



講座 今日からはじめる磁場閉じ込めプラズマ実験

2. プラズマ容器を真空にひくよ！

2. Let's Start to Pump Down a Vacuum Vessel!

岡本 敦

OKAMOTO Atsushi

東北大学大学院工学研究科

(原稿受付：2014年5月7日)

プラズマ実験のための真空容器について説明する。プラズマ生成用のガスを入れない状態で $10^{-6} - 10^{-4}$ Pa 程度の圧力環境を構築し、プラズマ生成用のガスを注入することで $10^{-3} - 10^1$ Pa 程度の圧力を維持する真空容器・真空排気システムを想定している。また、特徴的な寸法が 1 m 程度の真空容器を念頭に置いている。真空容器と真空ポンプおよびそれらを接続する排気マニフォールドの設計や選定に必要となる、排気速度やコンダクタンスの概念、排気流量やガス注入量の概念について説明する。ポートやフランジの構造についても説明する。

Keywords:

vacuum, conductance, pumping speed, turbo molecular pump, oil rotary pump, valve, flange

2.1 はじめに

磁場閉じ込め核融合を目的とした高温プラズマの維持では放射損失を抑えるため高真空を維持しなければならない。そもそも、プラズマ実験を始めるためには、実験室でプラズマを生成しなければならない。どのような生成・加熱法であれ、電子衝突電離でプラズマを生成するためには、電子が電離エネルギー以上にまで加速されるべく平均自由行程が十分に長くなければならない。そのため、一般的なプラズマ実験では真空環境を作り出すことが実験の第一歩と言える。本章ではプラズマ実験に必要な真空環境の作り方について解説する。

圧力が低い状態は高真空、さらに低い状態は超高真空と呼ばれる。精密なビーム実験とは異なり、プラズマ実験では超高真空環境を要求しない。さらに放射損失を抑えて高温プラズマを維持するのでなければ、実験に必要な真空環境は比較的容易に整備できる。プラズマ生成前のガスを入れない状態で $10^{-6} - 10^{-4}$ Pa ($10^{-8} - 10^{-6}$ Torr) 程度の圧力に到達するのが目安となろう。真空工学の観点からみたプラズマ実験の特色は、前述の圧力まで容器を減圧した後にガスを注入し $10^{-3} - 10^1$ Pa ($10^{-5} - 10^{-1}$ Torr) 程度の圧力を維持した環境でプラズマを生成することにある。容器の寸法や構成機器の性能等を検討する上で、この特色に留意しなければならない。このような真空環境で特徴的な大きさが 1 m のオーダーの真空容器を有する真空排気システムを念頭に解説する。次節で真空排気システムの構成について概論を述べた後、2.3節以降で各々の構成機器について詳細を解説する。

本講座でカバーしきれない内容について参考文献をあげておく。プラズマ実験に限定されない真空技術については

文献[1]など真空工学の教科書を参照されたい。また、ハンドブックとして文献[2]が市販されるようになった。各真空機器メーカーの総合カタログも規格や仕様を調べるために重宝する。最低でも一社の総合カタログは読破することをお勧めする。プラズマ・核融合学会誌では、講座「プラズマ実験入門」においてプラズマ実験に必要な真空工学について簡潔に纏められている[3]。また、講座「プラズマ装置の真空工学・排気技術」では様々な装置における実例が各章ごとにまとめられ、参考になる[4]。

2.2 真空排気システムの構成

プラズマ実験用の真空容器は、概ね真空容器本体、排気マニフォールド、真空排気装置(真空ポンプ)、ガス注入機器、バルブ、圧力測定機器(真空計)などから構成される。

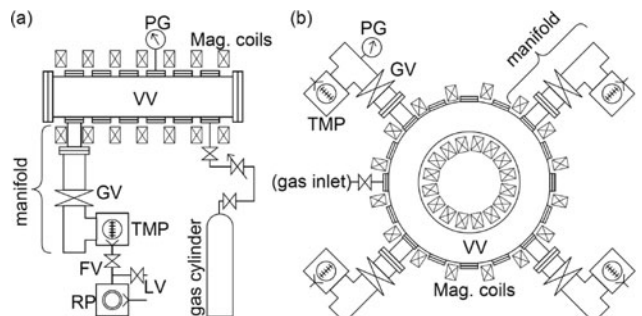


図1 真空容器と真空排気システムの概念図。(a)典型的な直線装置の例、(b)典型的なトーラス装置の例。VV：真空容器、GV：ゲートバルブ、TMP：ターボ分子ポンプ、FV：フォアラインバルブ、LV：リークバルブ、RP：油回転ポンプ、PG：圧力ゲージ。(b)ではガス注入弁より上流とターボ分子ポンプより下流を省略して示す。

これらの構成機器の典型的な接続を図1に示す。真空容器本体は実験を行う上で最も重要かつ最も特殊な構成要素である。特殊というのは、実験の内容や目的に応じて適切な容器の形状や大きさが異なるため、一つとして同じ容器は存在しないということである。本章では真空環境を維持するための機器も含めた真空容器・真空排気システムの設計および機器選定を説明する。一方、真空容器の詳細な形状や大きさはプラズマ生成・加熱手法の相違、計測手法の相違などに依るところも多い。プラズマ生成・加熱法や計測法に依存する各論は割愛する。

排気マニフォールドは真空容器本体と真空ポンプを接続する構成要素である。一般的に外部磁場を印加可能な実験装置では、磁場コイル間隔より真空ポンプの寸法が大きいことや、強磁場環境下では真空ポンプが運転できないことなどから、真空容器本体と真空ポンプを離して設置する。そのため、両者を接続する配管である排気マニフォールドが必要となる。無磁場の実験装置ではターボ分子ポンプを直接真空容器に設置することもある。またクライオポンプ等のように真空容器に直接設置して使用するポンプもある。これらの場合には排気マニフォールドは不要である。

ガス注入機器は実験に必要な動作ガスを真空容器内で所定の圧力に維持する構成要素である。動作ガスの圧力はガス注入量と排気速度のバランスで決まる。残留している不純物ガスの密度を下げるために真空ポンプは最大の能力で使用し、供給する動作ガスの量を制御ノブとして圧力を制御するのが一般的である。

真空容器および排気システムにはいくつかのバルブが設けられている。多くのバルブは全閉と全開のいずれかの状態で運用する。これらはガス供給や排気の機器を仕切る位置に設置され、複数系統の切り換え・連係動作を担う。流量を調節するために開度を連続に変えられるバルブも一部に用いることがある。

圧力測定機器は、実験前の真空容器の状況（残留ガス、漏れ）を監視するため、実験条件の一つである動作ガス圧力を測定するため、適切で安全なメンテナンス作業のために用いる。測定原理により測定可能な圧力範囲が異なるため、これらの目的に応じて数種類の真空計を組み合わせで設置する。バルブで区切られた領域ごとに設置するだけでなく、後述するコンダクタンスを考慮して、一つの真空容器内でも複数の位置に真空計を設置することがある。

2.3 真空容器の概念設計

プラズマ実験を開始するにあたって、まずは真空容器を用意しなければならない。前述の通り実験の内容や目的によって真空容器の形状や大きさは異なってくる。したがって、真空容器の設計は実験者のひとつの腕の見せ所でもある。本節ではプラズマ生成と真空工学の観点から真空容器の概念設計について説明する。

まず真空容器の本体について、検討する。材料は1気圧程度の応力に耐えること、緻密でガス透過性に乏しいことなど、真空容器として適するものを選択する。特に制約がないのであれば、加工の容易さやコストなどを考慮する

表1 代表的な材料の気体放出速度[2]。気体放出速度の単位は $\text{Pa m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ である。明記なき場合には室温測定、大気圧からの排気10時間後の値。

材料	気体放出速度	備考
ステンレス鋼	4×10^{-8}	SUS304[5]
銅（無酸素銅）	$2 - 4 \times 10^{-8}$	[6]
アルミ合金	$0.9 - 3 \times 10^{-7}$	A5052[7]
アルミ合金	$0.9 - 2 \times 10^{-6}$	A6063[8]
真鍮	4×10^{-5}	[9]
ガラス	0.8×10^{-6}	[10]
石英ガラス	5×10^{-9}	[2]
バイトン	3×10^{-4}	[11]
樹脂類	$1 - 10 \times 10^{-4}$	5時間後[2]

と材料の選択肢はステンレス鋼（SUS）かガラスが一般的である。代表的な材料の気体放出速度を表1に示す。ゴムや樹脂はガス放出が多く真空容器内で多用すべきではない。金属であっても真鍮のように表面からのガス放出が多い材料もあり注意が必要である。また同じ材料でも表面処理でガス放出が異なってくる。清浄な表面からのガス放出はSUSで $10^{-8} - 10^{-7} \text{Pa m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ 程度[2]となる。これは表面積 1m^2 （直径 0.3m 、長さ 1m の円筒や 1 辺 0.4m の立方体に相当）の真空容器を排気速度 $0.3 \text{m}^3/\text{s}$ (300l/s) で排気すると、到達圧力は 10^{-7}Pa 程度であることを意味する。したがって実験の目的や内容から真空容器の寸法と実験前到達圧力が定まると、必要な真空ポンプの排気速度を見積もることができる。ただし、ポンプの機種選定前には後述する排気経路のコンダクタンスと排気流量の検討が必要である。

コンダクタンスは管状容器内の気体の流れやすさを表す量である。図2のように圧力がそれぞれ p_1 、 p_2 ($> p_1$) の大きな2つの容器を管状容器で接続した時に、管状容器を流れる気体の流量 Q と管状容器のコンダクタンス C には

$$Q = C(p_2 - p_1), \quad (1)$$

の関係がある[1]。これは到達圧力を $p_1 = 0$ にできる理想的な真空ポンプを用いても実効排気速度がコンダクタンスで制約され、真空容器本体の圧力は p_2 までしか下がらないことを意味する。したがって排気マニフォールドのコンダクタンスが小さくならないように気をつけなければならない。真空ポンプの排気速度 S はコンダクタンスと同一の次元をもつこと、直列要素 C_1 、 C_2 の合成コンダクタンスは $1/C = 1/C_1 + 1/C_2$ で与えられることから、排気マニフォールドのコンダクタンスはポンプの排気速度程度が目安である。ターボ分子ポンプに接続される排気マニフォールド内部では気体分子の運動は分子流領域となっているとみなせ

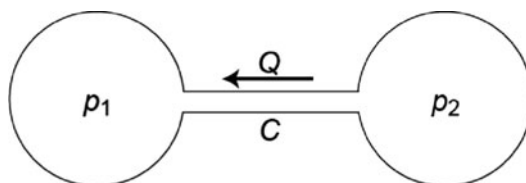


図2 コンダクタンス C と流量 Q の関係を示す概念図。

る。半径 a で長さ L の直管の分子流領域におけるコンダクタンスは以下の式で与えられる [1]。

$$C = \frac{2\pi a^3 \langle v \rangle}{3L} \quad (2)$$

ここで $\langle v \rangle = \int_0^\infty v f(v) dv$ は速度の絶対値の平均である。速度に比例するため同じ温度では分子量が小さい気体ほどコンダクタンスが大きい。例えば直径 0.1 m 長さ 1 m の場合、室温の水素分子に対しては $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (300 l/s) 程度となる。まずはすべて直管とみなして、内径と長さの異なる直管の直列接続として概算することを勧める。排気マニフォールドは太く、短くすべきであることが実感できるはずである。詳細には文献 [2] に様々な形状に対するコンダクタンスの表式が記されているので参考にすることができる。

同様に、真空容器の一端から動作ガスを供給し他端から排気する場合には、真空容器自体のコンダクタンスにより動作ガス圧力に勾配が生じることに留意しなければならない。両端に真空ポンプを有する直線装置 [12] の圧力分布

を例として示す。図 3 (a) に示す形状の真空容器において圧力を測定するとともに、真空容器を図 3 (b) のような圧力 p_n の小部屋と小部屋をつなぐコンダクタンス C_n の配管の集合とみなして圧力分布を計算した。計算は分子流を仮定している。圧力分布の実測値と計算結果を図 3 (c) に比較する。両者はよく一致するとともに、細長い真空容器内で軸方向に圧力分布が形成されていることがわかる。この実験装置は直径が細い領域が石英管で構成され外側にアンテナを巻いてヘリコン波プラズマを生成する。生成部のガス圧力を比較的高圧に維持しつつ、それ以外の領域で中性粒子の影響を抑制する、という機能がコンダクタンスの制御で実現できている例でもある。この実験装置では、オリフィスを設置することでプラズマ生成部のガス圧力に大きな影響を与えることなく下流のガス圧力を独立に制御する試みも行われた [13]。

排気流量 [1] (排気量 [2] と同いう) は単位時間に系から排出できる分子数に相当し、真空ポンプの性能において排気速度とは異なる指標である。それぞれの次元を SI 単位系における単位で表現すると、排気速度 $[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$ に対し排気流量は $[\text{Pa m}^3\text{s}^{-1}]$ となる。プラズマ実験のための真空の特徴は、(大気圧と比べると桁違いに低圧力であるもの) 実験前到達圧力より数桁高い圧力を維持して実験を行うことにある。したがって実験中の主たる排気ガスはプラズマ生成に用いた動作ガスであり、圧力を一定に維持するためには注入した動作ガスと等量を排気しなければならない。これは僅かな残留ガスを排気して超高真空を維持するビームラインを用いた粒子ビーム実験などとは異なった特徴である。排気流量を確保するように真空ポンプの機種選定をすると、排気速度はマニフォールドのコンダクタンスで制限されるために見かけ上オーバースペックとなることもある。

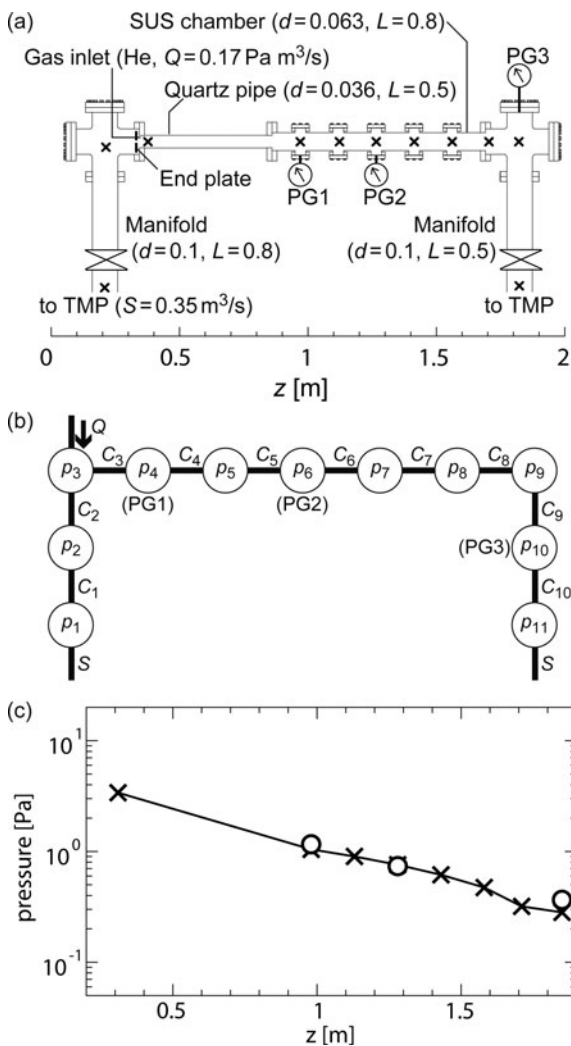


図 3 直線装置 DT-ALPHA におけるガス圧力分布。(a) 装置概念図。内径 d と長さ L の単位は m で示す。× は圧力 p_n を計算した位置を、 PG_n は圧力ゲージで実測した位置を表す。(b) 計算に用いた真空容器の構成。(c) 装置内ガス圧力の軸方向分布の実測 (○) と計算 (×) の比較。

2.4 真空ポンプの選定

真空ポンプの種類と適用圧力範囲を図 4 に示す。様々な種類のポンプが存在するが、冒頭に記したように本章の扱う真空は、「プラズマ生成前のガスを入れない状態で $10^{-6} - 10^{-4} \text{ Pa}$ 程度」、 「ガスを注入し $10^{-3} - 10^1 \text{ Pa}$ 程度」であるため、詳細についてはターボ分子ポンプとその補助ポンプとして用いられるロータリーポンプを中心に説明する。

高真空領域の真空ポンプの中ではターボ分子ポンプが取り扱いや総合的な性能の面で優れている。ターボ分子ポン

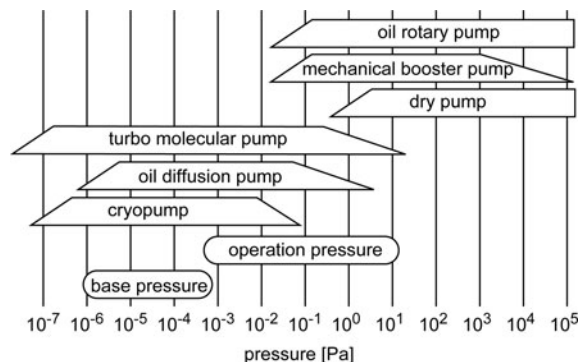


図 4 真空ポンプの種類と適用圧力範囲。

プは高速で回転する翼と固定された翼の組み合わせで分子に排気口方向の運動量を与えることで排気する。回転数は20000–90000 rpm程度である。気体分子同士が互いに衝突しない分子流領域での動作が原則である。ポンプの吸気口では十分に低圧力で分子流領域であっても後段に進むにつれて圧縮され圧力が上昇する。ターボ分子ポンプの排気口圧力（背圧）は後述のようにロータリーポンプの排気速度が低下する領域にある可能性がある。その場合、結果的に十分な排気流量を得られないこともある。解決策としてターボ分子ポンプとロータリーポンプの間にメカニカルブースターポンプを設置することもある。また排気流量を確保するために後段の構造を改良した製品も存在する。これは実効的に（旧来の）ターボ分子ポンプとメカニカルブースターポンプを組み合わせた製品ととらえることもできる。近年市販されている吸気口径100 mm程度のターボ分子ポンプの仕様を表2に示す。排気速度0.3 m³/s (300 l/s, 市販品の仕様表ではl/s単位が慣用されている)程度の製品が100万円程度の価格帯で販売されている。プラズマ実験の用途では吸気圧力の下限（到達圧力）よりも吸気圧力の上限と最大流量に着目したほうがよい。また従来は取り付け方向が指定される製品も多く、排気マニフォールドを曲げて方向を合わせてきたが、近年では取り付け方向が任意の製品が増え、最短のマニフォールドで設置できるようになった。

油回転ポンプ（ロータリーポンプ）は大気圧から排気可能な真空ポンプであるため、真空容器の粗排気やターボ分子ポンプなどの補助ポンプとして、広く用いられている。排気速度0.006 m³/s (300 l/min, 20 m³/h, 市販品の仕様表ではl/minまたはm³/h単位で表記されるものも多い)程度の製品が30万円程度の価格帯で販売されている。表2によるとターボ分子ポンプの背圧は100 Pa程度以下でなければならない。一方で、ロータリーポンプの到達圧力は0.1 Pa程度であるため、超高真空を維持する目的の排気システムではロータリーポンプの性能はそれほど重要視されない。ところがプラズマ実験では大量の動作ガスを排気する必要があり、ロータリーポンプの選定に注意を要する。ロータリーポンプの排気速度は大気圧に近い領域ではほぼ一定であるが、到達圧力に近い領域では圧力が下がるにつれて低下する（図5）。ターボ分子ポンプの補助ポンプとして用いると、この排気速度が低下した領域での動作を求められる。

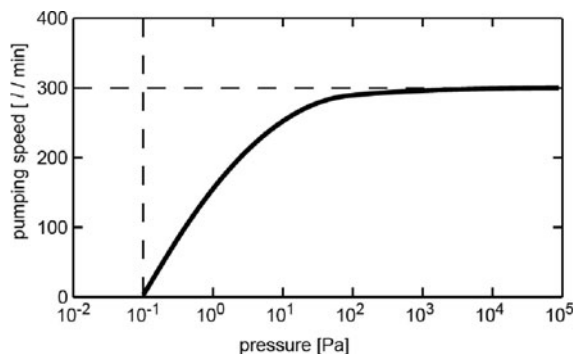


図5 ロータリーポンプの排気速度と圧力。排気速度300 l/min、到達圧力0.1 Pa相当の関係を概念的に示す。

例えば図5に示すような特性の公称排気速度 $S = 300$ l/min程度、到達圧力0.1 Pa程度のロータリーポンプについて考えてみよう。まず大気圧からの排気に必要な時間を見積もってみる。大気圧下の排気流量は $Q = pS = 600$ Pa m³/s程度であり体積 $V = 0.07$ m³（直径0.3 m長さ1 mの円筒や1辺0.4 mの立方体に相当）の容器を $p = 100$ Pa程度の圧力まで排気するのに要する時間は $t = 80$ s程度となる。この圧力領域では排気速度は圧力に依らないため、以下の簡単な微分方程式の解として得られる。

$$V(dp/dt) = -pS. \quad (3)$$

この先、圧力減少とともに排気速度も低下するが、ターボ分子ポンプが動作可能な1 Pa程度までも実用上問題ない時間で到達可能である。ターボ分子ポンプが起動してその補助ポンプとして使用しても、プラズマ生成のガスを注入する前の状態では特に問題は生じない。真空容器のガス放出 $Q = 10^{-7}$ Pa m³/sは排気流量の限界に比べると非常に小さな値であるためである。

一方で、背圧100 Pa程度のターボ分子ポンプの補助ポンプとして用いた場合、排気速度は大気圧の場合とそれほど変わらないものの、排気流量は3桁低下して0.6 Pa m³/s (=360 sccm)となる。sccmは1分間あたりの1気圧換算した容積（standard cubic centimeters per minute）を表す単位である。実験時のガス注入量は0.01–1 Pa m³/sの程度が一般的であり、条件によってはガス注入量が排気流量を超えてしまう可能性もあるため注意が必要となる。このような観点からロータリーポンプは排気速度に余裕があるものを選定したい。

ロータリーポンプの使用上の注意点として、油で真空容

表2 ターボ分子ポンプの仕様。寸法と取り付け姿勢以外は窒素(N₂)に対する値を示す。

型番	吸気口径 (mm)	排気速度 (m ³ /s)	吸気圧力範囲 (Pa)	最大流量 (Pa m ³ /s)	排気口圧力 (Pa)	取り付け姿勢
TURBOVAC361	100	0.35	1 × 10 ⁻⁸ – 5	0.3	≤ 50	任意
MAG W300	100	0.3	10 ⁻⁸ – 2	1	≤ 800	
HiPace400	100	0.36	5 × 10 ⁻⁸ – 10	0.65	≤ 1100	
ATH500M	100	0.3	1 × 10 ⁻⁶ – 100	5	≤ 170	任意
TG350F	100	0.33	1 × 10 ⁻⁶ –	0.9	≤ 260	任意
PT-300	100	0.3	10 ⁻⁸ – 0.13		≤ 13	
FT-480W	114	0.35	10 ⁻⁷ – 76	1.6	≤ 440	
TMP-303	100	0.32	10 ⁻⁸ –	200	≤ 400	任意

器を汚染しないことに留意しなければならない。リークバルブとフォアラインバルブを図1(a)のように設置し、運転停止時にはターボ分子ポンプとロータリーポンプの間を閉じ、ロータリーポンプの吸い込み口は大気圧に戻しておく。これにより油が逆流するトラブルを防ぐことができる。良好な真空環境を得るためには、さらに運転中に油の分子がターボ分子ポンプや真空容器へ付着することを防止すべきである。ロータリーポンプの到達圧力は油の蒸気圧と近いので、ロータリーポンプの単独排気を長時間続けると油分子が容器内に充満する。動作可能な圧力ではターボ分子ポンプを積極的に運転し、ロータリーポンプ吸気口圧力を高めるとともに油分子の真空容器への流入を防ぐべきである。ロータリーポンプの代替として、潤滑以外には油を用いないドライポンプも検討の価値がある。到達圧力1 Pa程度であり、価格は同じ排気速度のロータリーポンプの2-3倍程度である。

2.5 ガス注入機器の選定

一般的なガス注入法として、ニードルバルブとマスフローコントローラーが挙げられる。ニードルバルブは、コンダクタンスが小さく、かつ、コンダクタンスを微調整できる機構を有するバルブである。真空容器内の圧力が $p_1 \leq 1$ Pa程度なのに対しバルブ入口の圧力は $p_2 = 10^5$ Pa程度であるため、ニードルバルブのコンダクタンスを C とすると、式(1)において $p_1 \cong 0$ とみなされる状態にある。したがってコンダクタンスを微調整することで、ガス流量 Q を制御することができる。副尺つきマイクロメーターヘッドを手動で調整する製品が市販されており、簡便かつある程度の実用性を有する。原理上、ガス流量の再現性はマイクロメーターヘッドの調整精度だけでなくバルブ入口圧力にも依存することに留意しなければならない。

マスフローコントローラーは、電気的に制御可能なコンダクタンス調整機構とガス流量計を有し、かつ、流量計からフィードバックすることで一定流量を維持できる機器である。したがって、入口圧力がある程度の範囲で変動しても、真空容器へ供給するガス流量を一定に保つことができる。コンダクタンス調整のアクチュエータにはピエゾ素子・ソレノイド・熱膨張素子などが用いられる。微量流量(最大流量1 sccmなど)の制御にはピエゾ素子が用いられる。ソレノイドを利用した本体価格10万円程度から入手できる製品もある。流量はsccm単位で表示している製品も多い。100 sccm = 0.17 Pa m³/sである。マスフローコントローラーを用いる場合、実験で必要とする動作圧力の範囲と真空排気システムの排気速度を基に、注入ガス流量の範囲を定める。最大流量 $Q = 100$ sccmのマスフローコントローラーと、排気マニフォールドも考慮した実効排気速度 $S' = 150$ l/sのターボ分子ポンプ(と十分な排気速度の補助ポンプ)の組み合わせで最大1 Pa程度の動作圧力が達成できる。マスフローコントローラーはダイナミックレンジが2桁程度のため、より広い圧力領域で実験を行いたい場合には同一ガスに対して最大流量の異なる複数のマスフローコントローラーを用意する必要がある。真空容器からのガ

ス放出の影響が無視できる状況では、供給ガスの流量を増やすのではなく、排気流量を制限して高圧力側へ実験領域を拡張することもある。その場合には、排気マニフォールドの途中にコンダクタンスを調整できるバルブを挿入しておく。バタフライバルブが一般的であるが、全開と全閉との中間の状態を維持できるゲートバルブを用意してもよい。

パルス的にガス注入する機器も存在する。バルブ入口の圧力(プレナム圧)が一定の場合、バルブが開いている状態の時間により注入される気体分子数が定まる。ガスバフと称して大型磁場閉じ込め装置のガス供給に用いられることがある。小型装置では放電持続時間の短い運転が行われることもあり、注入したガスが真空容器内で一様に分布するように留意して実験する必要がある。例えば大半径 $R = 0.48$ m、放電持続時間10 msの東北大学ヘリアック装置[14]では、放電開始前に(1)全ターボ分子ポンプ吸入口のゲートバルブ閉鎖、(2)パルスのなガス注入、(3)暫く待つ、の手順で封じ切った真空容器内に一様にガスが充満する状態を維持し、プラズマ生成を行った。放電終了後は(4)ゲートバルブを開放し、排気しながら次の放電開始に備えた。手順(2)のパルス幅を調整することで再現性のあるガス圧力制御を実現した。

2.6 ポートの構造

前節まで周辺の真空機器について説明を行った。ここで再び真空容器本体に着目し、詳細設計、組み立て、および、実験の効率化の観点から、ポートの構造について考える。ほとんどのプラズマ生成手法では、真空容器にポートを設けて、ポートを通じてプラズマ生成用の機器を設置する必要がある。例外はガラス製チャンバーと高周波電力によるプラズマ生成の組み合わせのみだろう。またプラズマ計測のためにも(ガラス製チャンバーと分光計測の組み合わせを除いて)ポートが必要となる。様々なポートの構造について図6に示す。ポートの仕様は、図6(a)に示される開口部大きさ A 、フランジまでの距離 B 、開口部形状 C 、フランジ規格 F 、フランジ法線ベクトル N 、でほぼ決まる。

当該ポートの使用目的や取り付け機器が明確であれば、開口部大きさはあまり悩むことなく決められる。流通しているほとんどの真空フランジの規格は形状が円形のため開口部の形状も円が一般的である。しかし特殊なフランジを用いることを前提にすれば、レーストラック形状(図6(b))、長方形(図6(c))、平行四辺形等の開口部も選択肢としてあり得る。なるべく大きなポートを確保したい一方で磁場コイルの陰に隠れるのを避けるために、これらの特殊な形状のフランジが用いられる。

フランジまでの距離には2通りの考え方がある。一つは図6(d)のように距離をなるべく短くして真空容器表面にフランジが設置される構造である。フランジ面からプラズマまでの距離が短く、計測の立体角を広くとることができる。また磁場コイル内部で真空容器が自由に移動できるため装置組み立ての順序の自由度が増す利点もある。磁場コイル内径と真空容器外径が近接する場合、真空容器表面にフランジを設置してもフランジ締結のボルトの頭が磁場コ

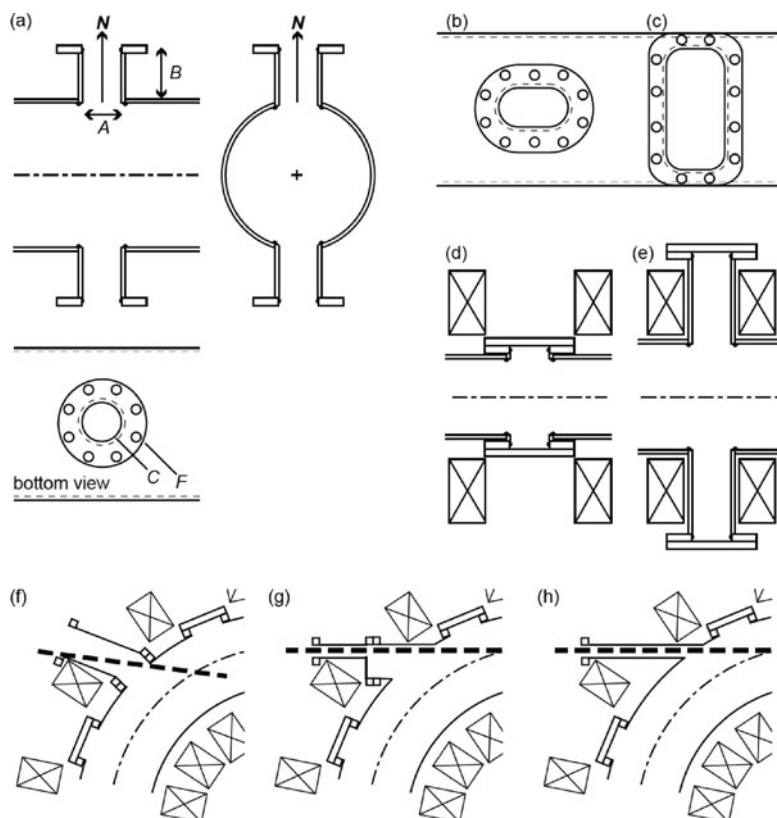


図6 (a)円筒型真空容器の側面に配置されたポートの概念図。A, B, C, F, Nはポートの構造を特徴づける寸法、形状等。詳細は本文にて。(b)レーストラック型ポートの例。(c)長方形ポートの例。(d)短いポートと磁場コイルの関係。(e)長いポートと磁場コイルの関係。(f)接続ポートが確保できない例。(g), (h)接続ポートの例。

イルに干渉する可能性があり注意が必要である。また、磁場コイルの間隔が狭い場合には組み立ては可能でもその後のポート開閉作業が困難な場合もある。

もう一つは図6(e)のように距離を長く枝管のように伸ばした先にフランジを設置する構造である。この場合、磁場コイルの外側でポートの開閉作業を行えるだけの距離をとる。磁場コイル内径を最大限に利用した大口径の真空容器が設置可能で、また、コイル間隔を狭くして磁場強度を上げることができる。これらの特徴は磁場コイルのコストパフォーマンスの面で魅力的である。しかし、装置の組み立て順序や大気開放の作業手順と関連付けて検討する必要がある。

フランジ面の法線ベクトルがトラス装置のトロイダル方向と一致するポート（いわゆる接続ポート）を設ける場合にも、ポートの構造は設計時の重要な検討事項となる。磁場コイルの寸法によっては図6(f)のように半径方向を向いたポートから斜めに管を延長してもトロイダルプラズマの接続方向に視線を確保できないことがある。そこで真空容器本体の設計時に図6(g), (h)のように接続ポートを用意することになる。磁場コイルと真空容器の設置順序も含めた装置の組み立てが可能な構造のポートを用意しなければならない。

2.7 真空フランジの規格と構造

真空排気時の到達圧力を重視する装置では金属ガスケットを利用する規格のフランジを採用する。ICF規格が一般

表3 主要なICFフランジの寸法概略。明記なき寸法はmm単位。メーカーにより0.1–1mm程度異なることがある。

呼称	別称	外径	厚さ	標準管 外径	ガスケット 内径	ボルト本数 -径×長さ
ICF34	DN16CF	34	7.5	19.1	16	6-M4×20
ICF70	DN40CF	70	12.7	42.7	39	6-M6×35
ICF114	DN63CF	114	17.5	63.5	64	8-M8×45
ICF152	DN100CF	152	20	101.6	102	16-M8×50
ICF203	DN160CF	203	22	153	153	20-M8×55
ICF253	DN200CF	253	25	203	203	24-M8×60

的である。表3にICFフランジのうち比較的小型でよく用いられるサイズを示す。日本ではフランジ外径の呼び寸法に基づく呼称が一般的であるが、輸入製品など接続可能な管の外径の呼び寸法に基づく別称を用いることもある。図7(a)にICFフランジの断面を示す。両側のフランジが同じ形状のナイフエッジを有し、ガスケットをナイフエッジで圧縮する。通常フランジがSUS製で、ガスケットは無酸素銅製のものを用いる。ガスケットの外側側面がフランジの縁に押し当てられガスケットに働く圧縮応力でナイフエッジ斜面とガスケットが密着し封止される仕組みである。そのためナイフエッジがICFフランジの要であり、損傷させてはならない。大型のフランジは比較的重量があるので着脱時に互いにぶつけないように注意しなければならない。ナイフエッジ面を表に向けて置いてあるフランジの上に工具を置くのも厳禁である。締結にあたって円周方向に均等に圧縮するため、図7(b)に示すような離れた位置

のボルトを順番に締める，いわゆる対角締めを行う．ICF フランジは締結トルク管理が必要，コストが高い等が難点にも思える．しかし，トルク管理に関してはトルクレンチを使わずに手の感覚で締めても円周方向に均等に，かつ，少しずつ締結トルクを増していけば，リークなく締結できる．また，小型の装置では構造上そもそもトルクレンチが使えないポートもある．ICF ガasketは金属製で1回のみの使用とされているため維持管理にコストがかかるがOリングでは得られない到達圧力のためと思えばさほど高価ではない．ICF ガasketはサイズにもよるが1枚数百円から数千円程度である．近年IPDと呼ばれる種類のガasketが入手できるようになった．図7(c)のように従来のICF ガasketに比べて厚く内径が大きい．ナイフエッジの稜線に触れずに斜面による圧縮を利用するため数回の着脱に耐えられる．またポートの有効径をガasket内径で制約されることがないため外径の大きな機器の導入に便利である．ICF フランジは締結ねじ穴とパイプの隙間が狭いため，工具がその隙間に接触しないように注意して作業する必要がある．例えばスパナでは図7(d)のようにボルトに嵌め込む時には接触しないが回転するうちに接触する場合もある．

その他の円形フランジとして，Oリングを用いたフランジがJIS規格で定められていた．同程度の外径の管に対してICFフランジと比較すると，フランジ外径が大きく，ボルトの本数が少ない．図8(a)のようにフランジの構造が対称ではなく，Oリング溝を有する(VG)フランジと平面(VF)フランジの対で締結する．両者は外見で区別できないため，交換部品の手配には注意を要する．

特殊形状のフランジではOリングによる真空封止が便利である．開口部に見合った適当な大きさの規格Oリングを選定し，片方のフランジにそのOリングに適合する溝を加工すればよい．ポート側に溝を設けると，ガラスや石英板で封止して観測窓とすることもできる(図9)．Oリング

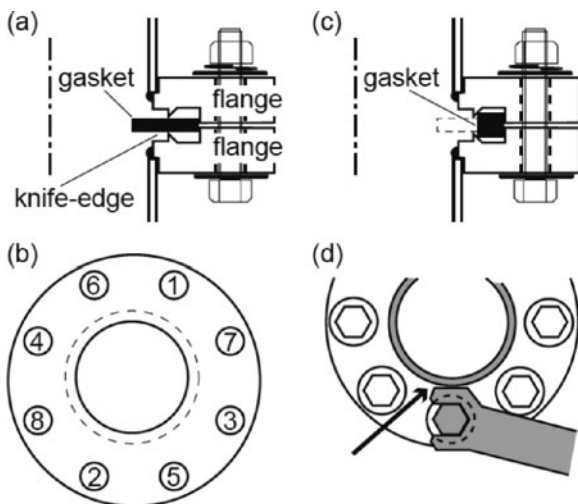


図7 ICFフランジの構造と締結時の注意．(a)ICFガasket使用時のフランジ断面図．ボルト穴を除き回転対称な構造のため，一点鎖線で表した中心線より右半分のみを示す．(b)ボルト締結の順序．(c)IPDガasket使用時の断面図．(d)工具がパイプに干渉する例．

の耐熱は高々200℃程度なので，真空容器のベーキング処理，プラズマやプラズマ加熱源からの熱負荷に注意する．またマイクロ波を利用する装置ではOリングフランジからの漏えいに留意する．

主にガス注入系統など小口径配管の接続にはスウェージロック社のSwagelok[®]チューブ継手[15]や同等品がしばしば用いられる．図8(b)のように内面にテーパのついた受けに対してパイプを突き当て，二種類のフェルールと袋ナットで締める．容易に確実に漏れない接続ができ，特に初回締め付けのトルク管理がナットの回転角度で判断できる特徴を有する．大気圧を超えるガスボンベ-マスフローコントローラー間の配管だけでなく，マスフローコントローラー-真空容器間のいわゆる真空領域の配管継ぎ手としても有用である．主にSUS管の接続に用いるが，ナイロンチューブを絶縁や取り回しの都合で利用することもできる．詳細はスウェージロック社の製品カタログを参照されたい．

ターボ分子ポンプとロータリーポンプの間など，大気圧から1 Pa程度までの領域の配管には，KFフランジ(NW

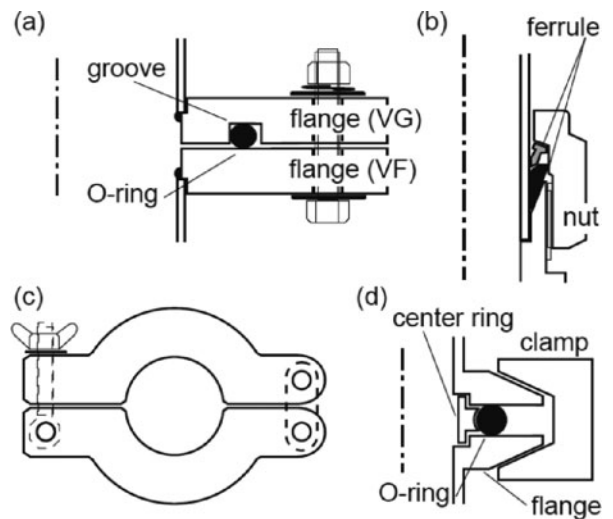


図8 その他のフランジの構造．ボルト穴等を除き回転対称な構造のため，断面図は一点鎖線で表した中心線より右半分のみを示す．(a)典型的なOリングフランジの断面図．(b)Swagelok[®]チューブ継手の断面図．(c)KFフランジの二分割クランプ．(d)KFフランジの断面図．

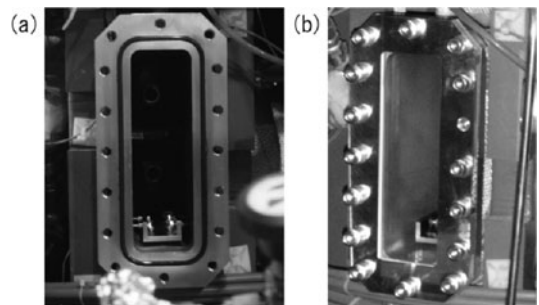


図9 特殊形状(長方形)フランジの例．(a)東北大学ヘリアックの水平ポートと溝に取り付けたOリング．(b)石英板を用いた観測窓の取り付け．石英板と固定枠の間には石英板損傷防止のためテフロンシート(白色)を挟んでいる．

フランジとも呼ばれる、ISO 2861-1) 規格が多用される。手締め可能な二分割クランプ (図 8 (c)) を用いるため、クイックカップリングとも呼ばれる。図 8 (d) のようにフランジ面は平面で溝の代わりに Oリングが負圧に吸い込まれないようにセンターリングを有する。比較的安価で組み立てや分解も容易なため、グロー放電等ロータリーポンプのみで実験可能な装置にも用いられる。

2.8 設計上の留意点

ポート構造と真空フランジが定まると真空容器の詳細な設計図を描くことができる。実験に使用する磁場コイルやコイル支持構造物を考慮しながら、架台に対する真空容器の支持方法や、容器内外に機器を設置するための構造も検討しておく必要がある。精度を要する場合には平面の出ているジグを溶接、そうでなければナットを溶接してもらうと便利である。

磁場の立ち上がり時に発生する誘導電流や高周波電磁場などに起因するノイズを避けるために、真空容器の電気的接地箇所を制限する場合もある。真空容器の支持方法を検討する時に、絶縁して支持する設計にすると、その後のノイズ対策が容易である。

真空容器が冷却配管を有する場合には、その取り回しも検討しておく。真空容器壁の冷却の他、高熱流束に曝されるターゲットやアンテナ、マイクロ波透過窓などを冷却する場合もある。磁場コイルの内側と真空容器の間隔が狭く硬く曲げにくい水冷チューブの設置に苦労することもある。

図面が完成したら機械加工の業者に製作を依頼することになるだろう。価格は数十万円から数百万円までその真空容器に何を求めるかで大きく変わるだろう。真空部品の製作を初めて取引する業者には打ち合わせの時に確認したほうが良い事項がある。溶接と表面処理についてである。

リーク無き真空容器の到達圧力は表面のガス放出と排気速度のバランスで決まるため、到達圧力をどれだけ下げられるかは、マイクロな表面積をどれだけ小さくできるかにかかっているといてもよい。ポート等の真空容器の溶接は「内側から」が基本である。溶接トーチの寸法や形状によっては内側溶接を実施するために対向するポートが要求されることもある。また、製作後の脱脂や電解研磨などの表面処理も依頼しておく。小さな部品と異なり研究室に納品された後で大きな真空容器の表面を洗浄するのは困難である。電解研磨を行えばマイクロな凹凸が減少し表面積が小さくなる。

2.9 さあ真空容器を排気しよう—その前に—

本章ではプラズマ実験のための真空容器・真空排気システムについて解説した。実験系の研究室に配属された学生であれば修了までにぜひとも身につけてほしい事項を中心に記述したつもりである。

真空容器を設計製作する期間にその研究グループに所属できれば運が良い。多くの研究グループでは、すでに整備された実験装置があり、本章で述べた内容のうち日頃の研究に直結するのはポンプやバルブの操作と大気開放作業時

のフランジの開閉程度かもしれない。しかし普段何気なく利用している真空容器や真空排気システムにも様々な工夫が施され、その結果として現在の実験環境が整っているはずである。本章を読み終えたら実験室で装置を眺め直していただければ幸いである。

実験装置をゼロから立ち上げる機会が与えられた運の良い読者には、本章の内容が真空容器の設計や機器の選定の参考になれば幸いである。あとは各機器を組み立てていけば、プラズマ実験のための真空環境が手に入るはずである。しかし、その前に、紙面の都合で本章では扱わなかった内容を列挙する。

- 圧力測定機器の特徴と選定について
 - ピラニーゲージとイオンゲージがあれば、とりあえず圧力は測定できる。正しく測ることも良好な真空環境を得るために重要である。
- 壁コンデショニングについて
 - 真空容器壁のガス放出は表面の状態で大きく異なる。特に水分子の除去にベーキングが有効である。またグロー放電等でプラズマを生成して表面を洗浄する方法もある。
- 漏れ探しについて
 - 表面のガス放出で説明がつかない圧力の時間変化は微小な漏れ (リーク) による。ヘリウムやエタノールなどで漏れ探しをする。調べる順序や応答時間に注意することが重要である。
- 高圧ガスの取り扱いについて
 - たとえ不燃性であっても高圧ポンプの取扱いには注意が必要である。
- 排気ガスの取り扱いについて
 - 良好な真空環境を求めるならばロータリーポンプから排気される油蒸気が実験室に充満しないように対策を行いたい。もちろん毒性・可燃性気体の排気は適切に行わなければならない。
- 真空ポンプ運転のための電気配線について
 - 特に大型のロータリーポンプは大電力機器であるとともに定常運転が要求される。確実な配線でトラブルなき実験を目指したい。

いくつかの項目は以降の章で取り上げられるであろう。また文献[1-4]も参照されたい。これらの内容もマスターしたら、いよいよ真空排気開始である。そして望み通りの真空環境が得られたら、次はプラズマ生成だ！次章へつづく。

謝 辞

本章で用いた図の一部は JSPS 科研費 22740357, 24246152 の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- [1] 堀越源一：真空技術 [第 3 版] (東京大学出版会, 1994)。
- [2] 株式会社アルバック編, 新版 真空ハンドブック (オーム社, 2002)。
- [3] 赤石憲也：プラズマ・核融合学会誌 69, 452(1993)。
- [4] 日野友明他：プラズマ・核融合学会誌 71, 575 (1995)。

- [5] Y. Koyatsu *et al.*, Vacuum **47**, 709 (1996).
 [6] F. Watanabe *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. **A13**, 140 (1995).
 [7] S. Inayoshi *et al.*, J. Vac. Soc. Jpn. **41**, 574 (1998).
 [8] M. Suemitsu *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. **A5**, 37 (1986).
 [9] J. Blears *et al.*, Adv. Vac. Sci. Technol., ed. E. Thomas (Perгамон, 1960) Vol. 2, P. 473.
 [10] A. Schram, Le Vide **103**, 55 (1963).
 [11] W. Beckmann, Vacuum **13**, 349 (1963).
 [12] A. Okamoto *et al.*, Plasma Fusion Res. **3**, 059 (2008).
 [13] A. Okamoto *et al.*, Plasma Fusion Res. **7**, 2401018 (2012).
 [14] T. Zama *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, L349 (1993).
 [15] <http://www.swagelok.com/>

コラム1 “小リークと見て侮る勿れ”

真空を扱ったことのある人が「真空に関する苦勞や失敗で一番に挙げられるものは？」と尋ねられて真っ先に思い浮かぶのが、真空リークに関することではないでしょうか。ここでは私が核融合科学研究所のLHDにおいて実際に見てきた真空リーク例を紹介します。

真空リークと一言と言ってもそのリーク量は大小さまざまです。超高真空状態でみつかる微小リークもあれば、粗引きポンプを使っても排気できないようなものまであります。大きなリークで代表的なものは、フランジ締めのカエレスミスです。例えば、片側がタップ付きフランジでボルト穴が貫通していない場合、使用するボルトの首下長さが長過ぎてボルトの先端がボルト穴の一番底に当たってしまい、フランジを完全に締めることができなかつたケースがあります。用意してきたボルトの1, 2本が5 mm 長いだけで大きなリークとなってしまいますので、全てのボルトの確認が必要です。

フランジ締めの基礎を過信したために発生してしまったリークがあります。あるメーカーの窓フランジは、フランジのボルト締めを行う際に、対角線上での締め付け順序で行うのではなく、円周方向での締め付け順序で行うことを求めています。これは、窓材の曲げ強度が小さいため、対角線上での締め付け順序で行ってフランジを反らせると、リークや窓割れが発生するからです。このことは窓の取扱説明書にも書かれているのですが、それを読まずに対角線上での締め付け順序でボルト締めを行ってしまったため、同一メーカーの窓において数件リークが発生させてしまったことがあります。先ほど述べたボルトが長すぎるために発生したリークでは、放電容器を大気開放せずに数本のボルトを交換することで、真空排気を継続することができたのですが、この窓リークの場合は放電容器を大気開放せざるを得ませんでした。

放電容器内にダストが発生する実験装置では、バルブのシートリークも無視できないリーク要因です。これはダストがバルブシートOリングに乗ってしまうことで発生するリークです。放電容器と計測・加熱機器の間のゲートバルブにおいて発生してしまったことがあります。この場合、機器側を真空に保っておけば放電容器内に影響を及ぼすことはないのですが、機器側を大気開放することができません。バルブを二重にする、ダストが溜まりやすい容器下側のバルブのメンテナンスを強化するなどの対策で回避することになりますが、重要なのはこういうリークも起こり得ると知っておくことです。状況によっては外からのヘリウムリーク試験でわからないこともあり、リーク箇所の特定に時間がかかってしまうこともあり得るからです。

LHDでは、リーク試験のために平均して2週間程度時間を取っています。最初の5日間で大きなリークを探した後、週末にベークングをして圧力を下げ、次の5日間で詳細なリーク試験を行うというものです。これまでで最も苦勞したのは、ヘリウムをかけてからリーク反応を確認するまでに2時間以上かかるリークでした。リークのあった装置は細長いプローブ型の装置で、先端が窓になっており、この窓のロウ付け部分でリークが発生していました。大気側でヘリウムをかける場所からこの窓まで5 m ほどあり、しかもヘリウムの通り道には光ファイバ等が設置してあったため、ヘリウムがリーク箇所まで到達するのに時間がかかる構造となっていました。このリーク箇所を特定するのに約1か月かかりました。

以上3つの真空リーク例とLHDリーク試験の苦勞話を紹介させていただきました。このコラムが皆さまのリーク対策の一助になっていただけたら幸いです。

(鈴木直之 核融合科学研究所技術部)


 いな がき しげる
 稲垣 滋

九州大学応用力学研究所教授。学生時代から磁場閉じ込めプラズマの実験に従事。最近実験室が手狭になってきた事を悩んでいます。少し前から owncloud を試しています。容量を気にせずですむのでなかなか快適です。


 おか もと あつし
 岡本 敦

東北大学大学院工学研究科量子エネルギー工学専攻助教。中性粒子や高エネルギーイオンが共存するプラズマの実験研究に従事。大学院生 (HYPER-I)、ポスドク (MAP-II)、現職 (DT-ALPHA) と様々な装置で実験を行うも、全て直線型なのは愚直な性格によるものか。磁力線が曲がれば柔軟な発想が得られるかも、とトーラス装置の実験や解析にも興味を持ち始めている。


 すず き なお ゆき
 鈴木 直之

核融合科学研究所技術部装置技術課。LHD 実験開始当初より、LHD 真空容器の真空管理、真空排気装置運転保守整備など真空に関わる業務に従事。最近、真空ポンプから排出される排気ガスの処理に関連する業務も行っています。真空は核融合装置だけではなく、様々な分野での実験や製造、測定等に応用されていますので、知識やノウハウを得ることは必ずどこかで役に立つと思います。私も本講座をきっかけとして今一度学習してみようと思います。