

液体窒素温度における各種金属面の熱輻射量の測定

小島裕二^A、金子充宏^B、中西功太^C、細山謙二^A

高エネルギー加速器研究機構^A、(株)ジェック東理社^B、総合研究大学院大学^C

1 はじめに

超伝導マグネットや超伝導空洞を収納するクライオスタットや液体ヘリウムを輸送するトランスファーライン等では、断熱性能を向上させるために、室温 300K から 4.4K の液体ヘリウム槽や配管への侵入熱を 80K の熱シールドで遮蔽吸収して断熱する構造となっている。このような液体窒素シールドの設計製作上必要な室温と液体窒素温度間の熱輻射量を敏速に、低コストで高精度な熱輻射測定装置を試作し、真空断熱構造の機器に使用される各種材料表面の輻射特性を測定した。

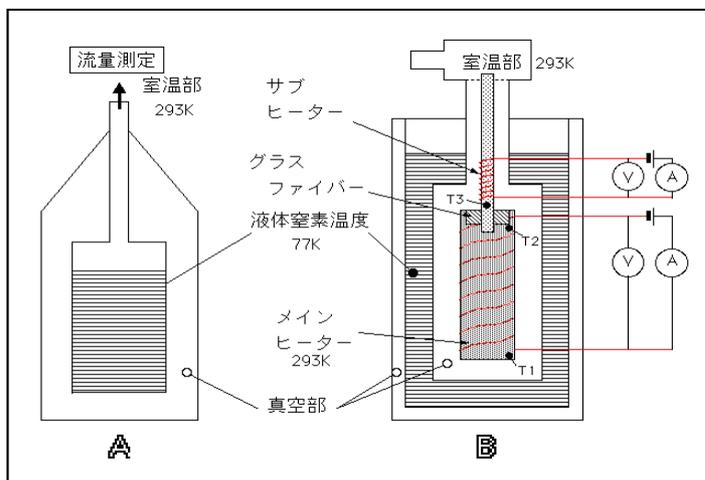


図 1：概念図

2 装置概要

図 1 に本装置の概念図を示す。通常断熱容器やクライオスタット、トランスファーライン等の性能試験の測定では図 1 の概念図 A に示すように液体窒素（寒剤）の蒸発量を測定し気化潜熱等で評価する方法を用いている。この方法で伝導による侵入熱を除いた熱量が輻射による熱侵入量としている。従って、熱輻射量を精度良く測定するためには、測定するクライオスタットやトランスファーラインの容積（表面積）をなるべく大きく必要がある。この A 方式は実機の測定には適しているが、試作として何種類もの仕様で比較測定する場合、コストと時間がかかってしまう。そこで、我々は熱輻射量だけを直接測定できる図 1 の B のような装置を試作してみた。

その測定方法は真空チャンバー内にヒーターを巻いた内筒を設置し、外側を液体窒素で冷却する。その時、内筒（293K）の各温度（熱電対 T1、T2、T3）は輻射により下降する。

そこで、内筒のメインヒーターを焚いて室温を維持させると上部室温部から内筒までの温度差がなくなり、ネック配管の伝導による熱侵入は無視することが出来る。従って、ヒーターの負荷が内筒と真空チャンバー内面間の熱輻射量とみなすことができる。ただし、ネック配管部（T3）も輻射による影響で温度降下がみとめられたのでサブヒーターを設置して室温を保つ機能を追加した。

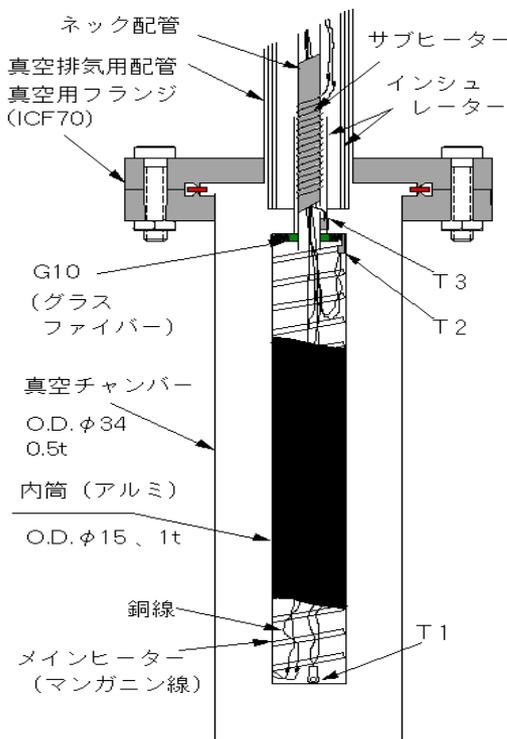


図 2：主要部詳細図

図2に実際に製作した試作機主要部の詳細図を示す。内筒(全長250mm)の外には輻射率の高い黒色耐熱用ペンキ(BL)を塗装し、内面に熱電対(T1、T2)とマンガン線(メインヒーター:121)を螺旋状にアラルダイトで固定している。ネック配管外面にもサブヒーター(31)を巻きT3を設置し、外側にインシュレーターを1層巻いている。真空チャンバーは今回5本用意して5種類の内面処理を行い、そのフランジにはICF(銅ガスケット)を使用して真空チャンバーの脱着を容易にしている。表1に今回測定した真空チャンバー(SUS)内面の処理法を示す。

内面処理法	
BL	黒色耐熱ペンキ
NP	酸洗素地
EP	電解研磨
Cr	クロムメッキ
Au	金メッキ

表1: 内面処理方法

図3に全体構成図を示す。測定はターボ分子ポンプ(TMP)で 1×10^{-3} Pa以下まで室温で排気した後、液体窒素にて冷却を開始する。この時点でT1、T2、T3の温度を保つため、メイン及びサブヒーターに通電し電流(DC Source)を制御して約293Kを保持させる。各温度は0定点(0ポット)で電圧(μ V)を直接3ペンレコーダーで記録し、最終的にはメインヒーターの電流値を $0.1 \sim 0.5$ mA($0.1 \sim 0.5$ W/m²)を上下に変化させた時の各温度(電圧)の平衡度(30分以上)により確認し熱輻射量Q(W)を決定した。

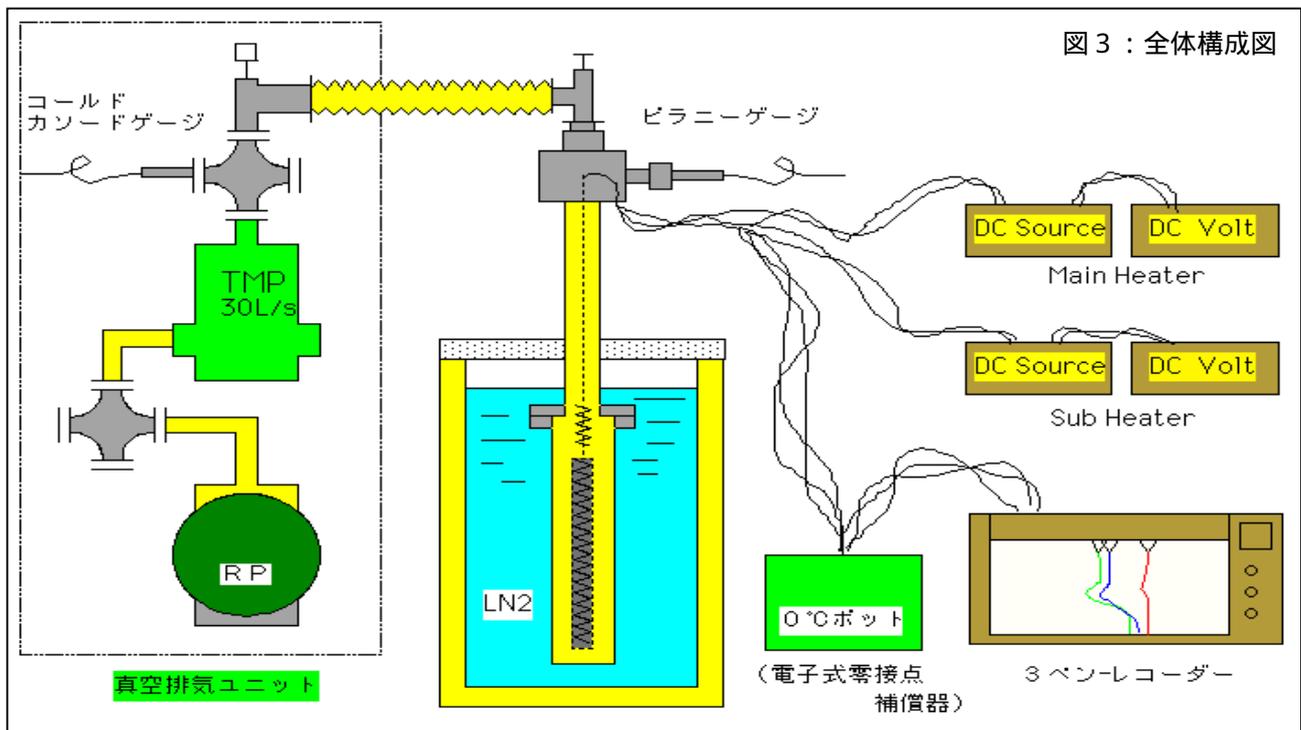


図3: 全体構成図

3 実験及び結果

測定結果を図3に示す。横軸のはメインヒーターの温度を示し、表記の1、2は1、2回目、BLvsAuとは内筒、外面がBL(黒色ペイント)で真空チャンバー内面がAu(金メッキ)を表している。また、縦軸 Q/A_1 の値は単位面積(m²)あたりに変換するため、実際のヒーター負荷Q(W)を内筒の表面積 A_1 (0.0122m²)で

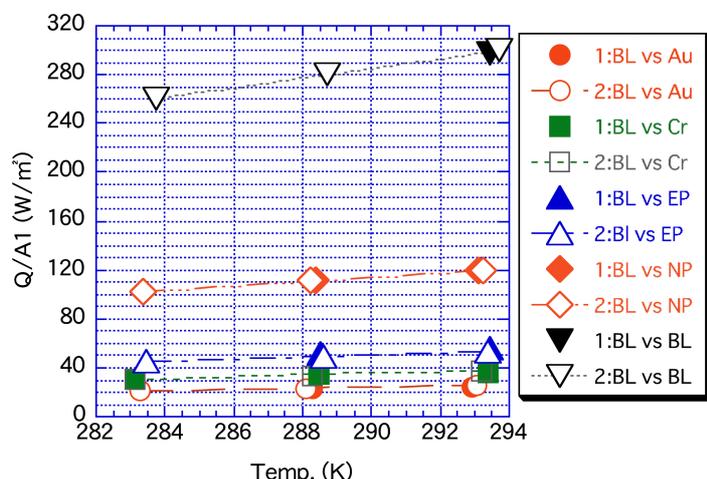


図4: 熱輻射量測定結果

割って表示している。実際には 293K の BLvsBL でも $Q_{BL} = 3.6W$ 、BLvsAu では $Q_{Au} = 0.3W$ 程度の負荷ではない。サブヒーターは更に小さく BL で 0.03W、Au では 0.01W 近辺で熱平衡に達していた。従って、窒素の消費も少ないので液面の変化も少なく、フランジが液面より上に出ない限り測定に影響は無かった。また、熱平衡時の真空度は真空チェンバーと真空ポンプの中間点で $1 \times 10^{-5}Pa$ 以下、室温は 19~23 であった。図 4 の Q の値は我々が知りたかった SUS の酸洗素地 (NP) と各種処理を行ったサンプルとの相対的な差だけでなく、Au と Cr の差もはっきり示している。また、再現性も確認できた。

以上の結果から参考のため放射率 (エミシビティ) の計算を行った。図 5 の様な閉じられた空間内の放射率はステファン-ボルツマンの法則より、熱流速は放射率係数 $=5.67 \times 10^{-8}W/m^2 \cdot K^4$ とすると熱放射量 Q は次式で求められる。

$$Q = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{1/\epsilon_1 + A_1/A_2(1/\epsilon_2 - 1)} \quad (W)$$

ここで、未知数は ϵ_1 と ϵ_2 であるが、BLvsBL は同じ黒色耐熱ペンキを使用しているので $\epsilon_1 = \epsilon_2$ と仮定すると 293K の時、 $Q=3.6W$ であるから BL 面の放射率は 0.75 となる。従って、ヒーターの外側の放射率 ϵ_1 を 0.75 として図 4 で示した各測定結果 (Q/A_1) を代入すると、真空チェンバーの内面の放射率 ϵ_2 を算出できる。

図 6 に BL ($\epsilon_2=0.75$) を除いた結果を示す。

図 4 の Q/A_1 の値は T の 4 乗の項の影響で温度依存性 (傾き) を示していたが、図 6 の各放射率 ϵ_2 は T2 が 77K で一定であるので、T1 (メインヒーター) が 283K から 293K に変化しても一定であった。

放射率 ϵ_2 の計算結果は、この 4 種類の処理法や温度差等の条件によって差異はあり、あくまでも参考では有るが低温工学ハンドブック等の文献値とほぼ一致している。

4 まとめ

本装置は従来の放射率測定のように蒸発ガス量で測定せずに電力で換算するので、簡単で精度の高い測定が行える。さらに、試料の小型化によるスケールメリットが測定時間やコストに非常に有効であると言える。1点測定するにはサンプルのセット及び真空排気に約 2 時間、計測は 1 点 2 時間程度で、計 4 時間で行うことが出来た。

現在ポリエステル系のインシュレーションが一般的に使用されているが、最近、ポリイミドをベースとしたインシュレーションが耐放射線性から注目されている。今後、これらの材質や装着法の差を比較測定して、放射線環境下で使用される高性能クライオスタットやトランスファーラインの設計製作に応用していきたいと考えている。また、上記機器の真空劣化時の熱侵入量の測定も今後測定したい問題である。

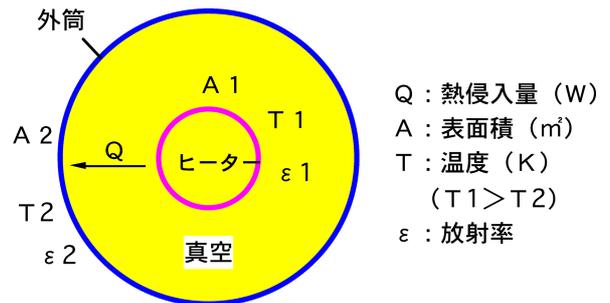


図 5 : 内外面の条件

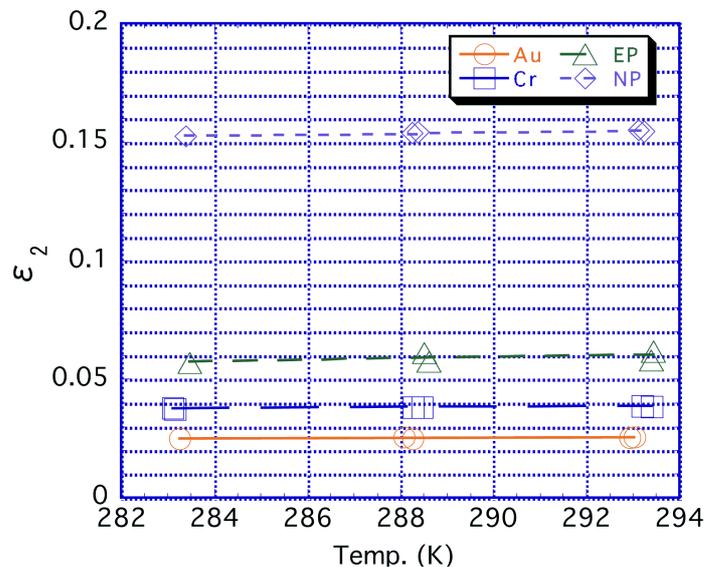


図 6 : 放射率計算結果