



JP0150299

JAERI-Research  
2000-054



# ECH装置用CVDダイアモンド真空窓の 応力解析

2001年3月

高橋 幸司・小松崎 学\*

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、お申し越しください。なお、このほかに財團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

ECH 装置用 CVD ダイアモンド真空窓の応力解析

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

高橋 幸司・小松崎 学\*

(2000年12月22日 受理)

核融合実験炉に必要とされる電子サイクロトロン波加熱(ECH)装置の伝送系・結合系において、ECH 装置の真空隔壁として使用する化学気相成長(CVD)ダイアモンド真空窓(トーラス窓)の応力解析を行った。ABAQUS コードによる解析結果は、ダイアモンド窓の圧力試験結果と良い一致を示し、実機サイズとほぼ同等となる有効径 70mm, 厚さ 2.25mm の窓は、14.5 気圧(1.45MPa)の圧力まで耐えうることが判明した。また、真空或いは安全隔壁としての ECH 装置用 CVD ダイアモンド窓の設計パラメータを得た。

---

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

\* 株式会社ケーシーエス

Stress Analysis of CVD Diamond Window for ECH System

Koji TAKAHASHI and Manabu KOMATSUZAKI\*

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

(Received December 22, 2000 )

The stress analysis of a chemical vapor deposition (CVD) diamond window for Electron Cyclotron Heating and Current Drive (ECH/ECCD) system of fusion reactors is described. It was found that the real size diamond window ( $\phi_{aper}=70\text{mm}$ ,  $t=2.25\text{mm}$ ) withstood 14.5 atm. (1.45 MPa). The calculation results of the diamond window by ABAQUS code agree well with the results of the pressure test. The design parameters of the torus diamond window for a vacuum and a safety barrier were also obtained.

Keywords : CVD Diamond, Torus Window, ECH/ECCD, Vacuum and Safety Barrier

---

\* KCS Co.

## 目次

1. 序論 .....	1
2. 解析式による応力解析 .....	2
2.1 計算モデル .....	2
2.2 解析方法 .....	2
2.3 計算結果 .....	4
3. ABAQUS コードによる解析方法 .....	5
3.1 計算モデル .....	5
3.2 解析方法 .....	6
3.3 計算結果 .....	6
4. 考察 .....	6
5. まとめ .....	8
謝辞 .....	9
参考文献 .....	10

## Contents

<b>1. Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Stress Calculation by Analytical Method.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1 Calculation Model .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Calculation Method .....</b>	<b>2</b>
<b>2.3 Result .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Stress Calculation by ABAQUS Code.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Calculation Model .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2 Calculation Method .....</b>	<b>6</b>
<b>3.3 Result .....</b>	<b>6</b>
<b>4. Discussion .....</b>	<b>6</b>
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>8</b>
<b>Acknowledgment .....</b>	<b>9</b>
<b>References .....</b>	<b>10</b>

## 1. 序論

電子サイクロトロン加熱(ECH)装置は、プラズマ加熱・電流駆動、分布制御、プラズマ初期立ち上げなどのツールとして、国際熱核融合実験炉(ITER)等の核融合実験炉で必要とされている。ECH 装置は、発振源であるジャイロトロン、EC 波をプラズマ近くまで導く伝送系、EC 波をプラズマに入射する結合系からなる。ITER や次世代核融合炉では、周波数及び出力がそれぞれ 170GHz, 1MW 以上での連続発振が可能なジャイロトロンや伝送可能な真空窓(トーラス窓)が必要となる。そのジャイロトロン用出力窓及び伝送系・結合系の真空窓としては、低誘電損失率、高熱伝導率、高強度という性質を持つ材料が最適である。化学気相成長(CVD)ダイアモンド[1]はその全ての特性を有し、近年、大口径 CVD ダイアモンドディスクを用いた真空窓の開発に成功し[2]、ジャイロトロンや伝送系・結合系真空窓に応用可能となつた[3, 4]。開発した CVD ダイアモンド窓の写真及びジャイロトロン用ダイアモンド窓の図面を図 1, 2 に示す[3]。図 1(a)は CVD ダイアモンドディスク、(b)はディスク周辺をメタライズしてインコネルシリンドラをロウ付けしたもの、(c)は(b)の状態に冷却構造を付加したダイアモンド窓である。図 2 から分かるように、ダイアモンドディスク周辺が冷却される。冷却には水を用いる。

ITER 等の核融合実験炉では、燃料として重水素と三重水素(トリチウム)を使用する。想定される事故時においても炉本体はもとより炉に取り付く ECH 装置などもトリチウムや放射性ダストなどの漏洩がない安全設計要件が課せられる。万一、何らかの原因でトリチウムなどが漏洩する事態が起きたとしても規制以下に抑制すべく手段を有するシステムとする必要がある。1999 年の最新設計の ITER(ITER-FEAT)を例に取ると、真空容器やダイバータ、ブランケットなどを冷却する 1 次冷却水が何らかの原因で真空容器内に漏洩した場合、真空容器内圧力が 2 気圧まで上昇すると想定されている[5]。従って、真空容器と同一境界になる各機器の設計条件のひとつに 2 気圧に耐え得るという安全設計要件が課せられる。図 3 に ITER-FEAT 用 ECH 結合系の構造概略図を示す。圧力閉止板(Closure Plate)後方に真空窓、万一、真空窓が壊れた場合のことを想定し、真空窓後方にゲートバルブを設け、トリチウム等を封じる設計として

いる。ECH 装置の場合、この結合系の真空窓が真空容器と同一境界にあたり、真空窓の耐圧は 2 気圧以上という安全設計要件を満足する必要がある。今回、安全設計上の ECH 真空窓設計パラメータを得ることを目的としてダイアモンド真空窓の応力解析を行った。

第 2 章では解析式を用いた応力解析とその結果について述べる。第 3 章では、ABAQUS コードを用いた応力解析とその結果について報告する。第 4 章では ABAQUS コードによる解析結果を用いた安全設計の観点からのダイアモンド真空窓設計について議論する。第 5 章に本研究のまとめを記述する。

## 2. 解析式による応力解析

図 2 に示すように、ダイアモンド真空窓はメタライズされたディスク周辺にインコネルシリンダがロウ付けされ、そのインコネルシリンダを介して冷却構造体が取り付けられる。従って、ディスク周辺を完全固定、或いは周辺の単純固定などの比較的簡単な拘束条件を仮定し、荷重(圧力)に対しての円板の歪み等を解析的に求めることが可能である。

### 2.1 計算モデル

実機大ダイアモンド窓の圧力試験[6]に使用した窓アセンブリもダイアモンドディスク周辺にインコネルシリンダがロウ付けされている。その軸方向断面図を図 4 に示す。これに対する解析を行う際、計算モデル(拘束条件)としては周辺完全固定もしくは周辺単純支持を仮定することができる(図 5, 6 参照)。

### 2.2 解析方法(式)

図 7 に示してあるように、半径  $r$  の円板に中心軸対象圧力  $p$  が加わったとき、次の諸式が得られる。

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dw}{dr} \right) \right] = -\frac{Q_r}{D} \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} [r \frac{d}{dr} \left\{ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \frac{dw}{dr}) \right\}] = \frac{p}{D} \quad (2)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3)$$

$$\sigma = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left[ (1+\nu) \frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{(1+\nu)}{r} \frac{dw}{dr} \right] \quad (4)$$

但し、 $E$ ,  $\nu$ ,  $Qr$ ,  $h$  はそれぞれ円板の弾性係数(ヤング率), ポアソン比, 位置  $r$  における剪断力,  $h$  は円板の厚みである。これらから、歪み  $w$  及び応力  $\sigma$  を求めることができる。

### 2.2.1 周辺完全固定

半径  $a$  の円板上に等分布圧力  $p$  が作用するとき、式(1), (2)と  $r=0$  で歪み  $w$  は有限、円板のエッジでの歪みは 0 等の境界条件より

$$w = \frac{P}{64D} (a^2 - r^2)^2 \quad (5)$$

が得られる。この場合、最大歪み  $w_{max}$  は  $r=0$  で得られ、

$$w_{max} = \frac{pa^4}{64D} \quad (6)$$

となる。また、最大応力  $\sigma_{max}$  は逆に円板端で得られ、次式で表せる。

$$\sigma_{max} = \frac{3}{4} \frac{(a/h)^2}{h} p \quad (7)$$

### 2.2.2 周辺単純支持

この場合は、式(1), (2) と  $r=0$  で歪み  $w$  は有限、円板のエッジでの歪み及

び半径方向の曲げモーメントは 0 等の境界条件より、

$$w = \frac{P}{64D} (a^2 - r^2) \left( \frac{5+v}{1+v} a^2 - r^2 \right) \quad (8)$$

が得られる。この場合も、最大歪みは  $r=0$  で、一方、最大応力は円板の端部で得られ、それぞれ

$$w_{\max} = \frac{pa^4}{64D} \frac{5+v}{1+v} \quad (9)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{3}{8} (3+v) \left( \frac{a}{h} \right)^2 p \quad (10)$$

と表すことができる。

### 2.3 計算結果

ダイアモンド窓の圧力試験以前に、ダイアモンド窓の変位量を見積もるために、周辺完全固定及び周辺単純支持を仮定して、すなわち、式(5)と(6)、式(8)と(9)を用いて計算を行った。ダイアモンド窓中心の変位量及び 5 気圧時の窓変位径方向分布の計算結果をそれぞれ図 8、9 に示す。計算に必要なダイアモンドディスクの物性値は表 1 に示してある。実線が周辺完全固定、点線が周辺単純支持における変位量である。図 8、9 の○や△、□などは圧力試験で得られた実験値である[6]。図 8 の○及び△は、それぞれ非加圧側がダイアモンドディスクの成長面及び基盤面の場合のディスク中心変位量を示す。一方、図 9 の○、△、□などは、異なる径方向ラインでの変位を示している。歪みの傾向は計算結果と実験値で合っているが、変位量は周辺完全固定(実線)と周辺単純支持(点線)における計算値の間で、周辺完全固定の結果より少し歪む結果となった。また、図 10 に均等圧力に対する窓端部に加わる最大応力を示す。実線は周辺完全固定及び点線は周辺単純支持である。図 8、9 で実験値が周辺完全固定及び

周辺単純支持の計算結果の間にあることから、窓端部にかかる最大応力も図 10 の周辺完全固定と周辺単純支持の間で周辺完全固定寄りにあることが推測できる。図 10 中の一点破線は、Ref.7 から参照した厚さ 2.25mm のダイアモンドディスクの破壊(曲げ)応力を示している。周辺単純支持の場合、10 気圧まで耐え得ることが分かる。これらの結果から、図 4 に示すダイアモンド窓が 10 気圧以上の圧力に耐え得ることを示唆している。

### 3. ABAQUS コードによる解析方法

前節の解析式を用いた計算結果から、図 4 に示すダイアモンド窓は、少なくとも 10 気圧には耐え得ることが示された。しかしながら、正確な応力評価を行うためには、インコネル及びロウ付け部(アルミニウム)を計算モデルに取り入れ、適切な拘束条件と共に解析することが必要である。本節では、それらを考慮した計算モデルを作成し、ABAQUS(Ver. 5.8)コードを用いて求めたダイアモンドディスク中心の変位量や変位分布、ディスクに加わる応力の評価について述べる。

#### 3.1 計算モデル

図 11 に計算モデルを示すが、これは圧力試験[6]に使用したダイアモンド窓アセンブリ(図 4)をモデル化したものである。ダイアモンド窓中心を回転軸とする回転軸対象であり、インコネルの有効内径は 70 mm または 50mm、厚みは 1 mm、アルミロウ付部の厚み及び径方向長さは 0.4 mm、3 mm である。窓アセンブリの両端はインコネルシリンダ端部に溶接したフランジで固定されているため、インコネルシリンダの両端は拘束点となる。また、ダイアモンドディスクにインコネルシリンダをロウ付けする際にインコネルシリンダが変形しないようにモリブデンリングがインコネルシリンダに填め合わせてある。ダイアモンドディスクの径と厚み及び有効径をパラメータとして、計算モデルを 7 ケース作成した。そのモデルケースを表 2 にまとめてある。

### 3.2 解析方法

ダイアモンドディスク及びインコネルシリンダ内側、口ウ付け部内側に均等圧力が加わるという荷重条件のもと、各モデルに対してダイアモンドディスクの変位量と応力について求めた。計算で使用したダイアモンドディスクの物性値は表 1 の値を使用し、加圧力は 5~40 気圧とした。拘束点はインコネル配管の両端とした。

### 3.3 計算結果

図 12, 13 にダイアモンドディスク中心の非加圧側の変位量及び 5 気圧時の径方向の変位分布をそれぞれ点線で示してある。圧力試験で得られた実験データも図 12, 13 中に示してあるが、計算結果の方が実験データより大きくなっている。実際には窓アセンブリにおいて両端フランジ以外の拘束があるものと考えられる。図 14 には同条件での窓各部の変位の様子を示しているが、非加圧側でモリブデンリングが填め合わせてある付近のインコネルシリンダがモリブデンリングの方向に盛り上がり(6~7 $\mu\text{m}$ )、加圧側は逆にモリブデンリングから離れる方向にへこんでいる。従って、実験データを説明するには、非加圧側のモリブデンリングによる拘束が必要になることが推測できる。図 12, 13 の実線は非加圧側のモリブデンリングを拘束して計算した結果を表しているが、実験値と良く一致している。図 15 以降では、インコネルシリンダ両端の拘束に非加圧側モリブデンリングの拘束を加えて応力解析を行っている。圧力試験に使用したダイアモンド窓の許容圧力を Ref.7 のデータを用いて評価すると 14.5 気圧となり、ITER-FEAT の第 1 境界の圧力条件の 7 倍以上の圧力に耐え得る強度を持つと言える。

## 4. 考察

前節において、ダイアモンド真空窓が ITER-FEAT 等の核融合実験炉用 ECH 装置の真空及びトリチウム隔壁として十分な役割を果たすことを示した。本節では、真空及びトリチウム隔壁の観点から、ダイアモンド真空窓の機械強

度設計に必要な設計パラメータを得ることを目的とした考察を行う。

ABAQUS コードを用いて、表 2 にあるようにダイアモンドディスクの厚み及び径、有効径を計算パラメータとして 7 ケースの応力計算を行った。図 15 に一例としてモデル II の応力分布図を示す。加圧力は 10 気圧である。(a)がディスク全体、(b), (c)がそれぞれ中心付近及び周辺付近を拡大した応力分布を示す。また、図 16(a)~(c)は図 15 と同様、モデル VI の 10 気圧で加圧した時の全体と中心付近及び周辺付近を拡大した応力分布を示す。(a)を見るとダイアモンドディスクの内部より表面の方が応力が高くなっている。破壊するときは表面からクラックなどが生じ壊れていくことを示唆している。また(b), (c)から、中心では加圧側の応力が、周辺では非加圧側の応力が若干高くなることが判明した。更に、ディスク中心より周辺の方が応力が高くなっているのが分かる。これらの結果から、ディスク周辺に生じる応力、特に非加圧側に注目してダイアモンド窓の機械的な設計を行う必要がある。

図 17 は、横軸に加圧力を取って有効径 50mm の窓ディスクの最大応力を厚さをパラメータにして図示化したものである。図中の×印は Ref7 から得たそれぞれのディスクの厚さに対する破壊応力を示している。この×印を結んだラインより下側でディスクを使用すれば破壊することができないことを示している。同様の方法で得られた有効 70mm の結果と図 17 の結果を合わせて、ダイアモンドディスクの厚みに対する有効径 70mm 及び 50mm の破壊限界に達する加圧力をプロットしたものを図 18 に示す。有効径 50mm のモデルを例に取ると、厚みが 1.85mm のダイアモンドディスクは 26 気圧まで耐え得ることが分かる。

パワー 1MW レベルでの電子サイクロトロン波の伝送において実績のある伝送系(導波管)の内径は 30~60mm 程度である。ITER 等の核融合炉用 ECH 装置の伝送系は 1 ライン当たり 1MW, CW(連続伝送)である。そのような高パワー、定常伝送が可能な伝送系の内径は伝送路を直角に曲げるマイターベンドの耐熱負荷で決まり、FDR-ITER では内径を約 60mm 程度としている[8]。以上のことから、核融合炉用 ECH 装置に必要な真空窓の有効径は 50~70mm と考えられる。図 18 に FDR-ITER の圧力に対する安全設計要件、5 気圧のラインを示してあるが、FDR-ITER を想定してもダイアモンドディスクの厚み 1mm

程度で真空窓の安全設計が十分可能である。また、真空窓に課せられる機械強度(圧力条件)が決まればダイアモンドディスクの有効径及び厚みは、図 18 の斜線部から選定できる。

核融合炉用 ECH 装置の真空窓の設計には中性子照射効果も考慮する必要がある。現在行っている ITER-FEAT の水平ポートランチャーの設計では、トーラス窓は圧力閉止板の直後に設置されており、ダイアモンドの熱伝導率に影響を及ぼさない最大中性子フルエンス、 $10^{20}\text{n}/\text{m}^2$  以下に抑える必要がある[9]。また、Ref.9 にはダイアモンドディスクサンプルの機械的強度に対しての中性子照射効果を調べた初期結果が報告されており、それによると、 $10^{21}\text{n}/\text{m}^2$  の照射後の強度はほぼ変わらず、むしろ若干上がっている。従って、フルエンスが  $10^{20}\sim10^{21}\text{n}/\text{m}^2$  までの中性子照射効果を考慮したダイアモンド真空窓設計においても図 18 が適用可能である。

## 5. まとめ

核融合炉用 ECH 装置で使用するダイアモンド真空窓に圧力が加わったときの応力解析を解析式と ABAQUS コードを用いて行った。解析式を用いた計算では、有効径 70mm、厚み 2.25mm のダイアモンド窓に 10 気圧まで加圧した実験結果に対して、その変位については定性的な一致を示した。また、その応力に対しては 10 気圧以上に耐え得るという結果を得た。一方、ABAQUS コードによる解析結果では、変位については圧力試験結果と良く一致し、応力についてはダイアモンドディスク端部(有効径)で最大となり、且つ、非加圧側の応力が高くなることが分かった。圧力試験に使用した有効径 70mm、厚み 2.25mm のダイアモンド窓端部(有効径)での最大応力は、10 気圧時で 293MPa と評価され、最大 14.5 気圧まで耐えうるというより正確な評価結果を得た。また、ダイアモンド真空窓の機械強度設計に必要な厚さ及び有効径の設計パラメータ領域を得た。本解析結果より、ダイアモンド真空窓は ITER-FEAT 等の核融合実験炉用 ECH 装置の第 1 隔壁として十分対応可能であることを示した。

### 謝辞

本解析研究を遂行するにあたり、解析モデル作成に必要な CAD 図面の作成協力を戴いた長谷川智子氏に感謝致します。また、細部にわたって有意義な議論及び教示を戴きました藤井常幸 RF 装置試験室長及び今井剛 RF 加熱研究室長、坂本慶司主任研究員、RF 加熱研究室員に謝意を表します。最後に、本研究を行うにあたり、ご支援を戴きました関昌弘部長及び松田慎三郎所長に感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] R. Sussmann, J. Brandon, S. Coe, C. Pickles, C. Sweeney, A. Wasenczuk, C. Wort and C. Dodge, Industrial Diamond Review 239, De Beers Industrial Diamond Division, UK
- [2] O. Braz, A. Kasugai, K. Sakamoto, K. Takahashi, M. Tsuneoka, T. Imai and M. Thumm, Int. J. Infrared Millim. Waves 18, (1997) 1945
- [3] A. Kasugai, K. Sakamoto, K. Takahashi, M. Tsuneoka, T. Kariya, T. Imai, O. Braz, M. Thumm, J. Brandon, R. Sussmann, A. Beale and D. Ballington, Rev. Sci. Instrum. 69, (1998) 2160
- [4] K. Sakamoto, A. Kasugai, M. Tsuneoka, K. Takahashi, T. Imai, T. Kariya and Y. Mitsunaka, Rev. Sci. Instrum. 70, (1999) 208
- [5] ITER-FEAT Outline Design Report (1999)
- [6] K. Takahashi, K. Sakamoto, A. Kasugai, and T. Imai, Rev. Sci. Instrum. 71, (2000) 4139
- [7] C. Pickles, J. Brandon, S. Coe and R. Sussmann, Proc. of 9<sup>th</sup> Cimtec-World Forum on New Materials 435 (1999)
- [8] Technical Basis for The ITER Final Design Report (FDR) (1997)
- [9] Manfred Thumm and FZK ECH Window Team, Report of R&D Task Meeting of ITER EC System, Mar. 23-24 (2000)

表1 ダイアモンド窓アセンブリを構成する材料の物性値

Parameters	Units	Diamond	Inconel	Aluminum
Youngs Module	GPa	1100	230	70
Poisson Ratio		0.1	0.35	0.3

表2 応力計算モデル

Parameters	Unit	Models						
		I	II	III	IV	V	VI	VII
Thickness	mm	2.25	1.85	1.48	1.11	1.85	1.48	1.11
Radius	mm	100	100	100	100	60	60	60
Aperture	mm	70	70	70	70	50	50	50

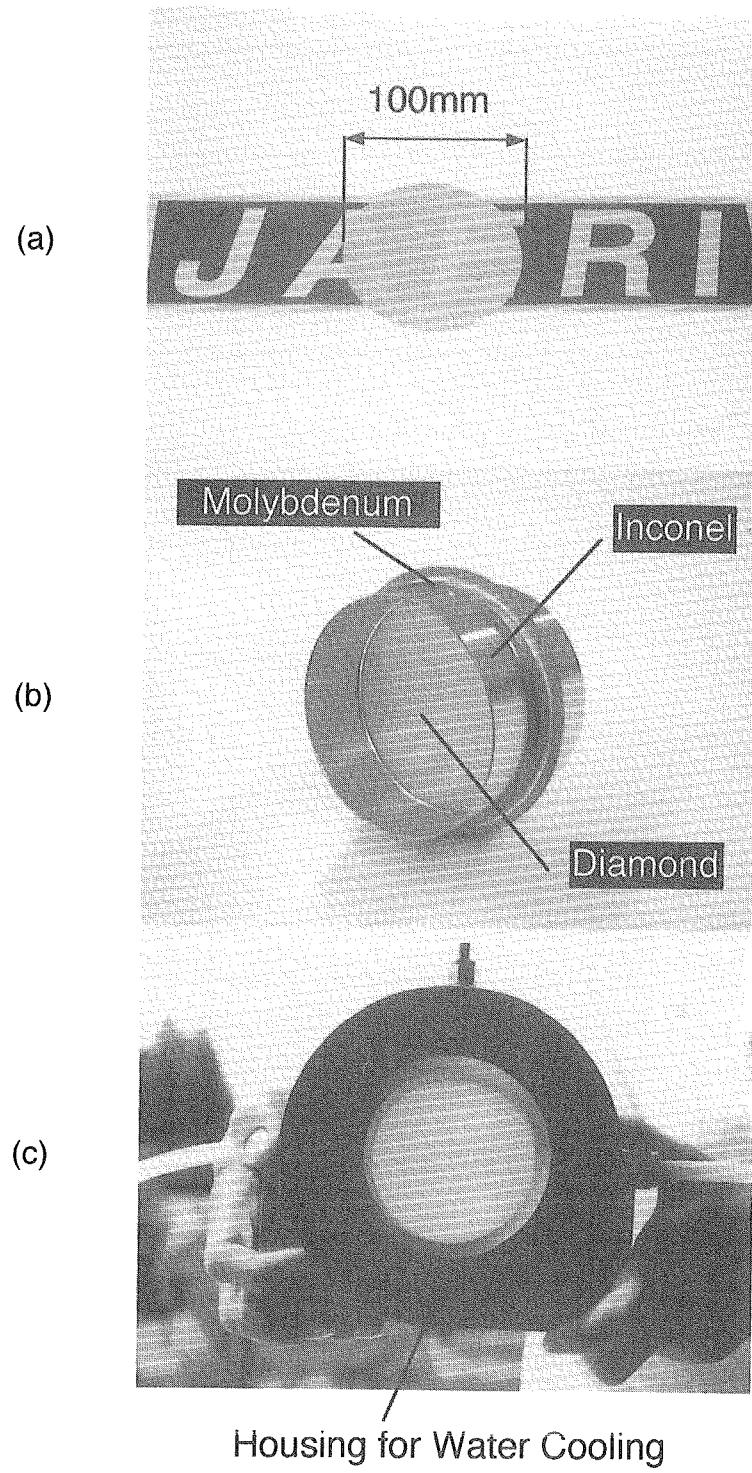


図1 ジャイロトロン用CVDダイアモンド窓  
(a) CVDダイアモンドディスク, (b) インコネルシリンドラロウ付け後,  
(c) ダイヤモンド窓アセンブリ.

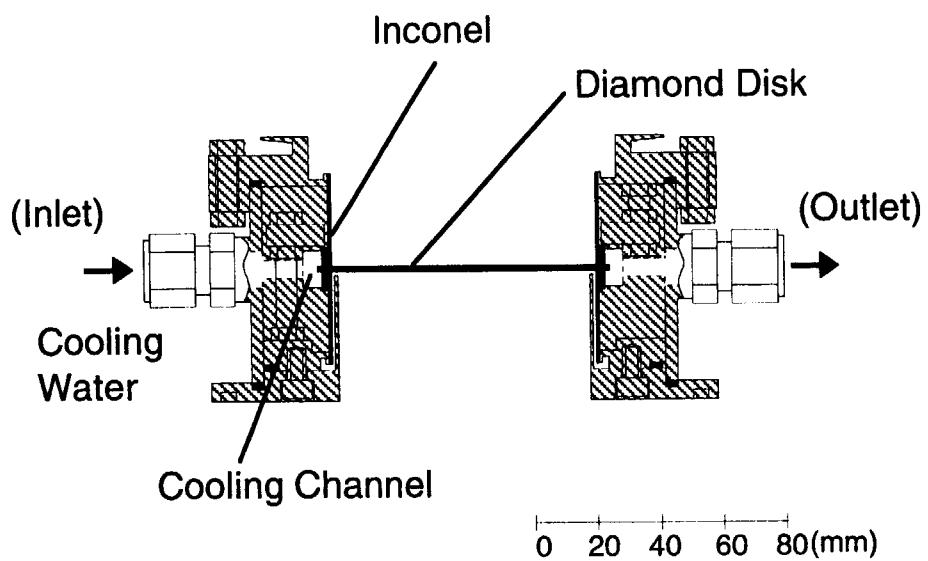


図2 ダイヤモンド窓アセンブリ断面図  
ダイヤモンドディスク周辺を水により冷却する。

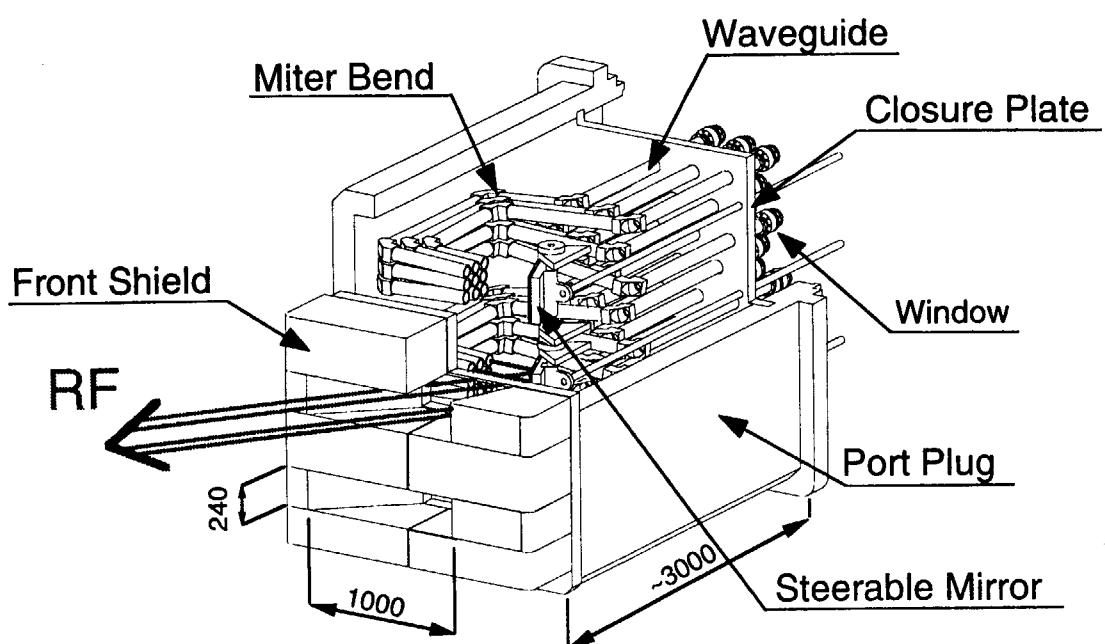


図3 ITER-FEAT ECHランチャー構造概略図

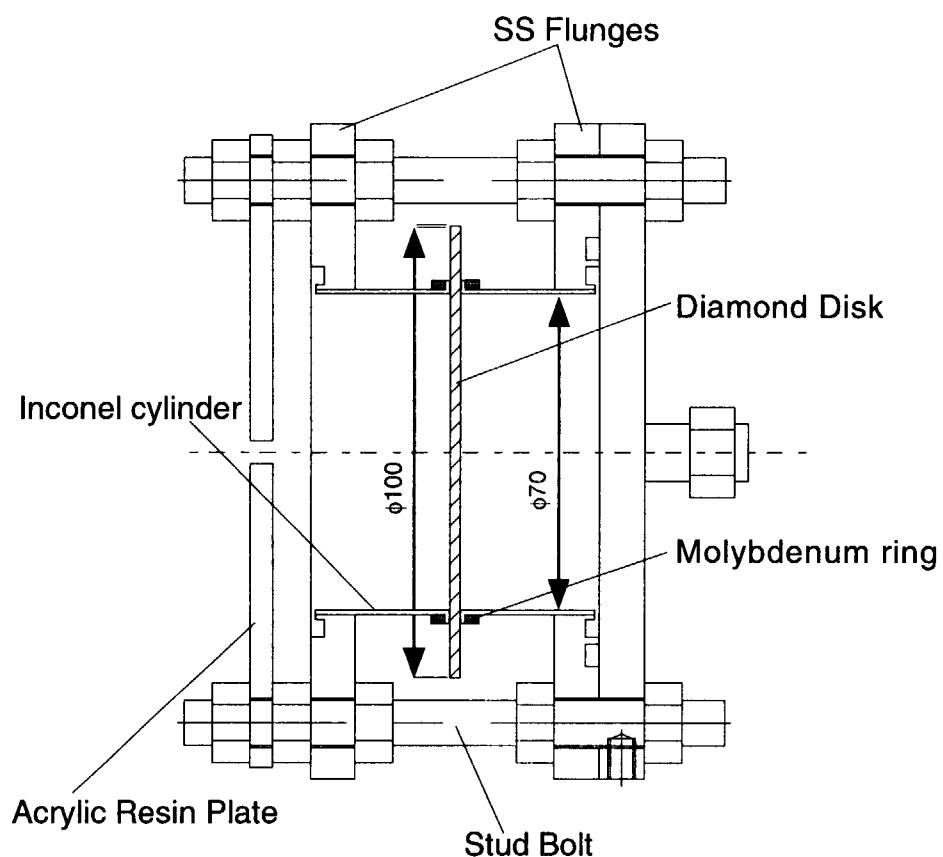


図4 ダイヤモンド窓アセンブリの軸方向断面図  
ダイヤモンド厚さ2.25mm, 直径100mm, 有効径70mm

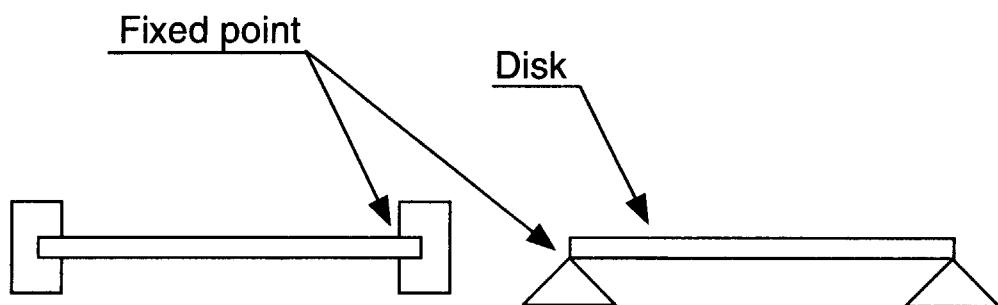


図5 周辺完全固定

図6 周辺単純支持

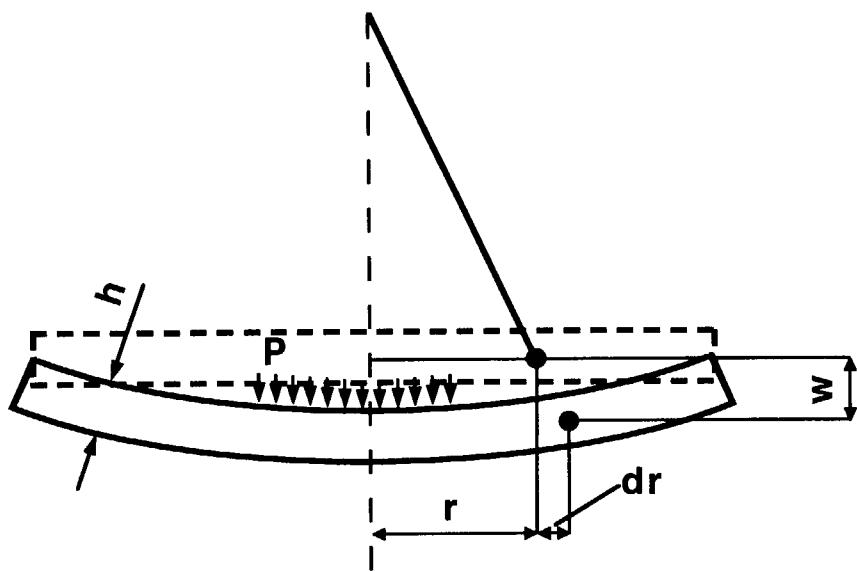


図7 垂直荷重時のディスクの変位定義

$h$  : ディスク厚,  $w$  : 厚さ方向変位,  $r$  : 径方向変位. 実線及び点線はディスクの変形後と変形前の状態を表す.

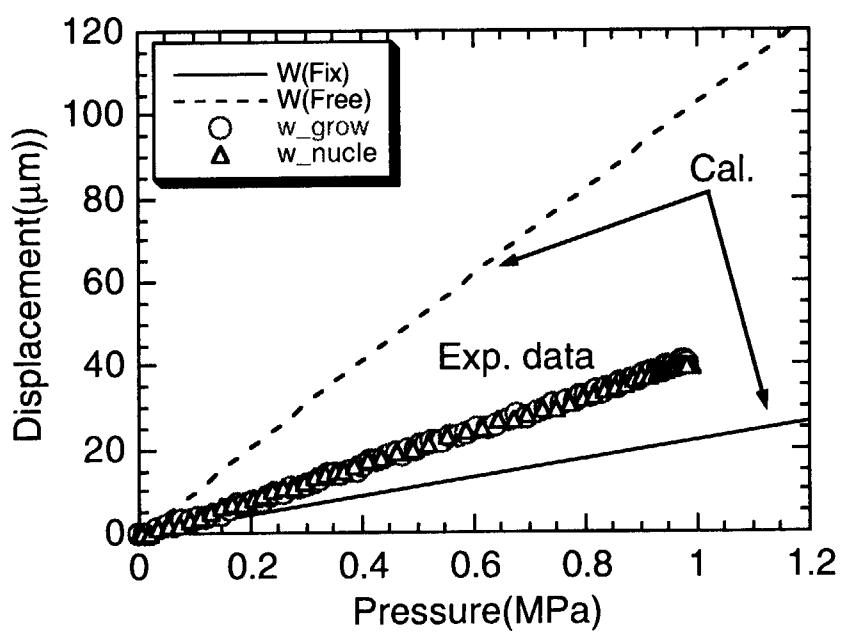


図8 圧力荷重に対するダイアモンド窓中心の変位量

実線と点線は周辺完全固定と周辺単純支持を仮定したときの計算式(6), (9)から求めたダイアモンド窓中心の変位を, ○と△は非加圧側のダイアモンド窓中心の変位(実験値)を表す.

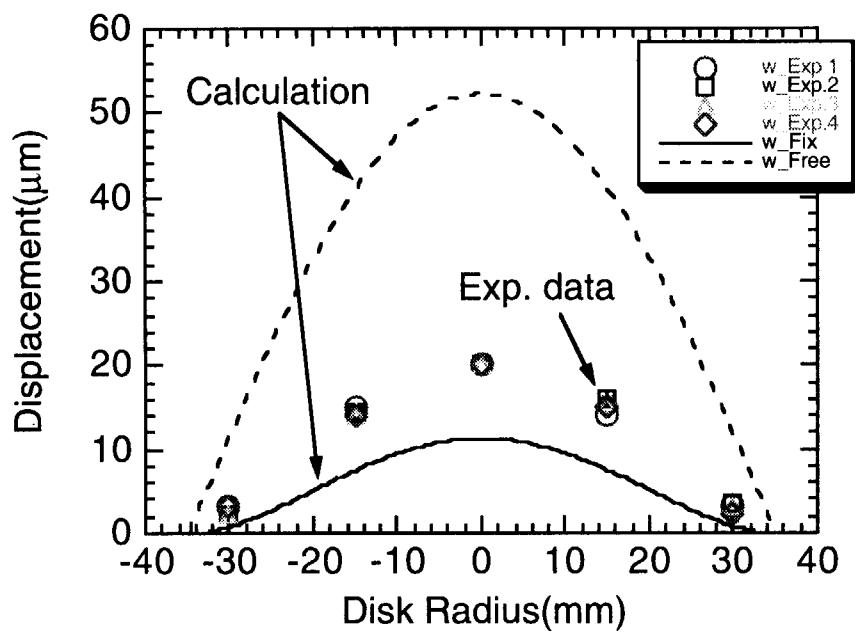


図9 圧力荷重に対するダイアモンド窓の変位分布(5気圧時)

実線と点線は周辺完全固定と周辺単純支持を仮定したときの計算式(5), (8)から求めたダイアモンドの変位分布を、○と△などは非加圧側のダイアモンド窓の変位分布(実験値)を表す。

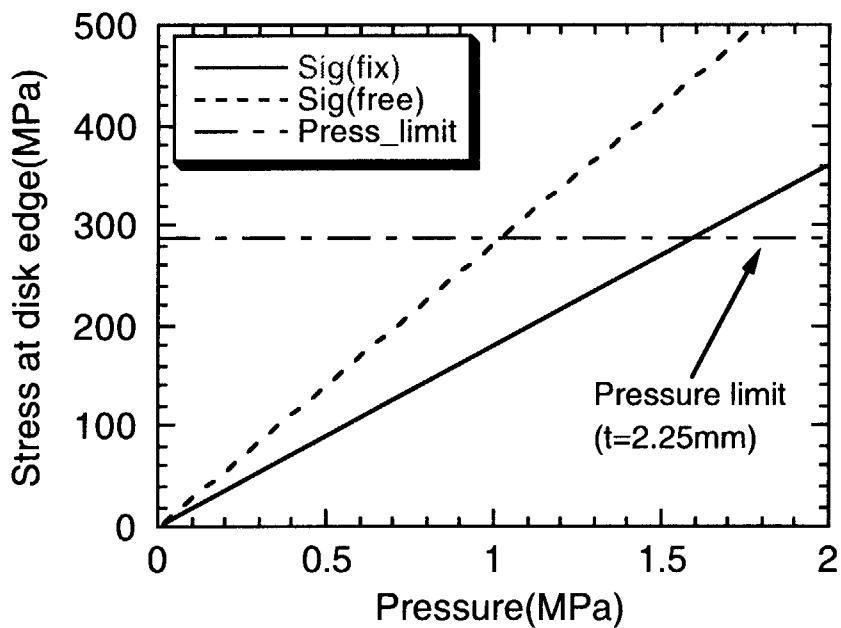


図10 厚さ2.25mmのダイアモンドディスク端に生ずる最大応力

実線、点線及び一点波線は、それぞれ周辺完全固定と周辺単純支持を仮定したときの計算式(7), (10)から求めたダイアモンドディスク端の加圧力に対する最大応力、Ref7から得た厚さ2.25mmのダイアモンドディスクの破壊応力(加圧限界値)を表す。

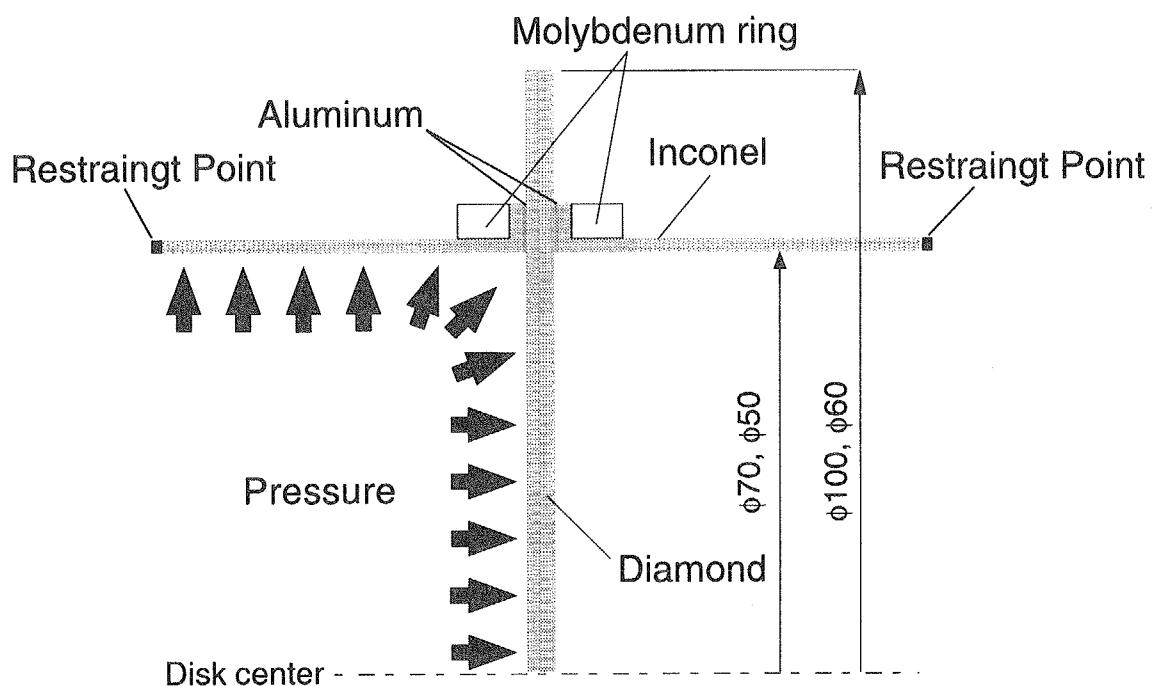


図11 ABAQUSコードにおける計算モデル

窓アセンブリの上方向半分を示す。インコネルパイプ肉厚 $l$  (1mm), アルミロウ付け(0.4mm). ダイヤモンドディスク径・有効径・厚さはパラメータとし, 拘束点は太線で示してある。

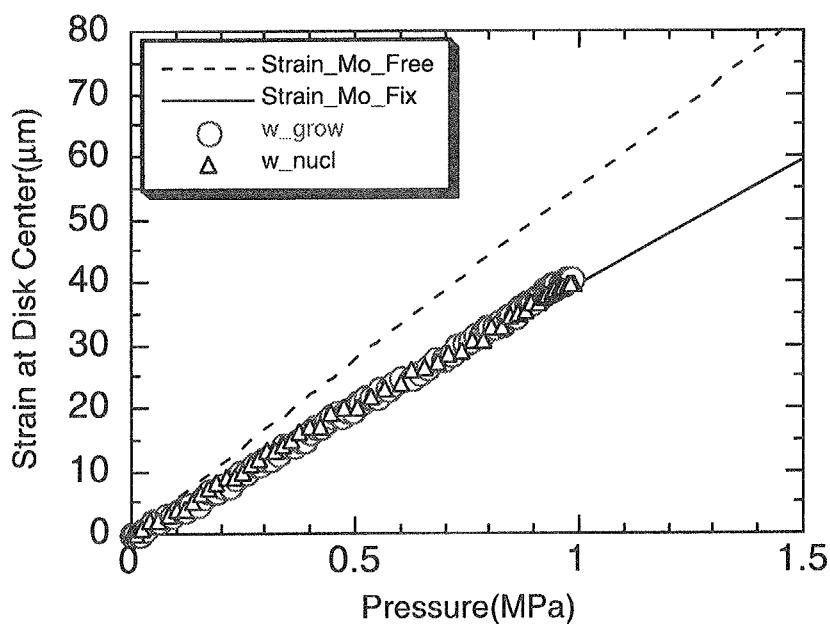


図12 ABAQUSコードによる計算結果(ダイヤモンド窓中心の変位量)

実線及び点線は、それぞれモリブデンリングを拘束した場合としない場合の窓中心の変位量を、○及び△は窓中心の非加圧側の変位量(実験値)を表す。

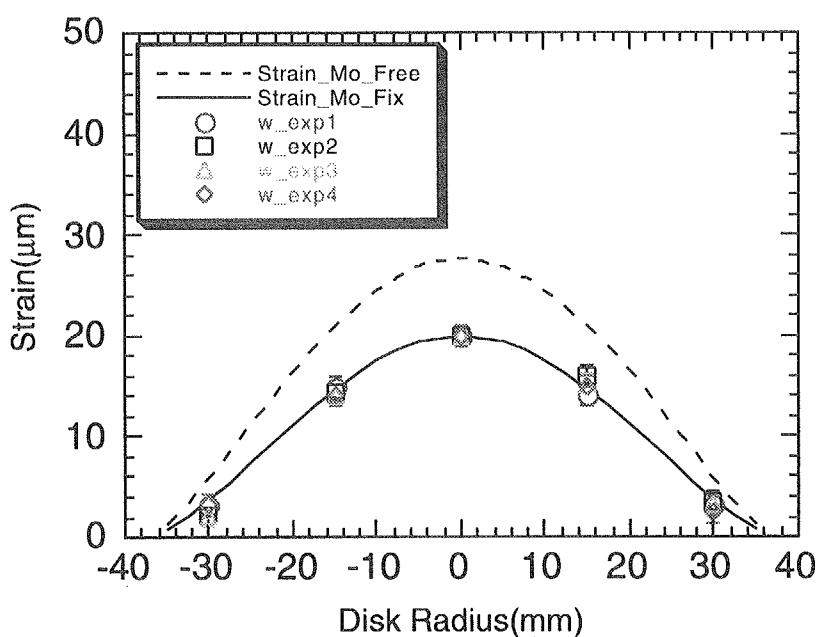


図13 ABAQUSコードによる計算結果(5気圧時ダイアモンド変位径方向分布)  
実線及び点線は、それぞれモリブデンリングを拘束した場合としない場合の  
窓の径方向変位分布を、○、△などは非加圧側の変位分布(実験値)を表す。

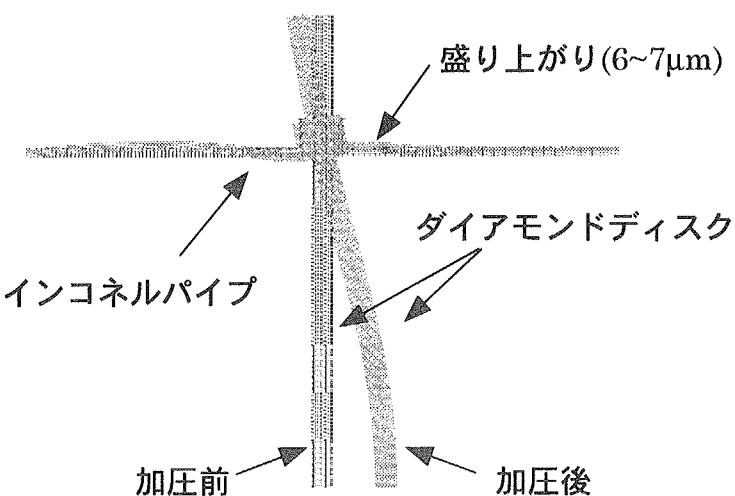


図14 モリブデンリング非拘束時のダイアモンド窓アセンブリの変位(5気圧)  
Model Iのアセンブリの変位の様子を表す。モリブデンリング付近のインコネル  
パイプ(非加圧側)が盛り上がっている(6~7μm)。

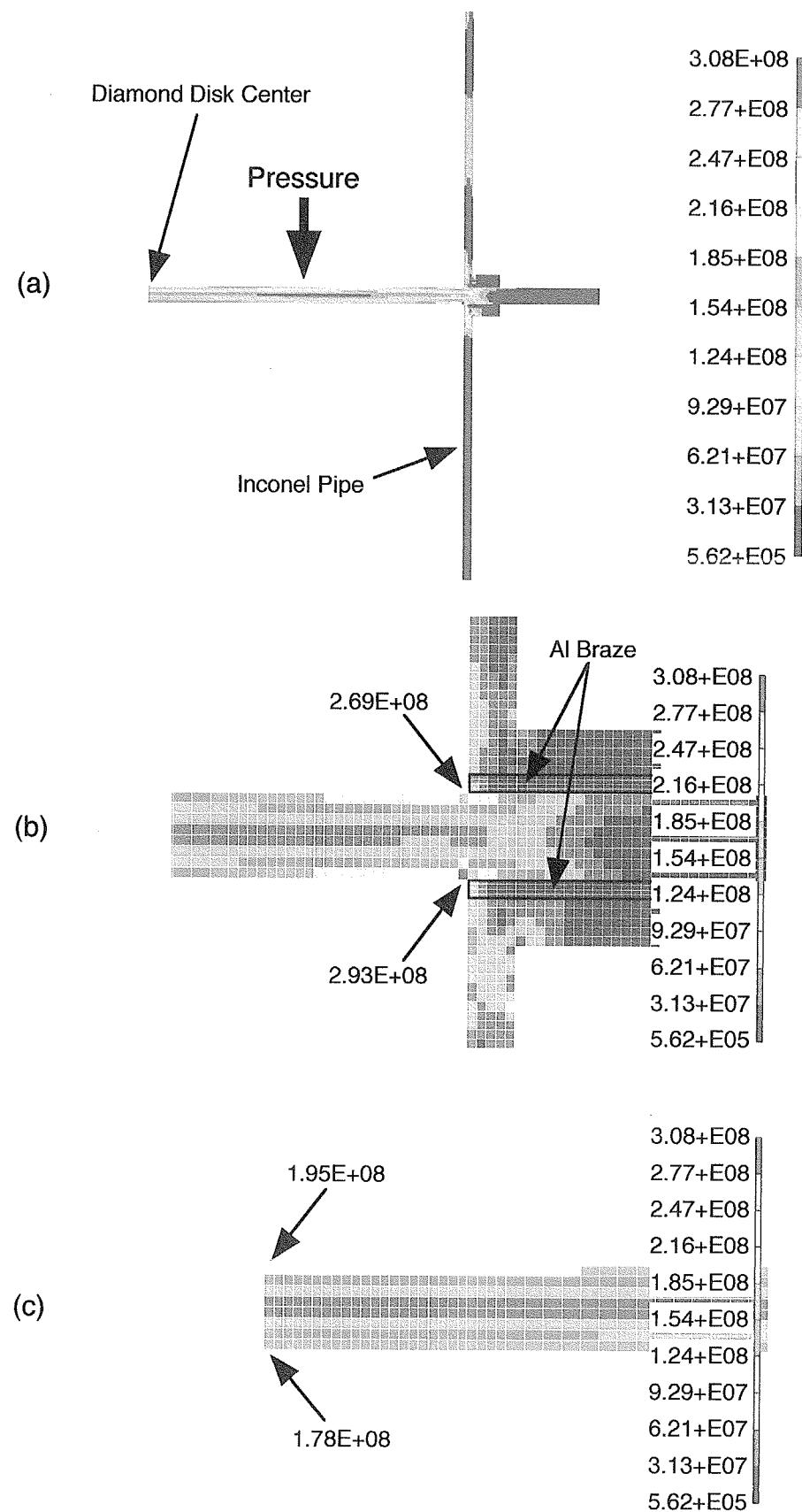


図15 Model IIの応力分布(10気圧)

(a)モデル全体, (b)ダイアモンドディスク端部周辺, (c)ダイアモンドディスク中心周辺.  
ディスク端で最大応力は293MPaとなる.

This is a blank page.

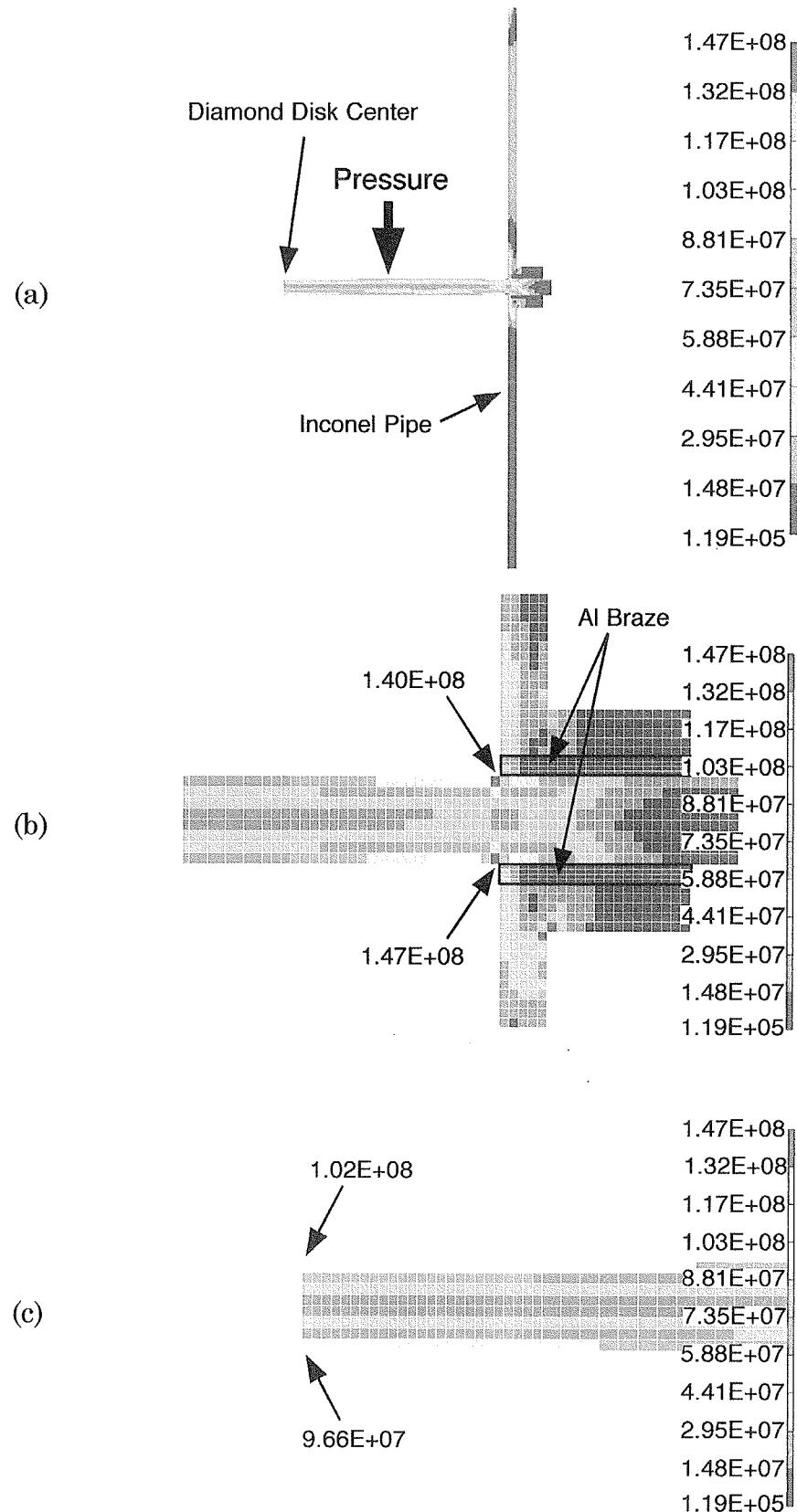


図16 Model VIの応力分布(10気圧)  
(a)アセンブリ全体, (b)ダイアモンドディスク端部周辺, (c)ダイアモンドディスク  
中心周辺. 端部において最大応力は147MPaとなる.

This is a blank page.

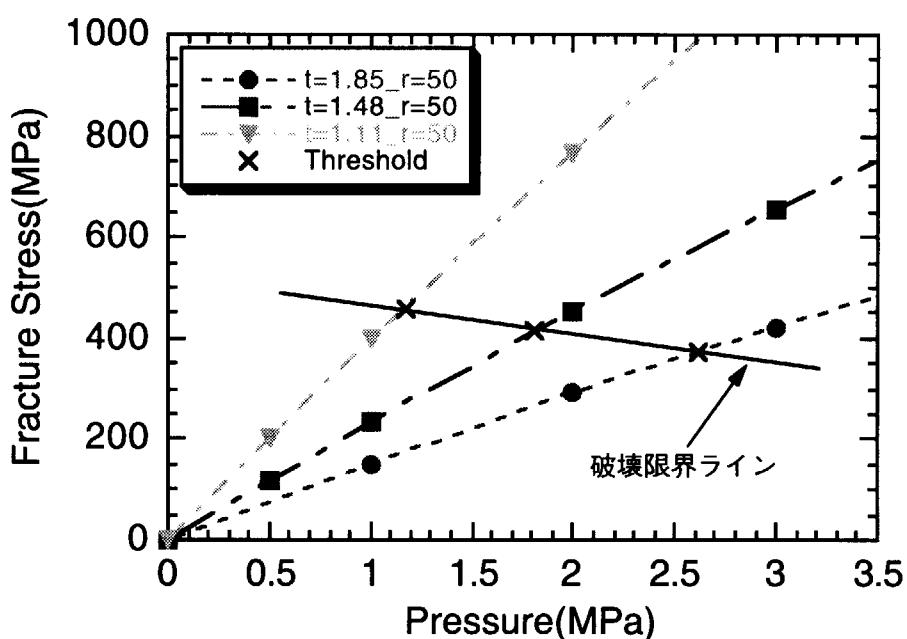


図17 ダイヤモンド窓端部(有効径)に破壊応力を発生させる圧力

●, ■, ▼はModel V, VI, VIIの加圧力に対する最大応力を表す。×はそれぞれのモデル(ディスク厚)に対するRef7から得た破壊応力を表す。

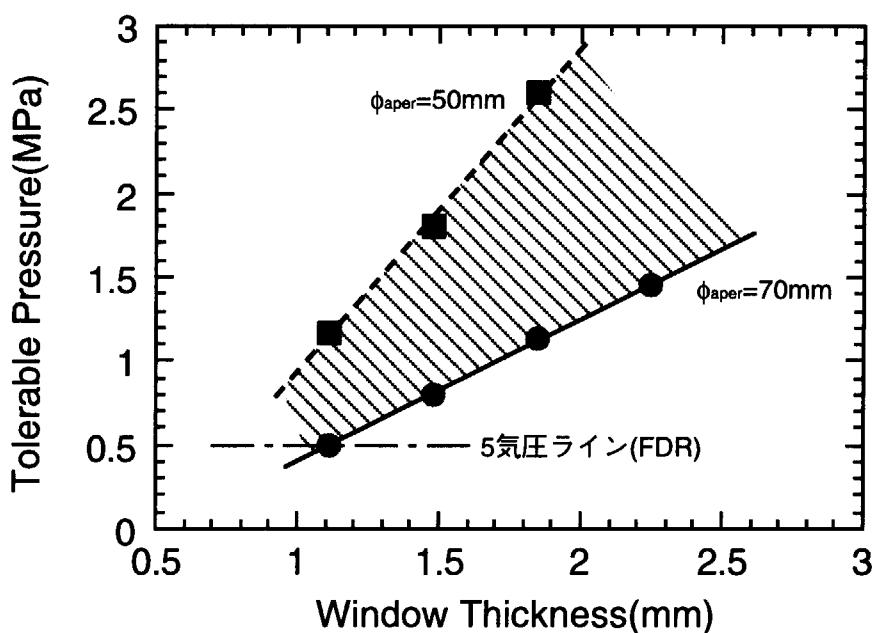


図18 ダイヤモンド窓の厚みに対する許容加圧力

●(実線)はModel I~IVの, ■(点線)はModel V~VIIの限界加圧力を表す。

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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	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
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10<sup>-19</sup>J

1 u=1.66054×10<sup>-27</sup>kg

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ヘクタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	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、1eVおよび1u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のカテゴリに入れている。

## 換 算 表

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

粘度 1Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1m<sup>2</sup>/s=10<sup>4</sup>S(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

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

エネルギー	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
1	0.101972	2.77778×10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813×10 <sup>-1</sup>	0.737562	6.24150×10 <sup>18</sup>	
9.80665	1	2.72407×10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487×10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082×10 <sup>19</sup>	
3.6×10 <sup>6</sup>	3.67098×10 <sup>5</sup>	1	8.59999×10 <sup>-5</sup>	3412.13	2.65522×10 <sup>6</sup>	2.24694×10 <sup>25</sup>	
4.48605	0.426858	1.16279×10 <sup>-6</sup>	1	3.96759×10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272×10 <sup>19</sup>	仕事率 1PS(仮馬力)
1055.06	107.586	2.93072×10 <sup>-1</sup>	252.042	1	778.172	6.58515×10 <sup>21</sup>	- 75 kgf·m/s
1.35582	0.138255	3.76616×10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506×10 <sup>-3</sup>	1	8.46233×10 <sup>18</sup>	= 735.499W
1.60218×10 <sup>19</sup>	1.63377×10 <sup>20</sup>	4.45050×10 <sup>-20</sup>	3.82743×10 <sup>-20</sup>	1.51857×10 <sup>-22</sup>	1.18171×10 <sup>-19</sup>	1	

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

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R
1	2.70270×10 <sup>-11</sup>	1	1	100	1	3876	1	100
3.7×10 <sup>10</sup>	1	0.01	1	2.58×10 <sup>-1</sup>	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

