

核融合科学研究所の計測機器におけるリークテストの現状

広倉 覚

核融合科学研究所 技術部 計測技術課 イオン温度計測技術係

概要

大型ヘリカル装置（LHD）には数多くの計測装置が設置されている。LHDの真空容器は大型であり、リークのない状態に保たれプラズマ実験がなされている。観測窓（ポート）を介して計測装置が接続されプラズマの各パラメーターは測定されるのであるが、その計測装置自体にもリークがあってはならない。それら計測装置を構成する真空部品等に関してあらかじめリークの無いことを確認している。そのリークテストについての現場作業、工夫、むつかしさ、失敗など報告する。

1 はじめに

まず、自己紹介させていただきます。私は、名城大学理工学部電気工学科を卒業してすぐ名大プラズマ研究所のトーラスプラズマ発生装置 JIPPT-II の運転保守補助の技官として就職しました。その後、平成元年には核融合研の組織となり今日まで勤めさせていただいています。2010.3.16で既に31年経ちました。

プラズマ研では、まずプラズマ装置の基礎としてまず真空を学びました。そして、リークテストの実際を経験しました。電気工学専攻であることから、電気電子回路も製作しました。主装置を取り巻く周辺の計測装置等の運転保守等も担当させていただき、プラズマ発生装置の全体を浅く広く理解できたと思っています。主にかかわったものを列挙すると、小型真空排気系の制御盤の設計製作、中型トーラスプラズマ発生装置の冷却水設備およびプラズマ発生の主シーケンス制御、四重極質量分析器による残留ガス分析、ガス導入系およびガスパフ装置の製作、オペアンプの積分器によるプラズマ電流測定、プラズマ発生用高電圧コンデンサー電源、電流維持用サイリスター電源、電子温度測定用レーザー散乱装置、電子密度測定用マイクロ波干渉計、アイスペレット入射装置、抵抗ボロメーターアレイの設計、放電洗浄（TDC そして ECR 放電洗浄、グロー放電洗浄、カーボニゼーション、ボロニゼーション）を通してのプラズマ壁相互作用の初歩的理解、などでありました。

平成8年頃から13年まで、メンタルヘルス的なことから休職をしておりましたが、幸いなことに周囲のみなさまのおかげで復職することができました。以前からの経験を生かし、真空関係の仕事で再スタートし、今現在、核融合科学研究所の計測機器における真空試験や FIR（遠赤外レーザー干渉計）計測装置等の運転保守をさせていただいております。

今回は、そのうちの計測機器におけるリークテストの現状について報告します。

2 リークテスト

2.1 真空とリークテスト

私は、計測装置を構成する真空部品等に関してリークテスト(リークディテクター、四重極型質量分析計を使用)を主に行っています。それにともない、残留ガス分析(四重極型質量分析計を使用)も行ったりします。教育的なことでは、工業高校生職場体験(デュアルシステム)等で真空の講義、体験も行いました。

まず、はじめに、真空、プラズマ等について簡単におさらいをします。プラズマを発生させるためには真

空容器を超高真空にしてリークのほとんど無い状態にします。そこに燃料ガス（水素等）を導入し、次にそれを電離させプラズマにします。真空にするには真空ポンプが必要です。ロータリーポンプ（RP）、メカニカルブースターポンプ（MBP）、ターボモレキュラーポンプ(TMP)が代表的です。圧力と時間の変化をグラフ化したものが排気曲線です。真空のもれ（リーク）とは外側の大気（空気）が真空容器に入り込むことを言います。容器に入った水のもれとは反対の感じです。残留ガス分析をしてマスパターンを見れば空気が混入しているか分かります。超高真空になると不純物の分圧は主に水（ $m/e=18$ ）になります。この水を除去するのがベーキングです。LHDのようなプラズマ発生装置では、放電洗浄を行えばその他の不純物（酸素等）も除去できます。

私が行っているリークテストは、He（ヘリウムガス）を使ってそれが真空容器内に入ったかを検知する方法です。リークレートは、流量にして $\sim 1E-10$ Torr \cdot l/sec($\sim 1E-11$ Pa \cdot m³/sec)の検出感度です。

2.2 リークテストに使用している真空容器（テストチェンバー）

そのシステム系統図を示します。

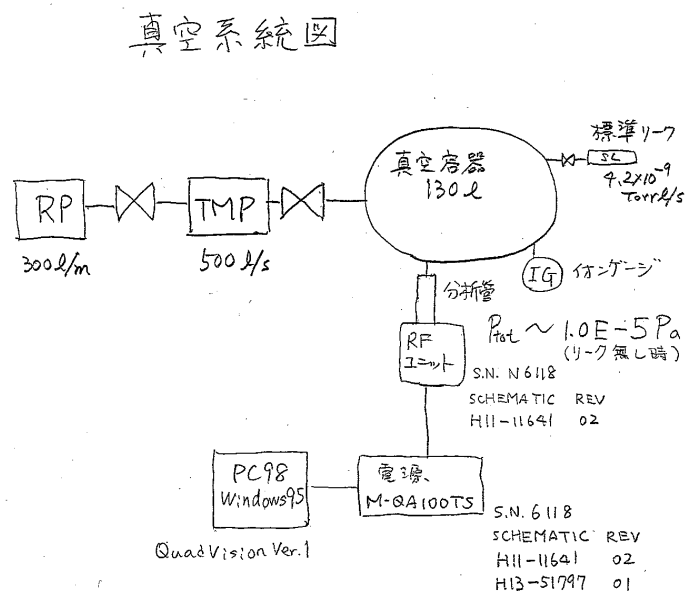


図1. 真空容器（テストチェンバー）のシステム系統図

核融合研技術部の手づくりです。主な仕様を列挙します。

圧力範囲：760Torr \sim 1E-8Torr、容積：130L、Q（アウトガスレート）：1E-7 \sim 1E-6Torr \cdot l/s、ポート種類：ICF34 \sim 356、NW2、制御盤：(PLC)タッチパネル、ポンプ：RP,TMP、バルブの種類：アングルバルブ、ゲートバルブ、ニューマチック、手動、ゲージの種類：ピラニ、ペニング、イオン、四重極型質量分析計 $m/e=1\sim 100$ 、パソコン制御、表示、ガスボンベ：(7 m³)N₂,He 等です。

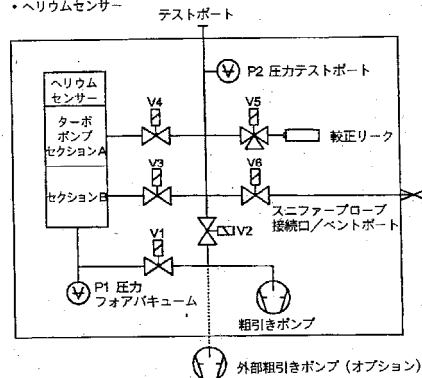
使用するには真空の知識と経験が必要である。リークレートは、He 標準リークを使用してたえず校正している。運転できる技術職員は少ない。

2.3 リークディテクター

そのシステム系統図を示します。

測定システムは、簡単に区分すると以下の部品で構成されます。

- テストポート
- 粗引きポンプ
- ターボ分子ポンプ
- バルブ類
- ヘリウムセンサー



テスト対象物は、テストポートのフランジに取付けられます。

図 2. リークディテクターのシステム系統図

市販の海外製品です。質量電荷比 $m/e=4$ のみを検出するもので検出感度は $<1.0E-10\text{mbar} \cdot \text{l/sec}$ である。接続はテストポート NW25 の引口がついている。(NW と ICF の変換を作製したり、NW 付きベローズ等を利用して実際のリークテストは行っている。これにより時間がだいぶ節約できたと思っている。)操作は非常に簡単で SW on で、測定開始可能まで約 20 分である。その後リークレートが小型の画面に表示される。非常に使いやすい。ほんの少し難点を言えば、引き口の圧力が少し分かりにくい(圧力の高いところまでリークテストできるようにピラニゲージを使っているのだから、そうになっているようだ。)終了は単に SW を OFF するだけでよい。真空を理解していないものでも使える良さがある。

2.4 リークテストの実際

リークテストの実際を文章にすると、かえって分かりにくくなるので箇条書きにします。

- フランジ概観検査
- 取り付け準備
- 運転員さんによる取り付け (トルク管理→マニュアル、締め付けトルクの表)
- 機器運転
- He 吹きかけによるテスト (大きなリーク)
- He 袋によるテスト (小さなリーク)
- リークテスト結果記録
- 機器停止
- 取り外し

2.5 締め付けトルクの表

締め付けトルクの表 (040831 S.Hirokura) を作成しました。これはフランジによってどのように、どのくらいのトルクで締めるかを人や場合によらず一定化するためマニュアル化したものです。これが意外と役立ちました。実際は表になっていますが紙面の関係上、内容を書き出しておきます。

[フランジ締め方、**ICF34** 手で締める、工具で締められる程度のトルクで勘で締める、**ICF70** 手で締める、50kgcm で 1 回締める、60kgcm で 1 回締める、70 kgcm で 2 回締める、**ICF114,ICF152,ICF203** 手で締める 50kgcm で 1 回締める、75kgcm で 1 回締める、100kgcm で 2 回締める、**ICF253** 手で締める、50kgcm で 1 回締める、

75kgcm で1回締める、100kgcm で1回締める、125kgcm で1回締める、150kgcm で2回締める、ICF305 手で締める、50kgcm で1回締める、75kgcm で1回締める、100kgcm で1回締める、125kgcm で1回締める、150kgcm で1回締める、175kgcm で2回締める、ICF356 手で締める、50kgcm で1回締める、75kgcm で1回締める、100kgcm で1回締める、125kgcm で1回締める、150kgcm で1回締める、175kgcm で1回締める、200kgcm で2回締める]

2.6 リークテストの所要時間等

どのくらい時間がかかるか？とよくきかれる。約1時間/1件←リークが無いとき。1時間以上/1件←リークの有るとき。1件/1日が運用上の目安であると思う。後で考えると時間がかかってない気がしたりするが、それはリークが無い作業であって、リークが有ると結構時間がかかっていたりする。

取り付け部 (ICF フランジ) のリークは、無いように取り付けをして、制作上のリークを見つけることが意外と難しい。

リークを修復するか？が問題である。リークの有無を判定するのはもちろんであるが・・・

リークがあれば作業時間は、当然余分にかかるし精神的にも肉体的にも苦勞する。しかし、悪い結果 (リークが有るという結果) を出しても認められない！「すみませんが、リークが有ります。」という悪い結果のときのほうが、より高度で複雑な仕事をしたと思うのだが、実際は、「リークが無くて、よかったですね。」という時のほうが認められることが多い。

リークテスト作業は、時期的に集中する傾向がある。それは LHD に機器取り付け時期と関連し集中するのだが、それゆえリークテストの希望に添えない場合もあり少々残念である。

2.7 よくある失敗

NW25 クイックカップリング等は簡単と思い、えいやあと締め付け取付ミス of リークがあつたりする。ICF ガスケットは、径が大きいと外側にはみ出しやすいのでカプトンテープなどで仮固定をするとよい。取り付け前に、エッジ等をあまり見ずに取り付け後で異常が判つたりする。こんな時はがっかりすることが多いので、取付前にはエッジ等をよく見ておくことを勧める。

2.8 今まであったリークの例

ピラニゲージ(製品)のリーク (~1E-2Torr · l/sec) : これは製品であったため、まさかリークが有るとは思わなかった。リークは、「無い」と自分で確かめないといけないと思った。たぶん一生に一度位だと思う。

RP で引けないもの : これは意外と難しく、取付ミスかとも思ったりする。排気曲線が役立つ。

漏れの箇所が冷えて氷がついた : ミニコンに 30 cm 程のベローズがついたものであったが、こういったものもあった。

2.9 リークテストの難しさ

- 大きなリークがあると、小さなリークは分からない (He 回り込み)
- リークは、取り付け箇所 (ICF 等) か溶接部か？
- バイトンゴムはやっかい (He 浸みこみ)
- 単体検査が基本でそれを組み立てて総合検査する。
- 一般的に「急がば回れ」だが・・・(これは、リークテストにもあてはまる。)
- 判定するリーク量の範囲が広い。

R P で引けない、音がする、ピラニゲージでわかる程度、イオンゲージでわかる程度、マスパターンでわかる程度、He 分圧でわかる程度と範囲が広くマニュアル化しにくい。

- 時間と効果を考えればよいのか？
- ガンガン増し締めすればリークは止まる？本番ならそれでもいいがリークテストの意味があるか？LTなので増し締めは1回まで、で良いのでは？
- リーク有りとは定量的にデータを出すのは意外と難しい。
- リーク有りといっても喜ばれない。(実際、リーク有りと言って怒られたような経験もある。)
- リークを止めるまでやってあげたいが・・・
- 明日テストしたいという急な依頼が多い。
- テスト装置を運転できる人が限られている。後継者はいないのが現状。
- ボルト締め等、作業する人手が居る。
- リークを判定できる人が少ない。
- リーク箇所を特定できる経験をつんだ人はもっと少ない。
- リークディテクターの貸出係り？にならないようにしたい。

2.10 リークテストをした計測装置等

今までにリークテストをした計測装置等を列挙しておきます。ECE antenna、Lost Fast Ion Probe、Thomson Scattering、HIBP leak valve、HIBP ビームライン、TESPEL、Soft X-ray spectroscopy、Penning gauge spectroscopy、Laser blow off、MIR、AXUVD、NPA、Bolometer、赤外放射温度計、H α 計測、軟 X 線、ペニング真空計 (分光)、レーザーブロー真空容器、エッジトムソン、CO₂ 干渉計、ミリ波反射計、反射計窓、ミリ波干渉計、SPRED 分光器、荷電交換分光、ジボラン、サンプル、Li ビームプローブ、2.45G プラズマ生成用、接線 X 線カメラ、磁束ループ、計測ペレット、ダイアター周辺計測、シャッター付サンプル、ガス放出測定、職場体験等です。

2.11 リークテストの日数

2003 年度から実施した年度ごとのリークテストの日数を表したものが図 1.です。リークテストを仕事量として表すのに時間で表したらよいか件数で表したらよいか迷いますがリークテストはリーク無しと言う良い結果で簡単に終わる場合もあればリーク有りという時間ばかりかかって効率だけ考えれば、所謂ダメ (実は有効な結果なのだが) な仕事も有って表しにくいのですが、日数と言う表し方にしました。2005 年度までは計測機器取り付けが多かったためかリークテスト日数が多いですが、その後ほぼ一定になっています。

リークテストの日数

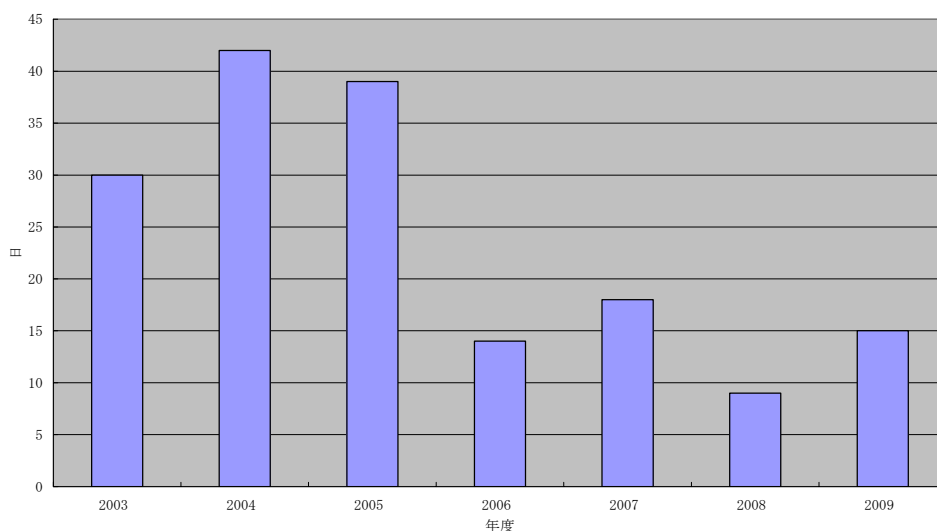


図3. リークテストの日数

2.12 排気曲線

上述の真空容器（テストチェンバー）でリークが無い場合の排気曲線を示します。3000/min のRPで100リットル（あるいは160リットル）の真空容器を引いた場合で、計算値からグラフ化したものです。

04/126

$$S = 5 \text{ l/s} \quad (300 \text{ R/min})$$

$$\tau = V/S$$

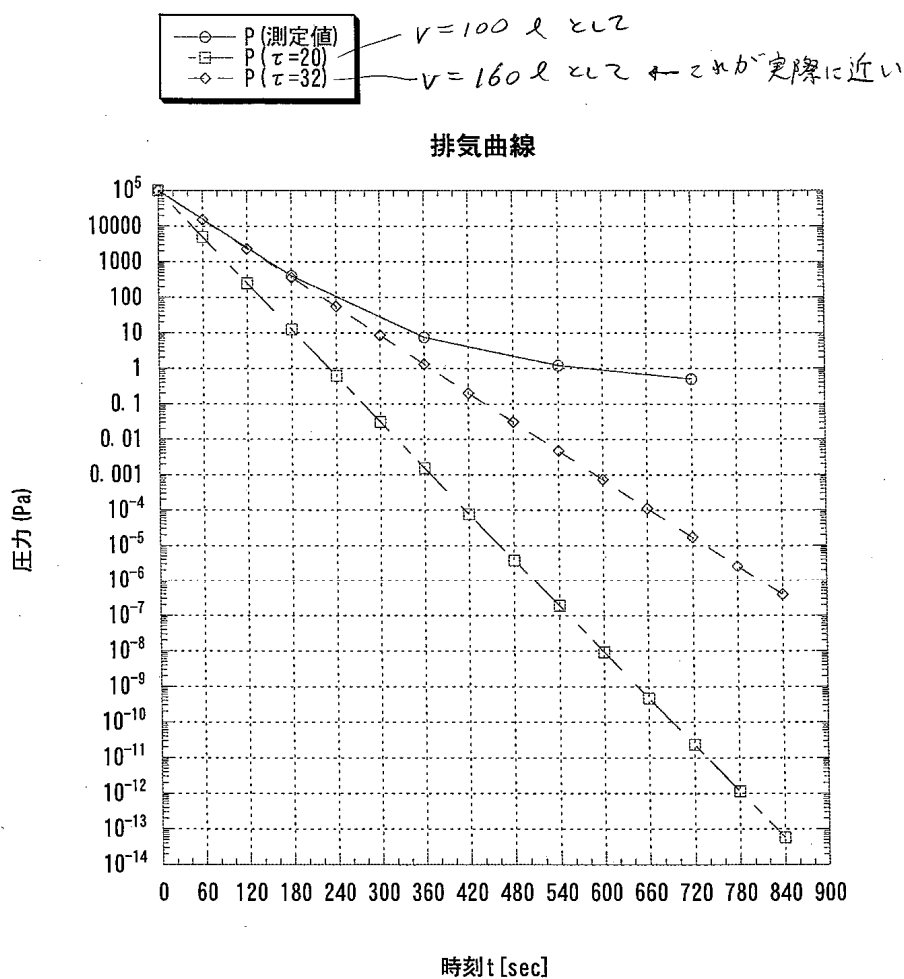


図4. 計算値からグラフ化した排気曲線

つぎに職場体験として工業高校生が作製した排気曲線したもの（ピラニゲージを何分かおきに読み取ってグラフ化したもの）を示します。手書きで味があって、これは結構役立っています。

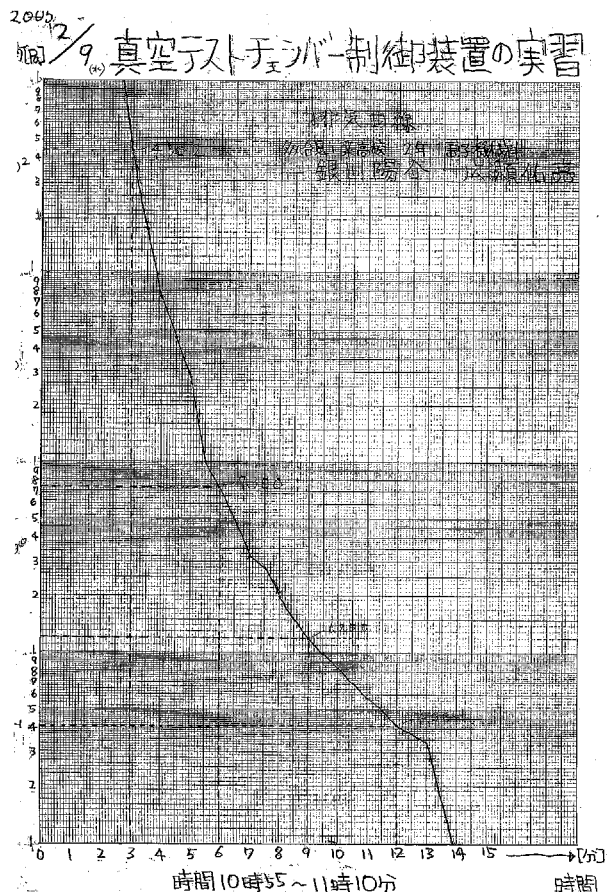


図5. 職場体験として工業高校生が作製した排気曲線

3 まとめ

ここ約7年間の私の真空関連業務のリークテストについて、まとめさせていただきました。この仕事は決して1人だけでやれるものではなく周囲の皆様のお力をお借りして出来たものだと思っています。今後ともこのような仕事が無くなってしまふことが無いように日々地道に努力していきたいと思っています。皆様今後ともどうぞよろしくお願いします。



図6. 真空機器を点検中の広倉氏 080116