

## 超伝導液面計の測定誤差およびフリーズ現象

○結束汐織<sup>#A)</sup>、小島裕二<sup>A)</sup>、中西功太<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

### 概要

KEK 加速器冷凍機グループでは液体ヘリウムを用いて様々な加速器の超伝導加速空洞の冷却を行っている。これらの冷凍設備の冷却には超伝導液面計が多数使用されている。この超伝導液面計は大気圧の4.2 Kの液体ヘリウムや2 Kの超流動ヘリウムで使用する場合、比較的安定して動作する。しかし、液体ヘリウムが超流動に相転移する温度である2.17 K近傍で値が大きく振れたり、大気圧での液体ヘリウム温度である4.2 Kでの使用中に一定の値を表示し続けることがある等の問題が生じる事があり、実験や液面制御に支障が生じ問題となっている。この現象を解決するためにガラスデュワーを用いて再現実験を行っている。

### 1. はじめに

加速器研究施設冷凍機グループは加速器で用いられる超伝導高周波空洞を冷却するため、冷凍機の運転を担当している。主な冷却として、superKEKBの4.4 Kでの超伝導空洞冷却や、ILCに向けた研究開発をしているSTF (Superconducting RF Test Facility)での2 Kでの超伝導空洞の冷却、cERL (compact Energy Recovery Linac)で行う2 Kでの超伝導空洞の冷却がある。

空洞の冷却は長期連続運転をし、その期間は1か月~6か月である。そして長期連続運転中、空洞に入ったクライオスタットの中や液体ヘリウム貯槽に設置されているヘリウム液面計の問題が度々おこる。そこで今回この問題を解決しようとガラスデュワーで再現実験を行った。

### 2. 概要

超伝導空洞冷却時や、長期連続運転中に起きるヘリウム液面計の問題として、液面計のフリーズやλ点付近での液面の計測不能がある。図1、図2はガラスデュワーで現象を再現し取得したデータである。長期運転時に見られる現象が再現できている。問題の1つである液面計のフリーズとは、数分にわたりヘリウム液面が減っている、または増えているにも関わらず計測されずモニターに反映されない現象である。また問題の2つ目であるλ点付近での液面の計測不能とは、ヘリウムが相転移するλ点の前後で計測している液面が振れてしまい正確な値が計測できないことである。

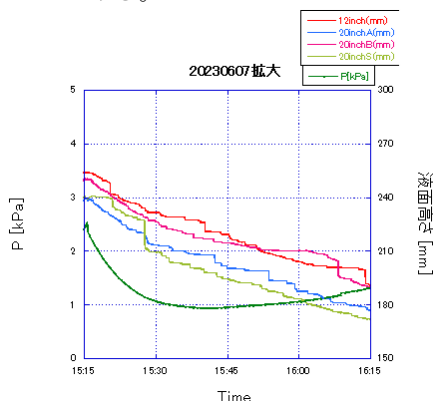


図1. フリーズ現象 (2 K)

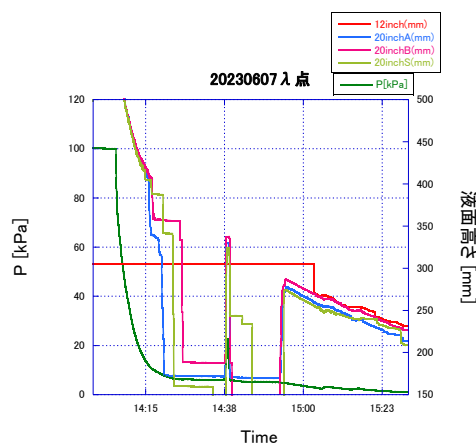


図2. λ点付近の現象

図1、2は減圧を行い2 K付近で得られたグラフである。液面計モニターはUPDATEモードで計測している。図1では4本のセンサーが階段状に液面を示しているのが見える。図2では減圧をし、ヘリウム液が超流動状態へと相転移するλ点付近のデータである。液面の値が連続的に観測できず、でたらめな数字となっている。これらの問題が起きることで、空洞の冷却を液面計制御で行っている際70%にあわせていたものが液面計のフリーズにより実際の液面が計測されず、液面が100%を越えオーバーフローをおこしていたという事案も過去に発生している。このように液面計の問題は我々にとってとても深刻である。

### 3. 実験概要

#### 3.1 実験内容

ガラスデュワーを用いて現象をみながら、オシロスコープにより液面モニターがどのように電流を流しているか電圧を計測し調査する。

#### 3.2 実験機器緒元

実験機器の緒元を示す。

- 液面センサー  
4.5 ohm/cm at 10 K
- 液面モニター  
Model 135,135-2K,136,1700

電流値 2 K:57 mA, 4 K:75 mA  
 いずれも AMI (American magnetic inc) が製作販売しているものである。また、ガラスデュワーで実験を行う際のセットアップを図3に示す。



図 3.実験の様子

中央にガラスデュワー、奥に真空ポンプ、左側に真空計、データロガー、液面モニター、オシロスコープ、右側にヘリウムデュワーがある。また写真外の壁から乾燥窒素、窒素デュワーから液体窒素を供給している。

## 4. 実験結果

### 4.1 伝搬の様子

実験により液面モニターがセンサーに通電した時、電圧が安定するまでの様子をオシロスコープで撮影し伝搬の様子をみた。2 K モニターと 2 K センサー (20 inch) を計測した。

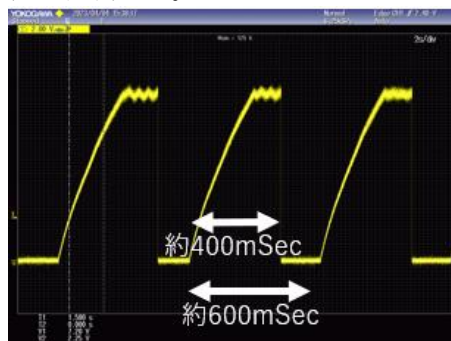


図 4.常流動状態



図 5.超流動状態

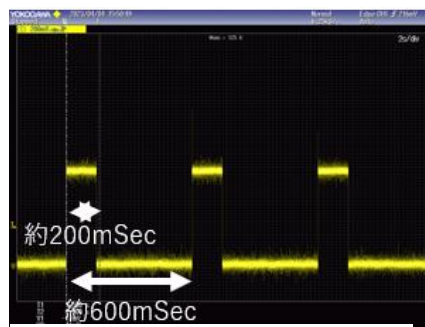


図 6.ダミー抵抗を挟んだ時

図4、5はデュワーに液体ヘリウムが入っており2 K センサー (20 inch) が挿入されているときのデータである。図4ではヘリウム液が大気圧の常流動状態の時計測し、図5はガラスデュワー内の圧力を約3 kPaにしたときの液体ヘリウムが超流動状態の時のデータである。また図6は液面センサーの代わりに10 Ωの標準抵抗を挟み計測した時のデータである。

これより、図4ではフラットになるまで時間がかかっており伝搬速度が遅い様子が見えた。図5では途中から電圧がたち、すぐに一定になっており伝搬速度が速い様子が見えた。このようにセンサーの周りのガス密度等の影響による冷却効果の違いで差が見られた。また図6は10 Ωをセンサーの代わりに接続し測定したものである。ダミー抵抗の時はいきなり電流が通電しているのが見えた。

### 4.2 各圧力での伝搬の様子

各圧力の時の電圧が安定するまでの様子を計測した。今回は4 K モニターと 4 K センサーで計測を行った。大気圧よりポンプで減圧を行った。測定した圧力はそれぞれ60 kPa、30 kPa、5 kPa、3.3 kPaである。

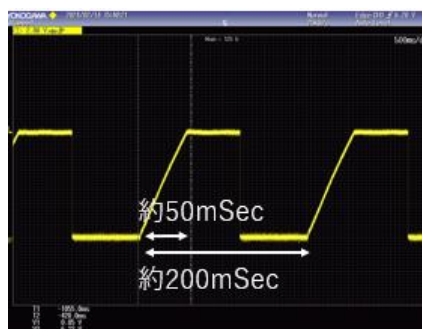


図 7.60 kPa の時

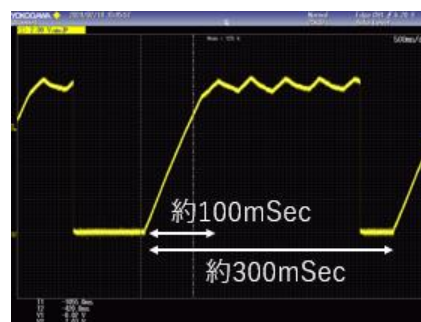


図 8.3.30 kPa の時

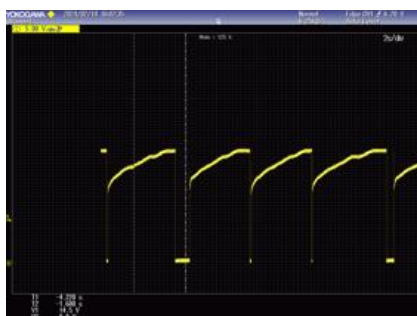


図 9.5 kPa の時

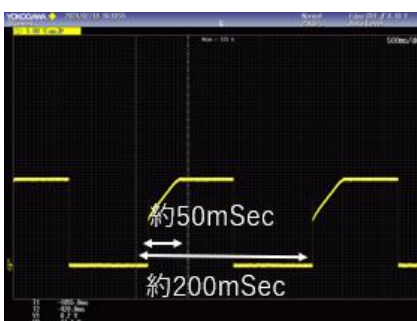


図 10.3.3 kPa の時

各圧力で計測した結果、圧力(温度)の状態によって、伝搬速度に違いが見られた。また液面に到達してから定常状態を保つ時間にも違いが見えた。また図8の30 kPa時点では急激に減圧を行った為、液体ヘリウムの沸騰が激しく起こり、液が波打っていた。また5 kPaの $\lambda$ 点付近では定常状態まで時間がかかり、かつ定常の時間が少ない様子が見られた。

#### 4.3 $\lambda$ 点付近

$\lambda$ 点付近でガラスデュワーを用いて現象を見た。図11のように銅色の4K用のセンサーからヘリウム液が噴き出していた。また赤い2K用のセンサーからは液が噴き出していなかった。



図 11.  $\lambda$ 点付近でのセンサーの様子

## 5. 考察

まず伝搬速度を計測した実験であるが、ヘリウム液面の常流動状態と超流動状態で違いが見られた。だが次に各圧力での時定数を計測すると、必ずしもヘリウム液面の状態によらないことが分かった。これは超伝導線の冷却効果による違いと考えられる。

次に $\lambda$ 点付近での様子では、4K用は流す電流が多いので、局部的に沸騰しているのではないかと考えられる。これにより $\lambda$ 点付近で正確な値が出せていない原因の一つと思われる。

また2Kセンサーは図11で液が噴き出していないが、 $\lambda$ 点付近で液面計の値が乱れるときはある。よって次回はオシロスコープで撮影を行ってみたいと思う。

## 6. 今後の予定

フリーズ現象の解決としてセンサーやヘリウム液がどのような状態の時、伝搬速度が変化するかを計測し、電流とフリーズとの因果関係を調査する。また空洞冷却時の長期連続運転を再現することとして、実際の空洞冷却では空気のリークが起きていると考え、ガラスデュワーに空気のリークを発生させ液面計のフリーズをおこすかを調査したいと考える。

次に $\lambda$ 点付近での計測不能の解決策として、 $\lambda$ 点付近では液体ヘリウム中のセンサーが常伝導になり発熱していると考え、センサーへ流す電流の最適値を調査することがある。これは動的に電流を変化させる方法を考える事、また蒸気圧に応じた最適な電流値を探すことなどがある。超伝導線の冷却効果をあげる方法として液面センサーのカバーの径を変えること、液面センサーのカバーの穴を増やすことといった方法も考えられる。