

マイクロ波によるクライオポンプ温度上昇の対策

鈴木 直之*¹, 林 浩己*¹, 岡田 宏太*¹, 吉村 泰夫*²

*¹ 自然科学研究機構核融合科学研究所技術部

*² 自然科学研究機構核融合科学研究所ヘリカル研究部

1. はじめに

大型ヘリカル装置 LHD (Large Helical Device) では、容積が 200m³ ある真空容器を、クライオポンプをメインポンプとした排気装置で真空排気し、核融合プラズマを生成している。プラズマを生成するためにマイクロ波を真空容器内に入射しているが、長時間マイクロ波を入射すると、マイクロ波の一部がクライオポンプに到達してクライオパネル温度が上昇し、真空排気に影響を与える現象が観測されるようになった。

このマイクロ波を遮蔽するためにクライオポンプの吸気口にメッシュを設置する対策をとることになったが、金属メッシュを設置することによって当然排気装置の排気速度が低下することが予想された。

今回、この排気速度がどれくらい低下するかを計算と予備実験で推定した。また実際にどれくらい低下したかも実測したので報告する。

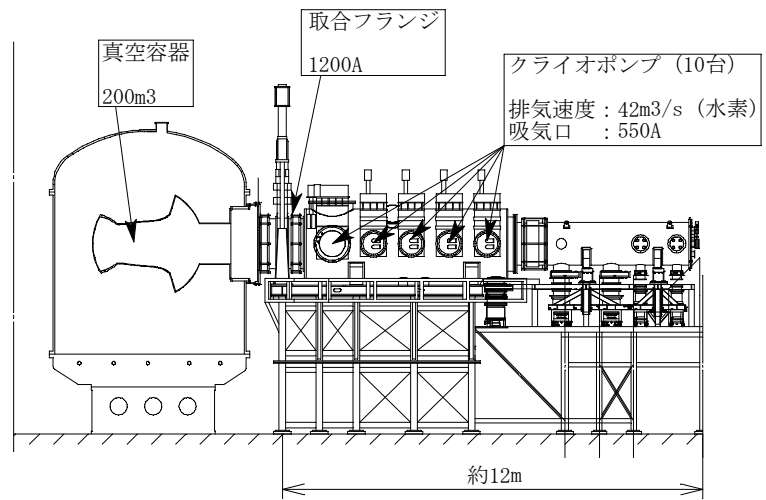


図1 主排気装置断面図

2. 装置概要

LHD では真空排気装置として2つのシステムを設置している。その一つである主排気装置の断面図を図1に示す。長さ12m、太さ2mのダクトに10台のクライオポンプが設置されており、直径1.2mのフランジで真空容器と接続されている。設置されているクライオポンプは水素における排気速度が42m³/s、吸気口の直径が550mmである。クライオポンプは内部に設置されているクライオパネルを極低温まで冷却し気体を吸着・凝固させることによって排気するポンプである。融点が低い水素も吸着材(活性炭)を極低温にすることで吸着排気することが可能である。この吸着排気ができる上限の温度を20Kとし、23Kまで温度上昇が確認されたらインターロックによって吸気口のバルブが閉じるシステムとなっている。

プラズマを生成するため、電子サイクロトロン加熱装置 ECH (Electron Cyclotron Heating) によりマイクロ波を真空容器内に入射している。クライオパネルの温度上昇が確認された2009年には77GHz、300KWのマイクロ波が数十秒入射されていた。図2に各クライオポンプのクライオパネル温度上昇の様子を示す。この図で分かるようにマイクロ波入射時にはパネル

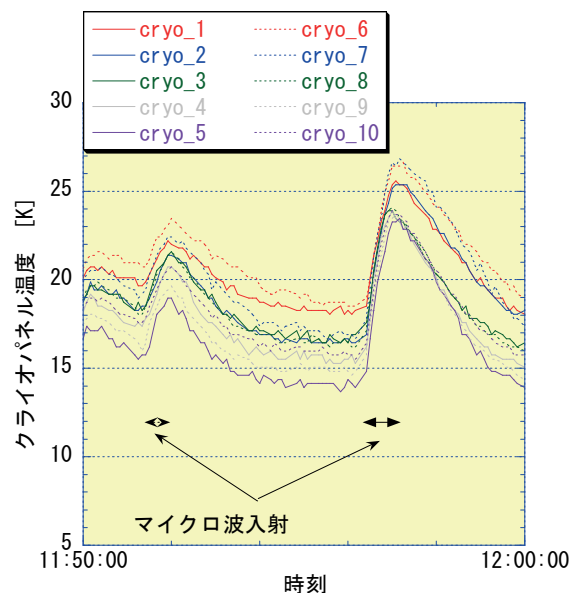


図2 マイクロ波によるクライオパネルの温度上昇

温度が 20K 以上、ポンプによっては 25K 以上まで上昇している。

3. 対策

金属メッシュを設置することはマイクロ波を遮蔽するための基本的な手法の一つである。身近なものでは、電子レンジのガラス扉に張られているものが挙げられる。金属メッシュを選定するにあたって最も重要なパラメータは網目のサイズである。網目を細かくすればするほど、遮蔽効果は上がると考えられるが、逆にこのことは気体の通りやすさ、排気コンダクタンスを低下させることに繋がり、排気速度を低下させる。それゆえできるだけ目の粗い金属メッシュで十分な遮蔽効果を生み出さなくてはならない。

LHD は規模の大きい装置であるため、金属メッシュ選定のための試験を LHD で行うことは経済的にも時間的にも不可能である。よって、金属メッシュの排気コンダクタンスを計算で求めることにした。

しかし、金属メッシュの排気コンダクタンスを求める計算式は、私が調査した限り見つけられなかった。その為、金属メッシュではないが、金属メッシュと同等に扱えそうな近似的な式を仮に採用し、それが妥当であるかどうかを小型の実験装置によって検証した。

使用する金属メッシュの候補として表 1 に示したものを用意した。網目サイズは、電磁波を受信するためのアンテナ長が $1/4 \times \lambda$ であることから、将来入射されるであろう 154GHz マイクロ波の波長 1.95mm の $1/4$ 、つまり 0.5mm 程度を基準に、これより小さいサイズにすることを念頭においた。また材質は SUS316 とした。

表 1 用意した金属メッシュの規格

メッシュ数	網目サイズ (mm)	線径 (mm)	開口率 (%)
30 0.51		0.34	35.8
40 0.45		0.19	49.1
50 0.33		0.18	41.7
60 0.30		0.12	51.3
200 0.077		0.05	36.8

メッシュ数：1 インチあたりの網目の数

3.1 排気コンダクタンスの推定と実効排気速度の予想

上に述べたように金属メッシュの排気コンダクタンスを求める式は見つけられなかった。そのため、金属メッシュを開口率分の穴が空いたオリフィスと見立て（図 3 参照）、オリフィスの排気コンダクタンスを求める式で金属メッシュの排気コンダクタンスが求められるか考えた。以下に穴の大きいオリフィスの排気コンダクタンスを求める式^[2]を示す（R は気体定数、T は温度、M は分子量、A は金属メッシュ開口部総面積、 ϵ は開口率）。

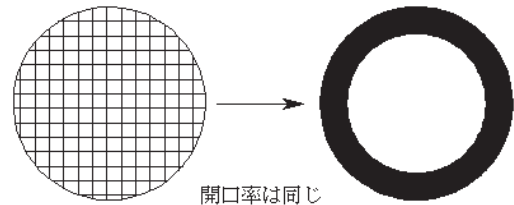


図 3 メッシュをオリフィスに近似

$$C_T = \frac{C_1}{1 - \epsilon} \quad \dots \quad \textcircled{1}$$

$$\text{ただし } C_1 = \sqrt{\frac{RT}{2\pi M}} A$$

この式を使って求めた金属メッシュの排気コンダクタンス C_T を下記実験データとともに表 2 で示す。

次に①式が適切であるか検証するために、小型実験装置を使って金属メッシュの排気コンダクタンスを測定した。用意した表 1 の金属メッシュを ICF70 メッシュホルダーに入れて、図 4 のような真空システムを構築した。マスフローによって $Q[\text{Pam}^3/\text{s}]$ の窒素を流し、金属メッシュの上流と下流に設置された真空計の値 $P_1[\text{Pa}]$ 、 $P_2[\text{Pa}]$ を測定した。真空計 1、2 間のコンダクタンス $C_{12}[\text{m}^3/\text{s}]$ はコンダクタンスの定義から $C_{12} = \frac{Q}{P_1 - P_2}$ で与えられる。図 5 に測定された Q と $P_1 - P_2$ の関係を示す。図 5 で得られた直線の傾きを C_{12} とした。

C_{12} には金属メッシュだけではなく、配管のコンダクタンス成分も含まれている。従って金属メッシュのみの排気コンダクタンスを求めるにはこの成分を取り除かなくてはならない。金属メッシュを挟まなかった時の C_{12} を $C_0[\text{m}^3/\text{s}]$ とする

と、金属メッシュのコンダクタンス $C_E[m^3/s]$ は直列コンダクタンスの合成関係から $C_E = \left(\frac{1}{C_{12}} - \frac{1}{C_0} \right)^{-1}$ で得られる。

表2に C_E の値を示す。

表2から分かることは、実験値が開口率に依存していることと、その値が①式を使った計算値の80%~90%位とそれほどかけ離れた値を示していないことである。このことから①式で得られた値の80%の値を金属メッシュのコンダクタンスとして推定できると判断した。

次に①式を使って、クライオポンプの寸法にあった金属メッシュを仮定して金属メッシュの排気コンダクタンスを求め、それを使って金属メッシュを設置した際のクライオポンプの実効排気速度を計算した。その結果を表3に示す。表3から分かることは、金属メッシュを設置することによって、クライオポンプの排気速度が定格 $42m^3/s$ から $22\sim 28m^3/s$ と35%以上も低下することである。その中でも比較的低下率が小さく、線径が太くて丈夫そうと思われる40メッシュを今回使用する金属メッシュとして選定した。

最後に、この金属メッシュを使用した時の排気装置全体の排気速度を簡単な計算によって求めた。例えば主排気装置では装置概要で述べたようにダクトにクライオポンプが10台設置されており、真空容器との取り合いはダクトの先端で行われている。つまり実効的な排気速度はダクトや取り合いフランジのコンダクタンスを考慮する必要がある。これを考慮して主排気装置の取り合い部分での排気速度を計算したところ、金属メッシュ無しでは $137m^3/s$ 、40メッシュを使用した場合 $119m^3/s$ となった。約14%の低下である。実際の排気速度の測定は年に1回程度行っており^[1]、昨年度の測定では $120m^3/s$ 程度というデータを得ている。よ

表2 実験と計算で得られたメッシュのコンダクタンス

メッシュ数	開口率 ϵ [%]	実験値 $C_E[L/s]$	計算値 $C_T[L/s]$
30	35.8 49.9	59.5	
40	49.1	88.4	103
50	41.7 64.1	76.3	
60	51.3	109	113
200	36.8 55.0	62.0	

(窒素における値)

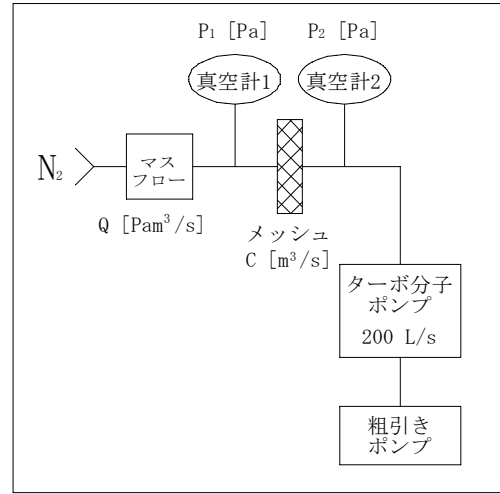


図4 メッシュコンダクタンス測定システム

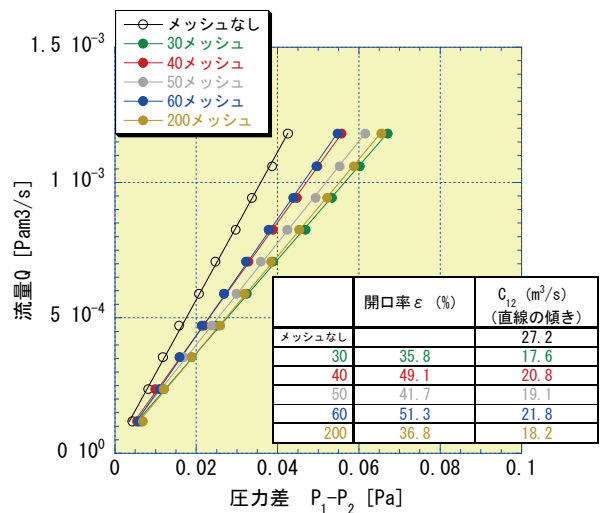


図5 配管込みのコンダクタンス測定データ

表3 クライオポンプ1台の予想排気速度
(吸気口: 550mm、排気速度: $42m^3/s$)

メッシュ数	メッシュ コンダクタンス [m^3/s]	クライオポンプ 予想排気速度 [m^3/s]
30	47.3	22.2
40	81.8	27.8
50	60.6	24.1
60	89.5	28.6
200	49.3	22.7

(水素における値)

って金属メッシュ設置時の実効排気速度を $120\text{m}^3/\text{s}$ から 14% 低下した $103\text{m}^3/\text{s}$ と予想し、研究者側に了解をいただいた。

3.2 遮蔽効果の検証

選定した 40 メッシュに適切なマイクロ波遮蔽効果があるか確認するための実験を行った。実験には周波数 72GHz の発振器とホーンアンテナ付きの受信器を使った。金属メッシュと受信器の距離を 20mm とし、発振器の位置を変えることによって、マイクロ波透過率の金属メッシュからの距離依存性を測定した。図 6 にデータを示す。このデータから透過率は 1%以下と推定できる。どこまでの値を許容するかというのは難しい判断であるが、今回はこの 1%の透過率と 14%の排気速度低下を許容以内と判断して、金属メッシュを実際に製作し設置することにした。

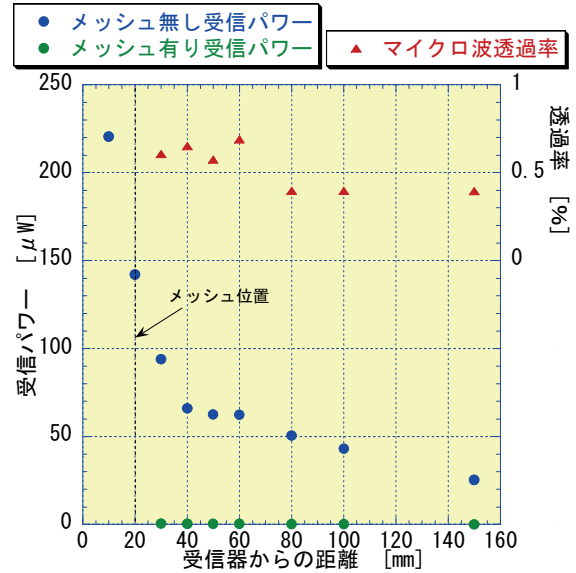


図 6 マイクロ波透過率測定データ

4. 実機における金属メッシュの影響と効果

平成 22 年 8 月からの真空排気に間に合わせるために、5 月頃から金属メッシュの設計、製作を行った。金属メッシュはアルミアングルで 1 辺 70cm ほどの四角い枠を作り、その中に金属メッシュを張ったものを 1 枚のユニットとした。18 台のクライオポンプ全ての吸気口に設置した。この状態で実際に LHD 真空容器を排気し、排気速度の測定を行った。結果を図 8 に示す。測定では前年までの排気速度より 13%低下したデータが得られた。これはこれまで検討してきた排気速度 14%低下と同程度であり、予想通りの結果を得たと言える。

次に長時間マイクロ波入射実験時のクライオパネル温度変化を図 9 に示す。図 9 の実験では図 2 の実験時よりもマイ

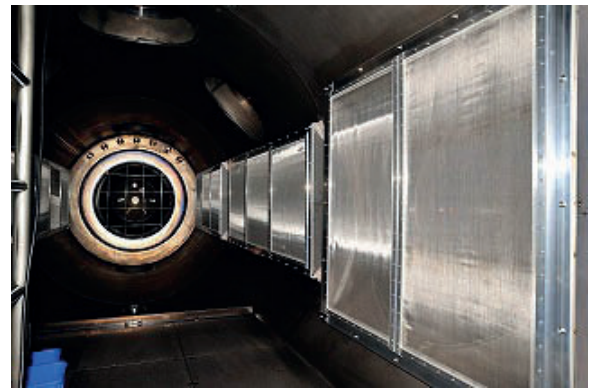


図 7 主排気装置に設置したメッシュ
(排気装置内部より)

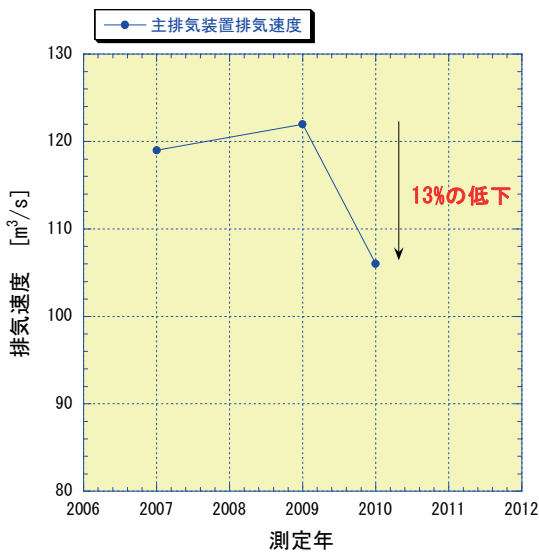


図 8 主排気装置の排気速度測定データ

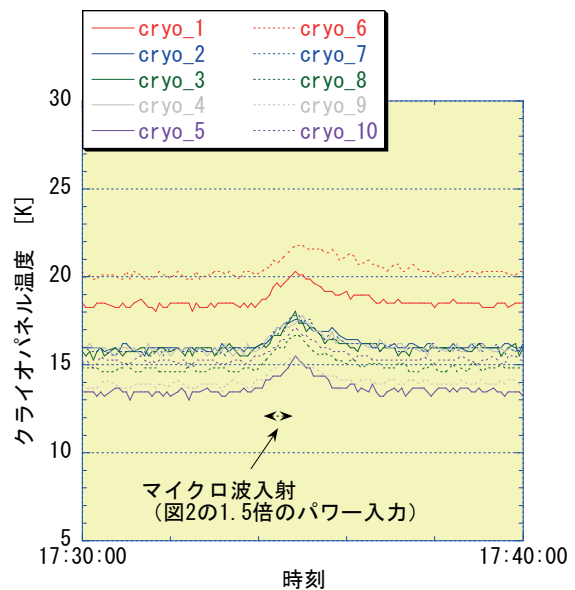


図 9 メッシュ設置後のパネル温度と全圧変化

クロ波入射パワーが1.5倍増えている。それにも関わらずパネル温度の変動が小さくなっており、金属メッシュによる遮蔽が効いていることが分かる。

また懸念された排気速度の低下によるプラズマ実験への影響は、平成23年1月までの段階で確認されていない。

5. まとめ

長時間マイクロ波を真空容器内に入射する実験によって、クライオパネル温度の上昇が観測されていたが、吸気口に金属メッシュを張ることによって、遮蔽することができた。その際に金属メッシュの排気コンダクタンスを推定することでどの程度排気速度が低下するかを予測し、研究者側に提言することができた。また実際に排気速度を測定し、その予測が正しいということも証明できた。

排気速度の絶対的な値の測定は、非常に困難である。しかし、同じ条件同じ方法で測定することによって、排気速度が大きくなった小さくなったといった相対的な評価をすることはできる。今回、排気速度低下の予測が比較的正確にできたのは、これまで同一の方法で測定をして蓄積してきたデータのおかげであり、これからも排気速度の測定は続けていく方針である。

6. 参考文献

- [1] 鈴木直之 : “LHD用真空排気装置における排気速度測定”, 平成19年度核融合科学研究所技術研究会
- [2] 株式会社アルバック 編: 「新版真空ハンドブック」