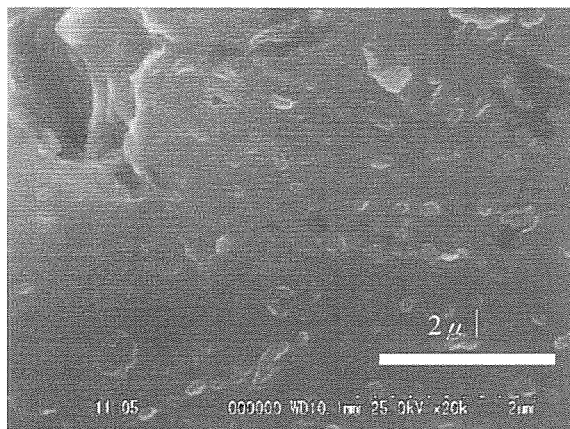
ESCAは、XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy)とも呼ばれ、X線を物質に照射した時に放出される光電子の運動エネルギーを測定し、表面を構成する原子や分子、その化学結合状態に関する情報を得る装置である。また、高速イオンエッチング銃を装備しているので、深さ方向の分析も可能である。ESCAでは、一定のエネルギーを持つMgやAlの軟X線を超高真空中($<10^{-8}$ Pa)に置かれた試料表面に照射した時、光電効果によって放出される光電子を静電半球型アナライザでその運動エネルギーを測定し、表面の情報を得る。

Fig.4 X線光電子分光装置(ESCA)の概要

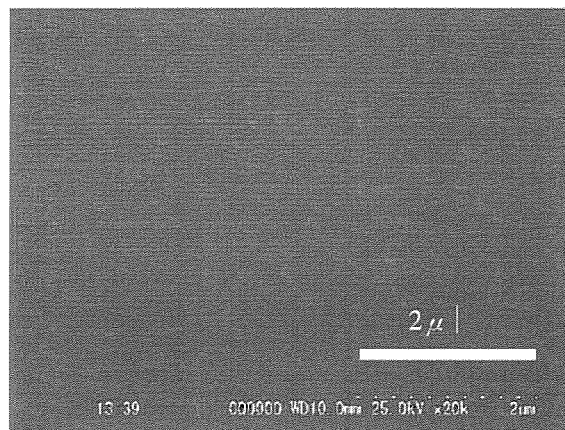
第13回ボロナイゼーションに
於いて作製したボロン膜
<20g/145nm>

第4回ボロナイゼーションに
於いて作製したボロン膜
<100g/1500nm>

SEM像

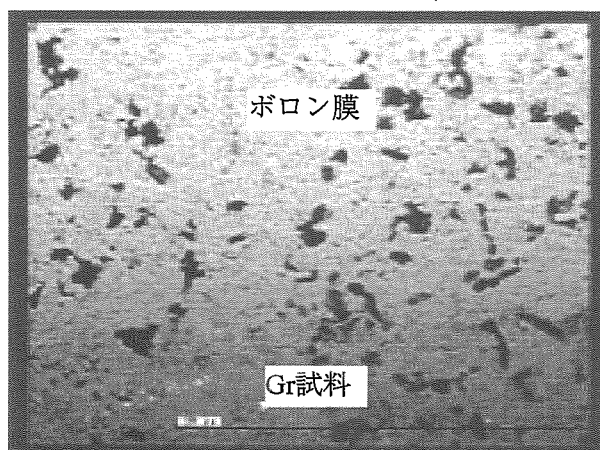


- ・倍率；×20000
- ・考察；ボロンの蒸着面が少なく
下地(Gr)が見える。

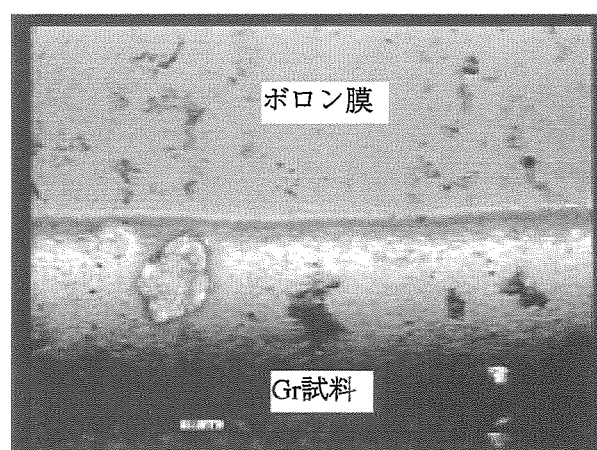


- ・倍率；×20000
- ・考察；ボロンが積層し、表面が波状
に見える。

超深度形状測定顕微鏡像



- ・倍率；×900
- ・考察；ボロンが薄いため、界面が
不明瞭



- ・倍率；×900
- ・考察；界面部分の画像から、ボロン膜
は色彩の異なる数種類の堆積層
から形成されていることが判る。

Fig.5 JT-60Uで作製したボロン膜の観察画像

This is a blank page.

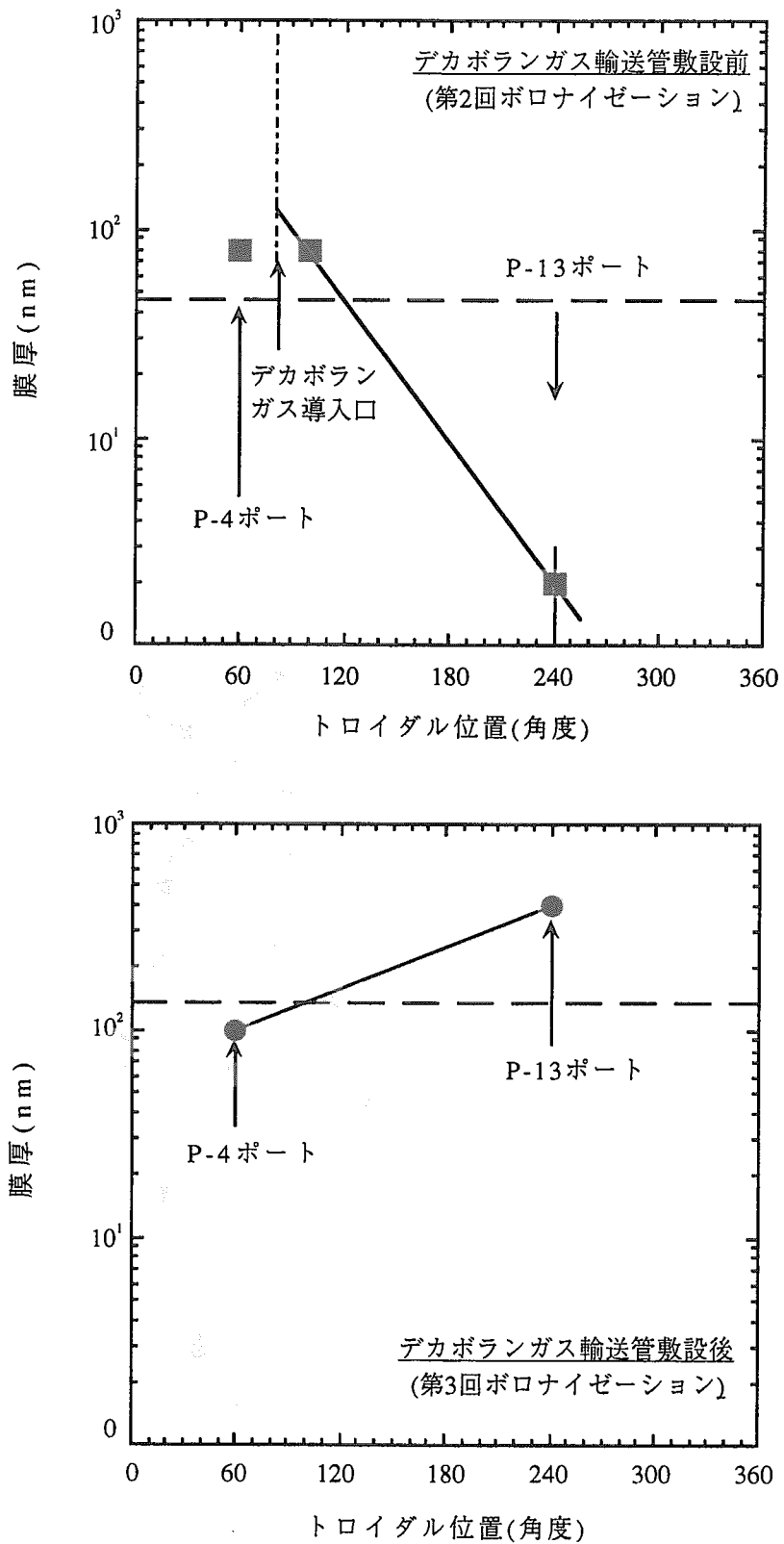


Fig.6 デカボラン輸送管敷設前後のボロン膜の膜厚分布

ガス導入口が1箇所の場合、トーラス方向のボロン膜分布は不均一であった。均一度改善のため、ガス吹き出し口を12箇所に分散させた結果、ボロン膜の分布は均一化した。

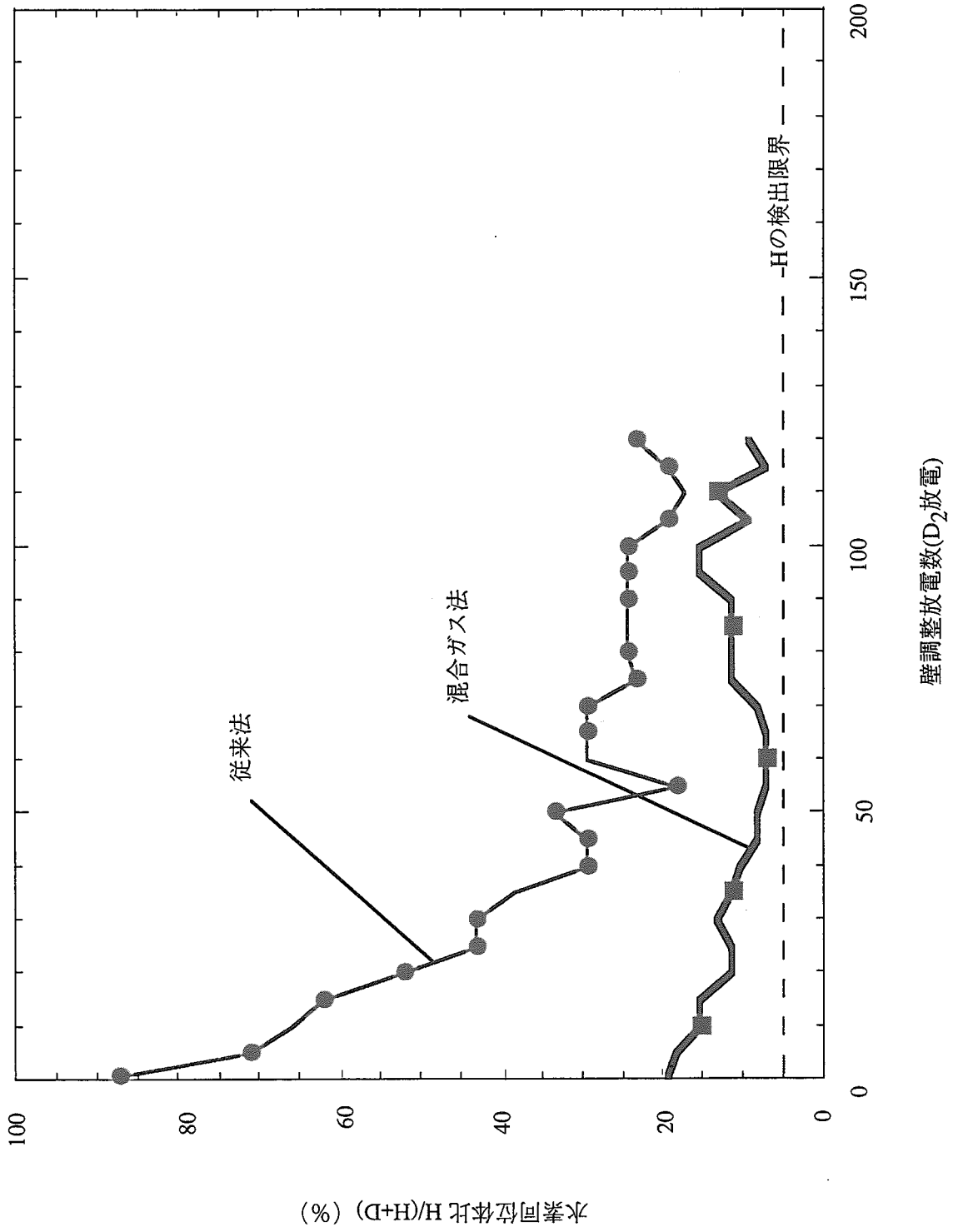


Fig.7 従来法と混合ガス法での長期的な水素同位体比の推移
 混合ガス法を用いたボロナイゼーションでも、プラズマ中の軽水素が検出限界以下となるまでに約120回の重水素放電
 が必要となっている。(但し、従来法の1/2の放電数)

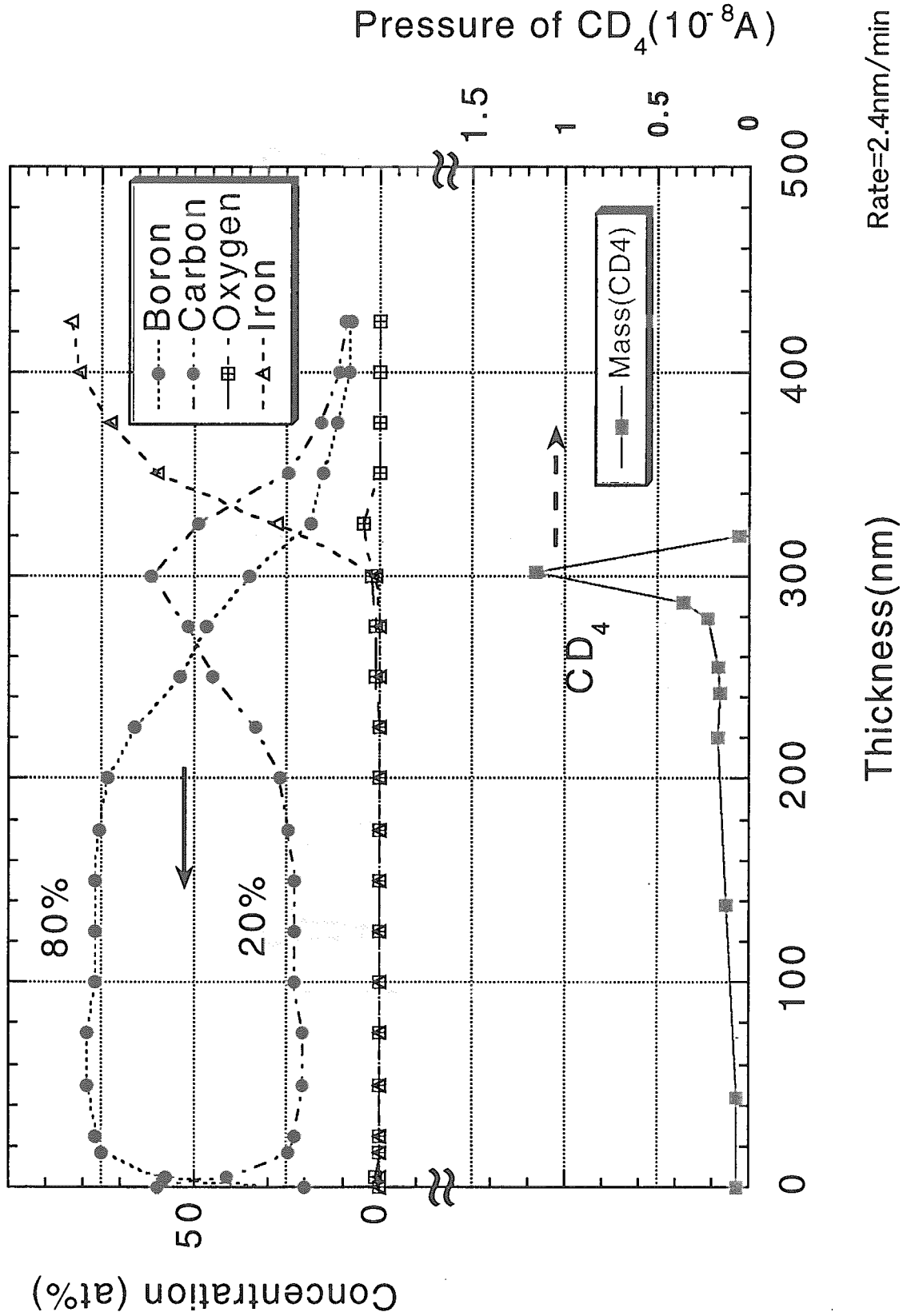


Fig.8 混合ガス法によるボロナイゼーションで作製したボロン膜試料中の元素組成とメタンの挙動
 支持ガスに混合ガスを用いた場合、化学スバッキングの影響でボロン膜中の炭素含有量が多くなる。これは界面に於いて最も顕著
 で、真空容器内で生成されるメタンのピーク位置と一致する。

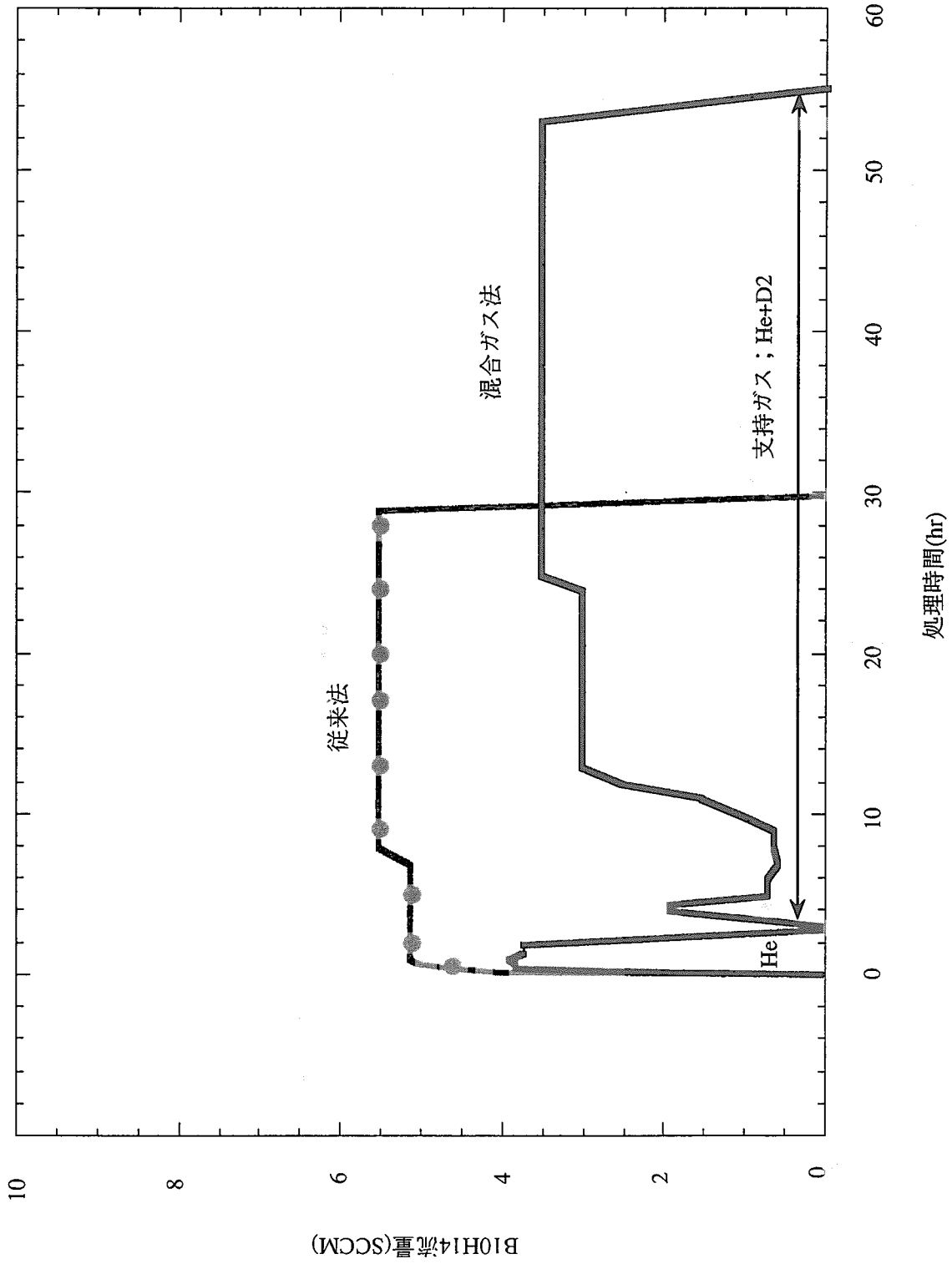


Fig.9 ポロナイゼーション処理時間の比較
 混合ガス法によるポロナイゼーションの場合、メタンの影響からDCグロー放電が不安定となり、従来法に比べて約2倍の
 処理時間が必要となる。

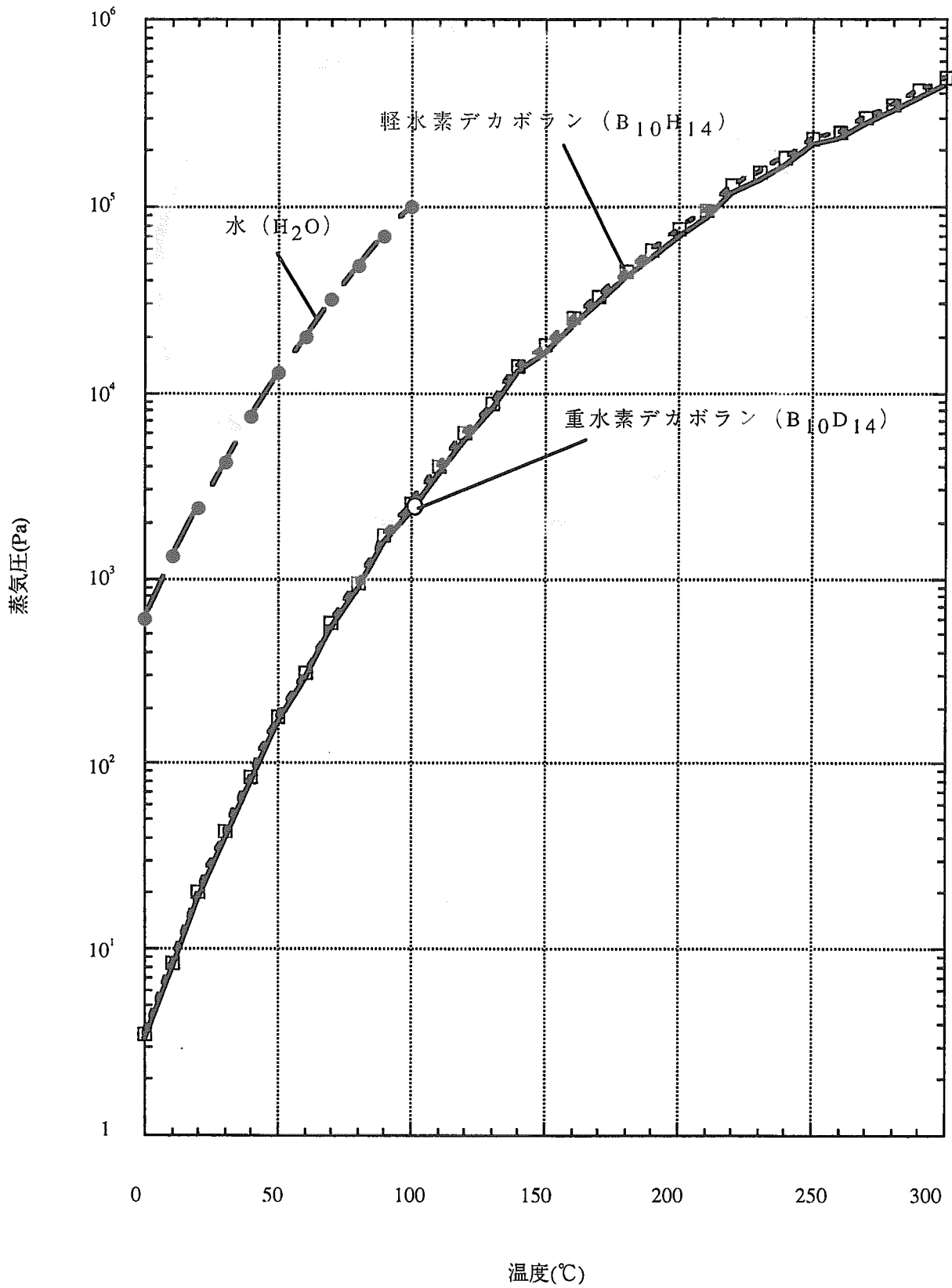
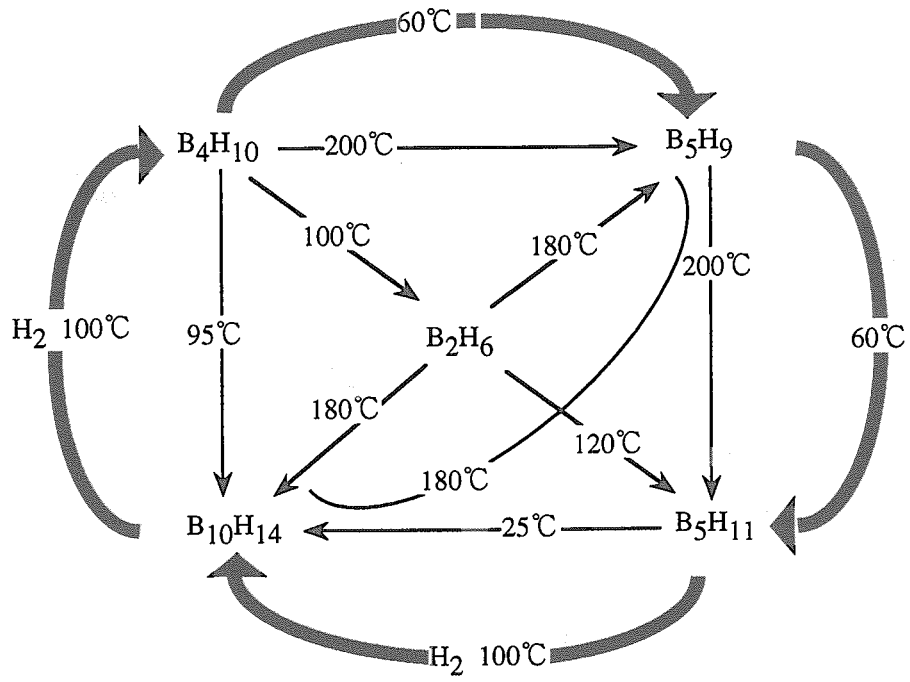
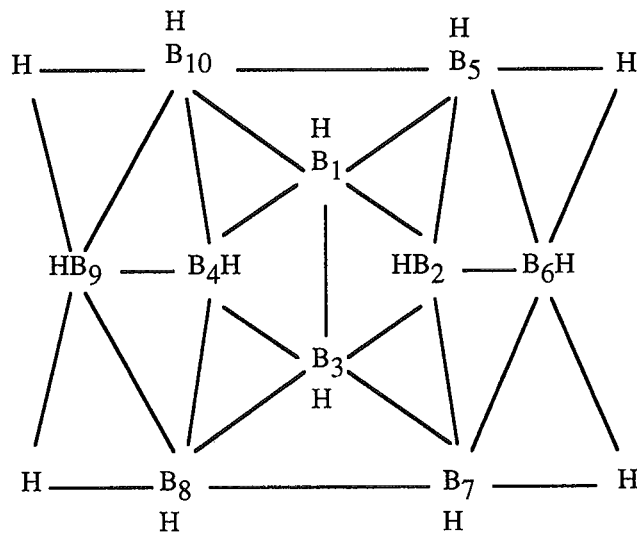


Fig.10 軽水素デカボラン及び重水素デカボランの蒸気圧曲線

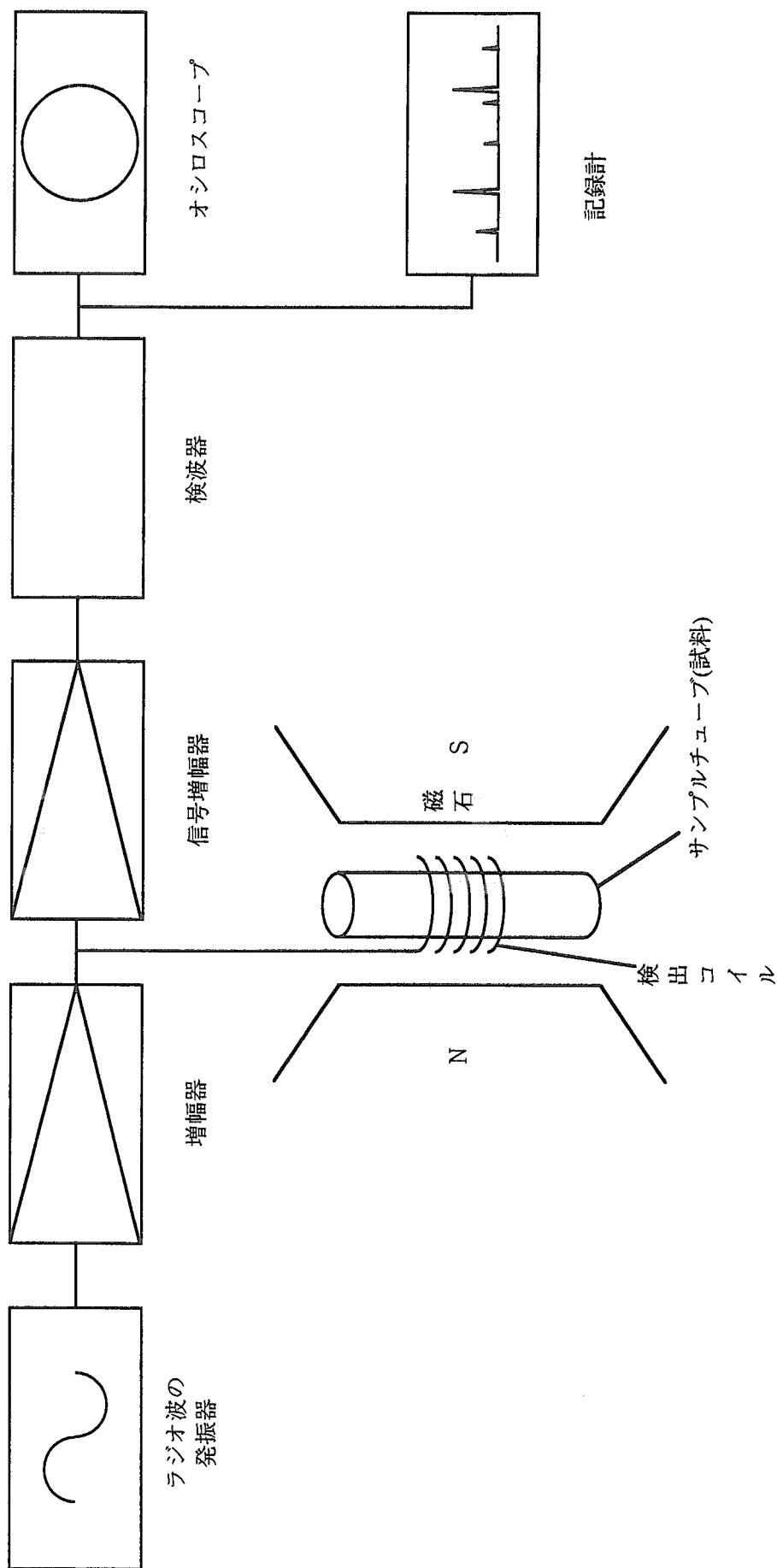


ジボランサイクル



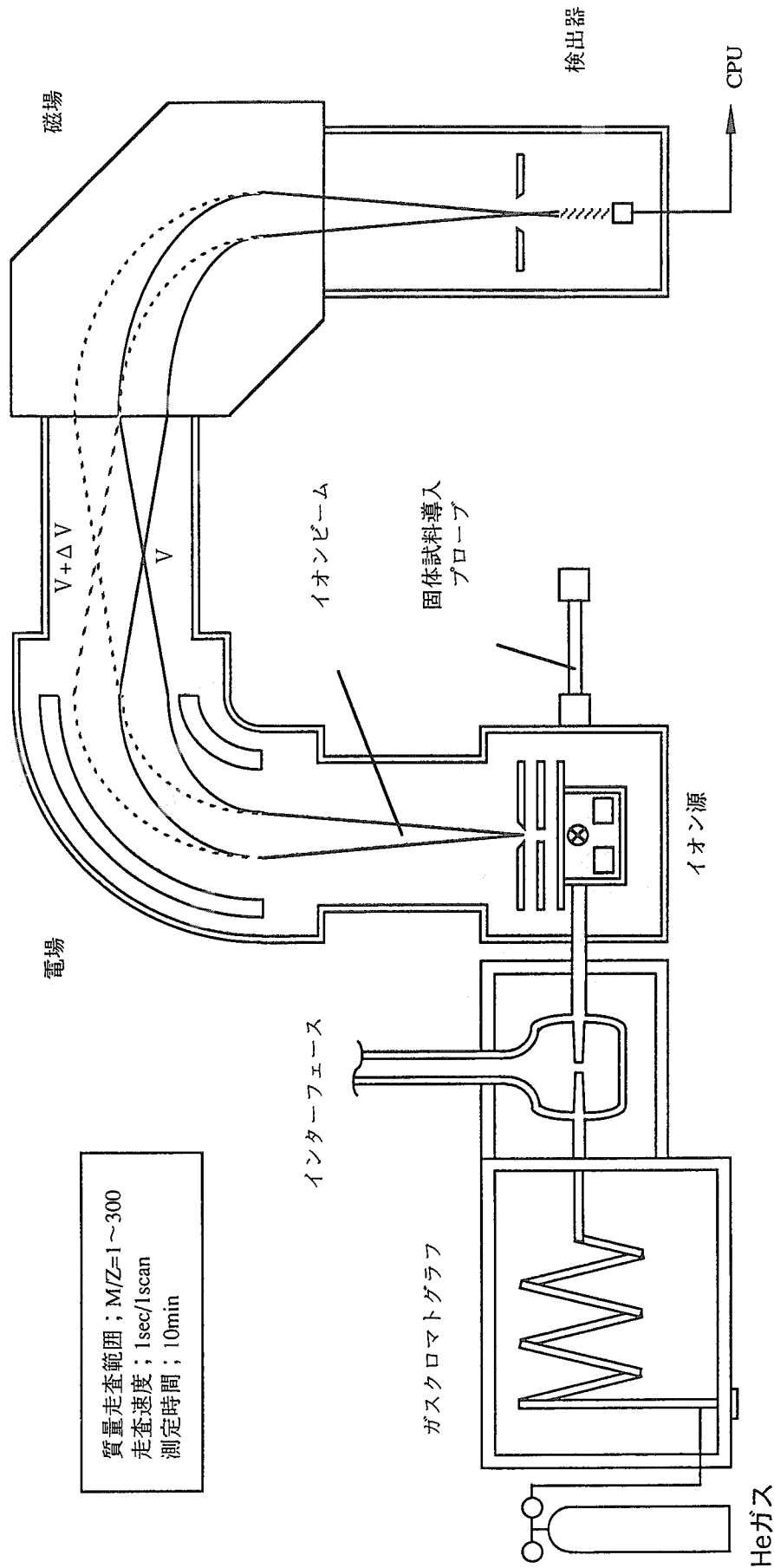
軽水素デカボラン平面構造式

Fig.11 ジボランサイクルと軽水素デカボラン平面構造式



核の磁気モーメントを持っている原子(^1H , ^{13}C , ^{31}P 等)を静磁場の中に入れると磁気モーメントは磁場の作用で運動する。この運動の周期と同じ周波数の電磁波をある方向から加えると、磁気モーメントの運動は電磁波のエネルギーを吸収して振幅が変化する。これが、核磁気共鳴である。

Fig.12 核磁気共鳴装置(NMR)の概要



質量走査範囲; $M/Z=1\sim300$
 走査速度; 1sec/1scan
 測定時間; 10min

MSは、高真空($10^{-4}\sim 10^{-6}$ Pa)に保たれたハウジングに、イオン源、分析場(磁場、電場)、検出器等を配置した装置である。試料は、気化した状態で高電位(1~8kV)を持つイオン化室に導入される。試料分子は加速された熱電子(20~70eV)による衝撃を受け、電子を放出してイオンとなる。この生成イオンを用いて質量分析を行う。

Fig.13 二重収束質量分析装置(MS)の概要

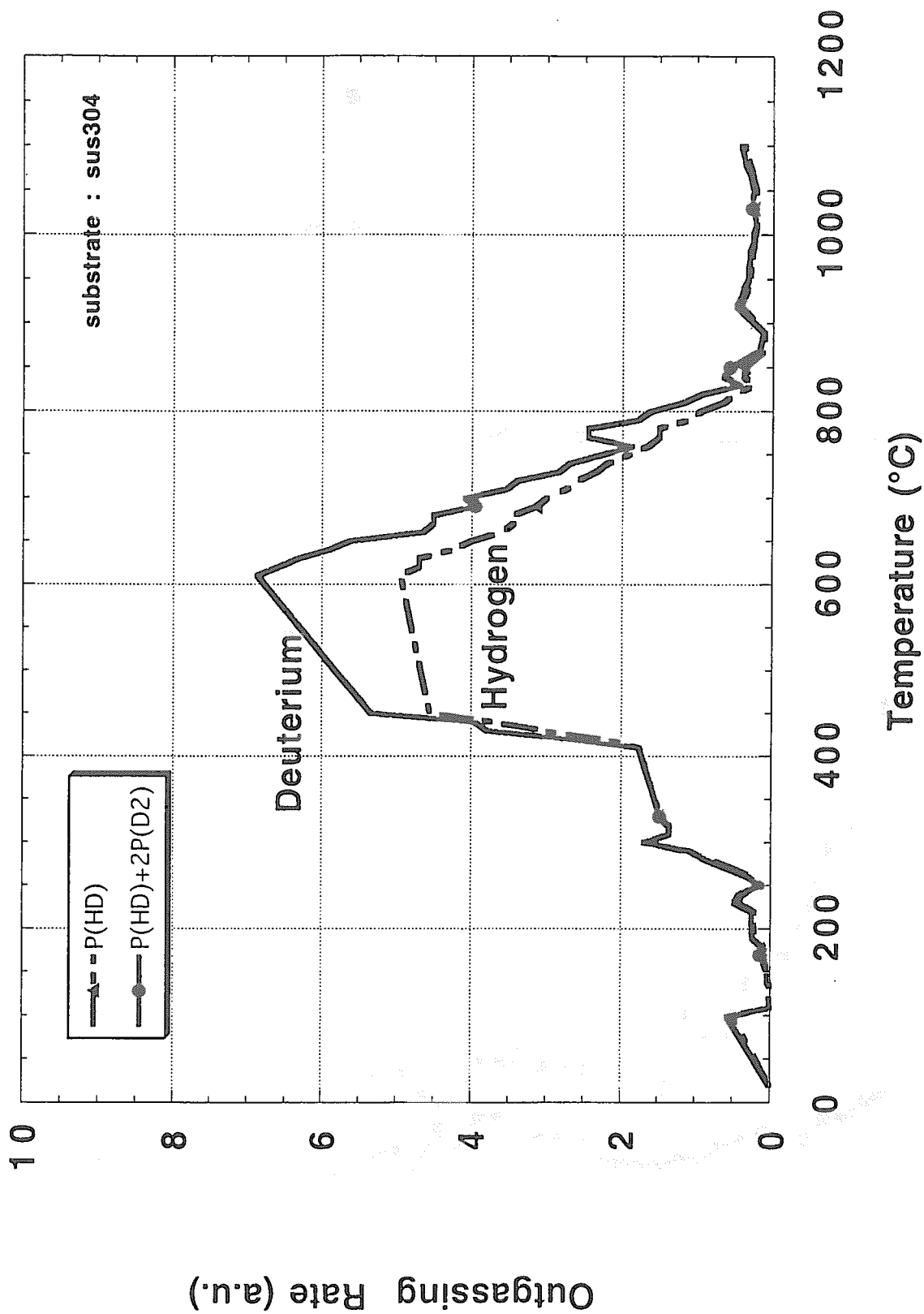


Fig.14 システム内に残留する熱CVDによって作製されたボロン膜の放出ガス特性。ボロン膜中に含まれる水素同位体は、250°Cから放出される。従って、ボロナイゼーションシステムに於いて採用しているベークিং温度(～100°C)では、軽水素の脱離による重水素デカボランの希釈等の影響は少ないと考えられる。

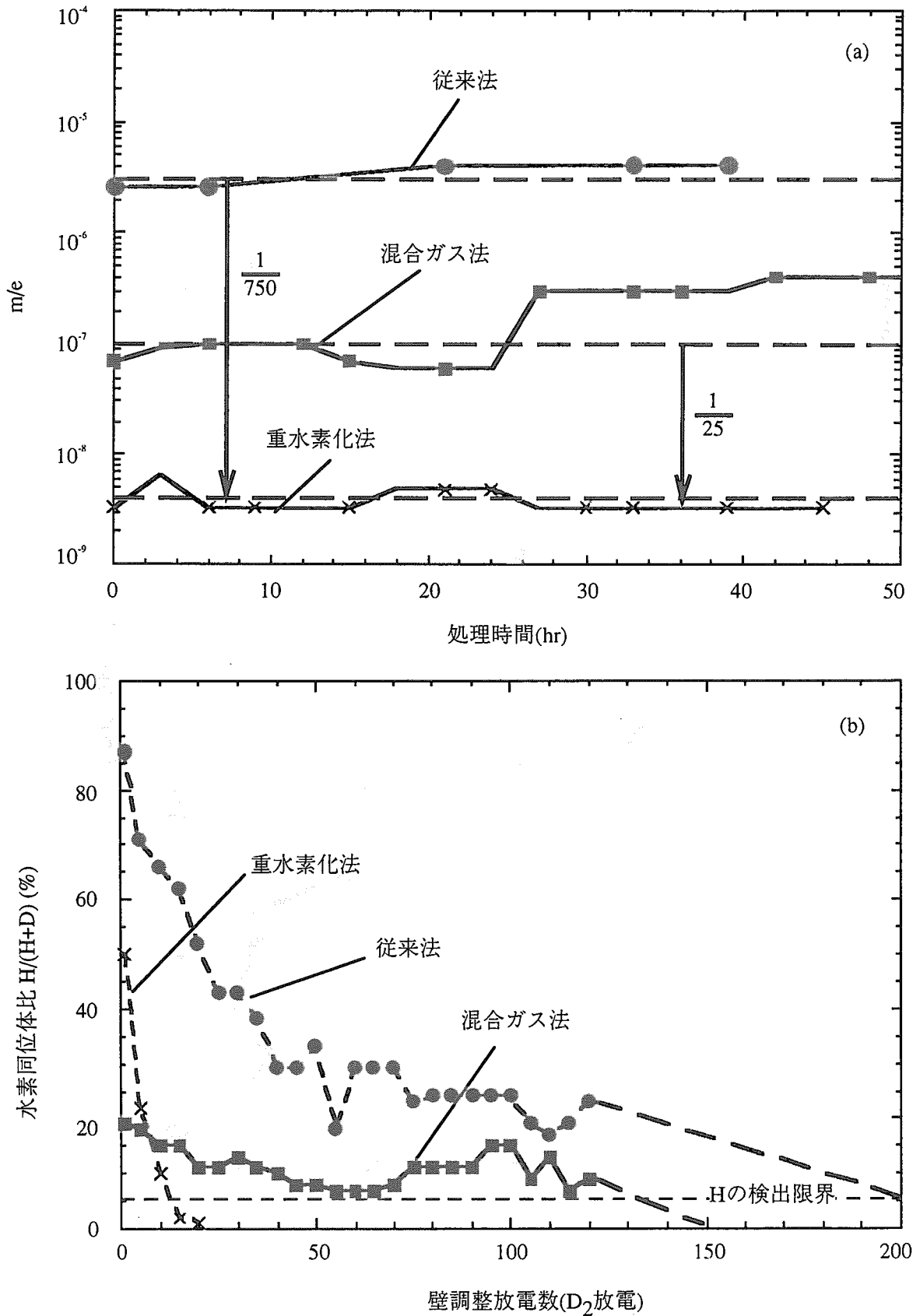


Fig.15 ポロナイゼーション時の軽水素分圧比(a)と重水素化法によるポロナイゼーション後の長期的な水素同位体比の推移(b)
 重水素化法では、真空容器内に存在する軽水素が極端に少なく、ポロナイゼーション直後の調整放電も極僅かで済む。

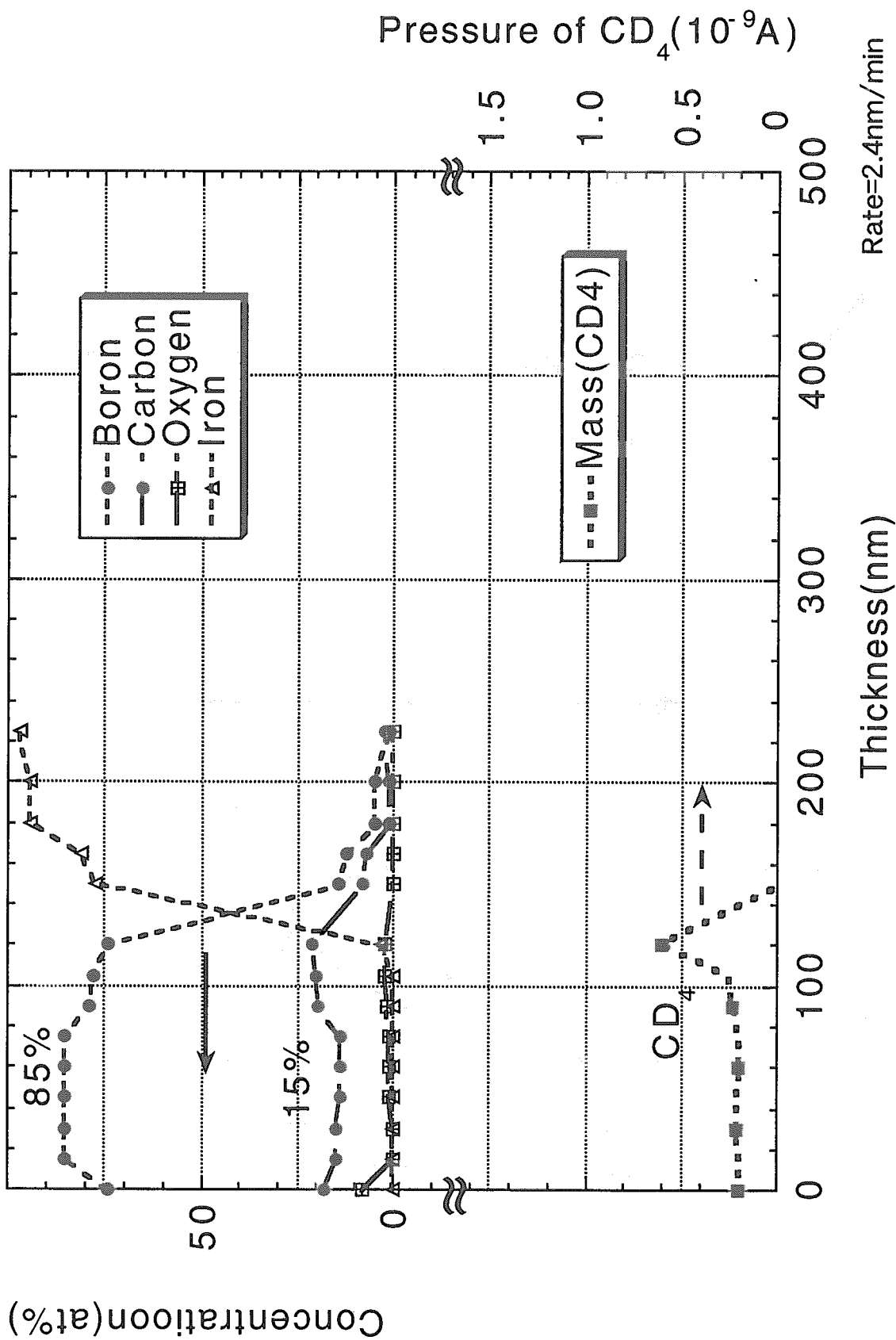


Fig.16 重水素化法によるボロナイゼーションで作製したボロン膜試料中の元素組成とメタンの挙動
 真空容器内に存在する重水素の量が極僅かとなったことで、ボロン膜中の炭素、特に界面部分の炭素が1/3となった。同様に真空容器
 内のメタンも減少している。

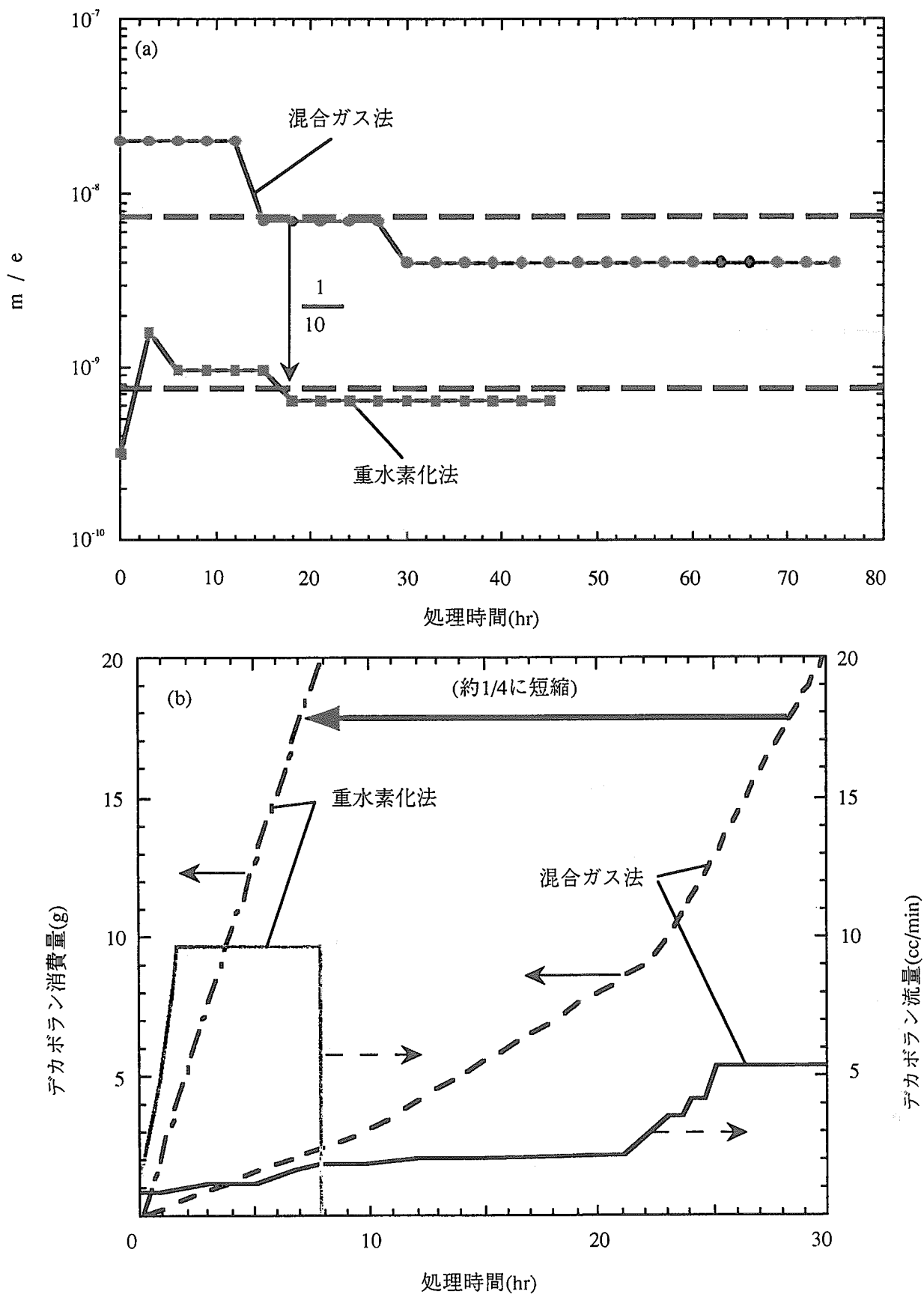


Fig.17 ボロナイゼーション時のメタン比(a)と 処理時間の短縮(b)
 重水素デカボランを使用することで、真空容器内に生成されるメタンが1/10に抑制され、DCグローの安定化に伴い、ボロナイゼーション処理時間も大幅に短縮された。

Table.2 JT-60Uのボロナイゼーションの特徴

種類 支持ガス	$B_{10}H_{14}$	$B_{10}D_{14}$
He	<ul style="list-style-type: none"> ○ボロナイゼーションの所要時間が短い ○Hが多いのでボロナイゼーション後の調整放電が多い 	<ul style="list-style-type: none"> ○CD_4が発生しないのでボロナイゼーションの所要時間が短い ○Hが無いのでボロナイゼーション後の調整放電が極僅か
He+D ₂	<ul style="list-style-type: none"> ○CD_4が発生するのでボロナイゼーションの所要時間が長い ○Hが少ないのでボロナイゼーション後の調整放電が少ない 	<p style="text-align: center;">—</p>

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 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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	μ
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	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, 放射能	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	ジーメンズ	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	ルーメン	lm	cd·sr
照度	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

(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 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

この図は、1970年代後半から1980年代前半にかけての日本の経済成長を示している。この期間には、日本のGDPは年平均約10%のペースで増加した。この成長は、主に製造業の輸出拡大と国内消費の増加によるものである。この図は、日本の経済成長の歴史を振り返る上で重要な資料である。

