

I L C用加速空洞の冷却試験その2

(温度測定に関して)

○近藤良也^{A)}、大内徳人^{B)}、小島祐二^{B)}、可部 農^{B)}、仲井浩孝^{B)}、中西功太^{B)}

原 和文^{B)}、細山謙二^{B)}、野口隆志^{C)}

^{A)}高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所

^{B)}高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

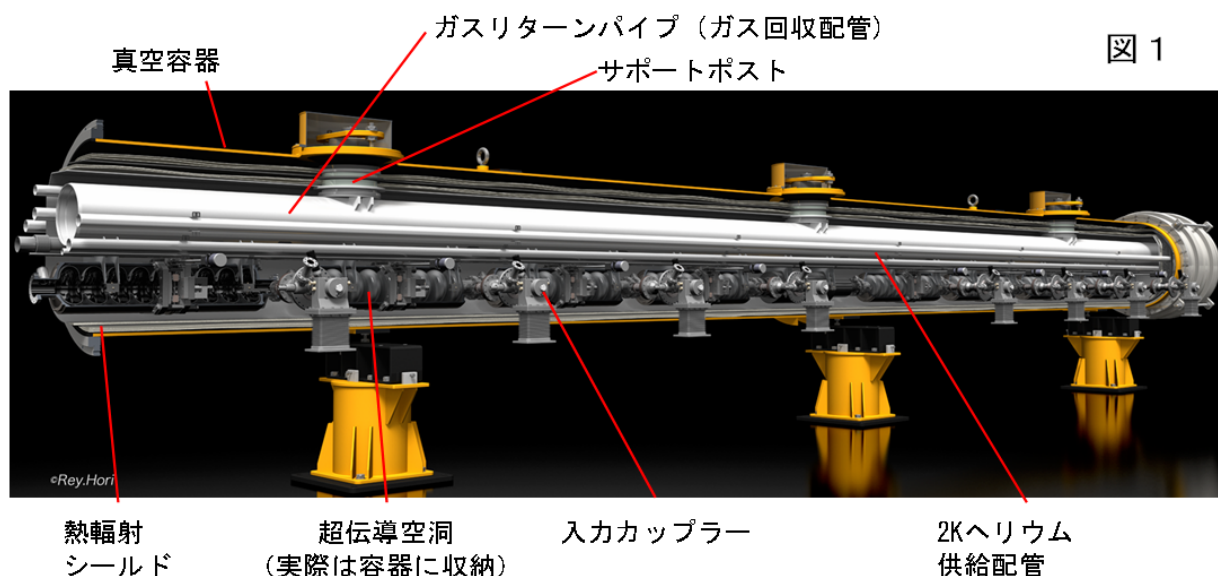
^{C)}池上技術

1 はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) においては線形衝突型加速器 (International Linear Collider : ILC) の各種要素開発が行われている。ここではそのひとつであるクライオモジュールの概要及び、空洞容器の温度測定、特に温度計素子の実装上について述べる。クライオモジュール内の空洞は、2 Kの超流動ヘリウムによって冷却される。超伝導空洞が性能を発揮するには、空洞の十分な冷却とその保持を必要とするため、正確に温度を把握することは極めて重要である。

2 I L Cクライオモジュールの構造

ILCで使用予定のクライオモジュールは、第1図に示す通り9セル超伝導空洞が8台内蔵され、入力カップラー及びチューナー、冷却機器等の構造物を真空容器に組込んだものである。



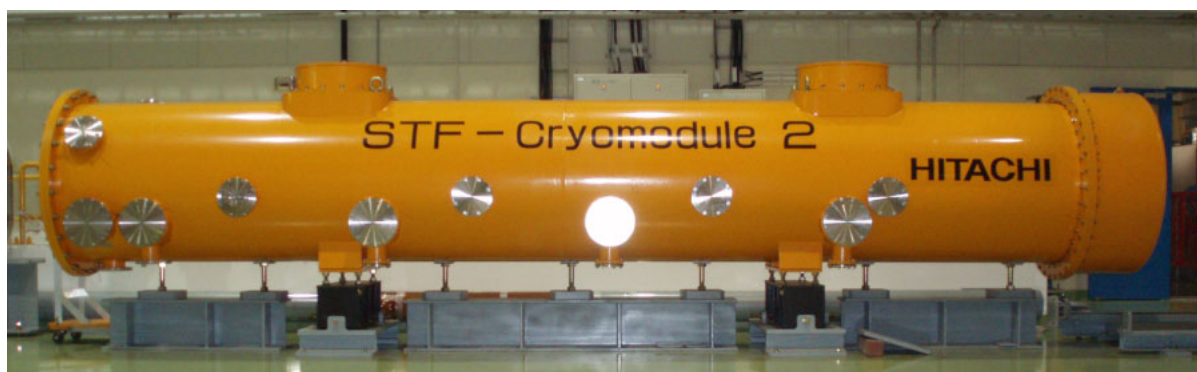
第1図： I L Cクライオモジュール

空洞の内部構造物は80 Kのシールドと5 Kのシールドの内側に納められ、真空容器 (鋳鉄製で磁気シールドを兼ねる) からサポートポストを介して全体が吊下げられている。ガスリターンパイプは空洞を保持する役目も負っており、空洞は容器中に格納され、2 Kの超流動ヘリウムが空洞を冷却し超伝導状態が保持される。

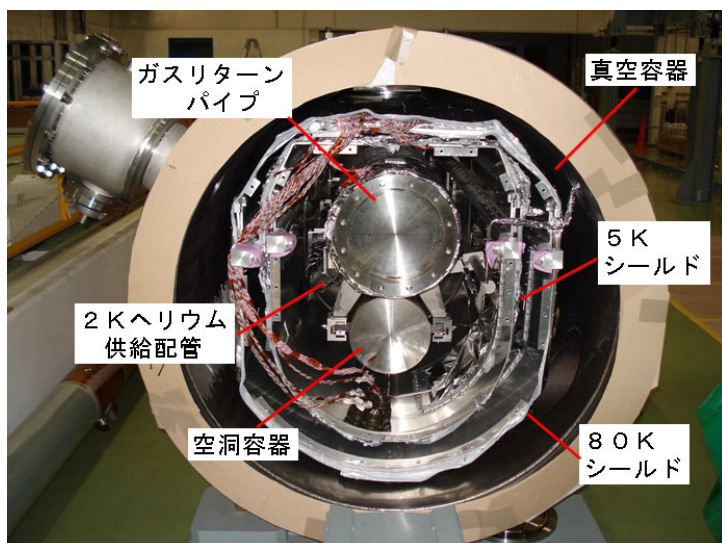
3 試験用クライオモジュールについて

性能試験用のクライオモジュールは、実機より規模が小さく、直径1m・長さ6mで空洞を4台吊下げるものである。またサポートポストは2箇所、一端を固定し、もう一端をスライド構造とし、低温時における内部機器の熱収縮に対処している。空洞容器もローラーベアリングによるスライド機構が設けられ軸方向の熱収縮力から逃れる構造となっている。

試験用クライオモジュールはA, Bの2台が製作され、モジュールAは、ほぼ実機に近い架装状態で各種の試験が行われ、モジュールBは、熱侵入量等、温度測定試験用で、空洞とカップラー、高周波ケーブル等が省かれている。図2に試験用クライオモジュールの外観を、第3図、第4図に内部の機器架装状態を示す。



第2図：クライオモジュール（B）外観



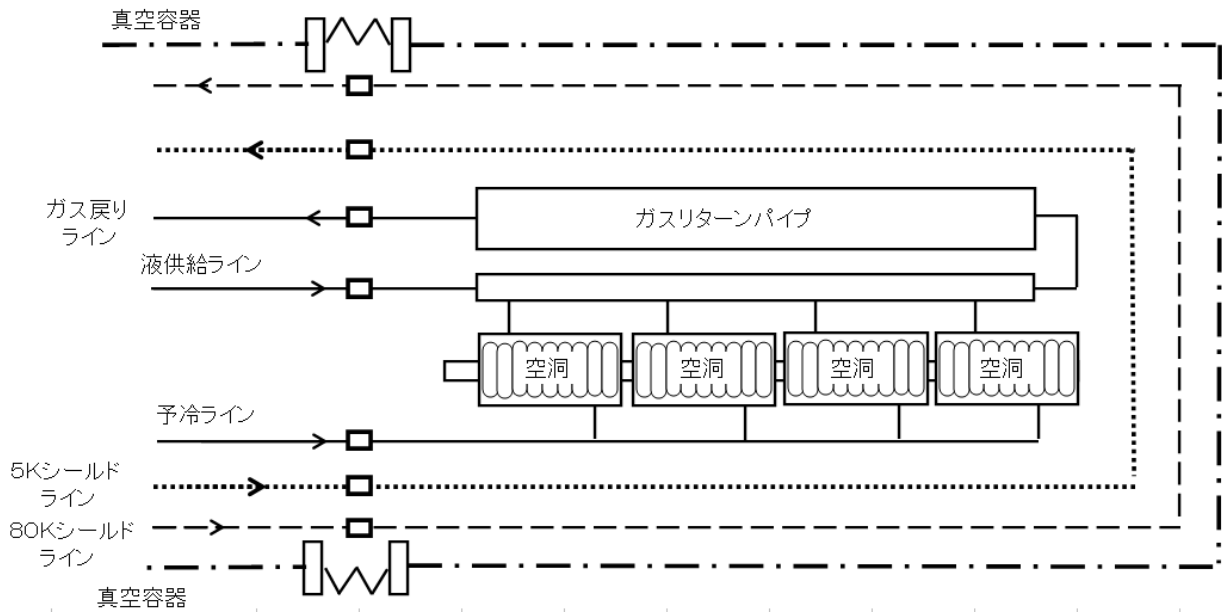
第3図：内部写真



第4図：内部機器架装状態

4 冷却フローについて

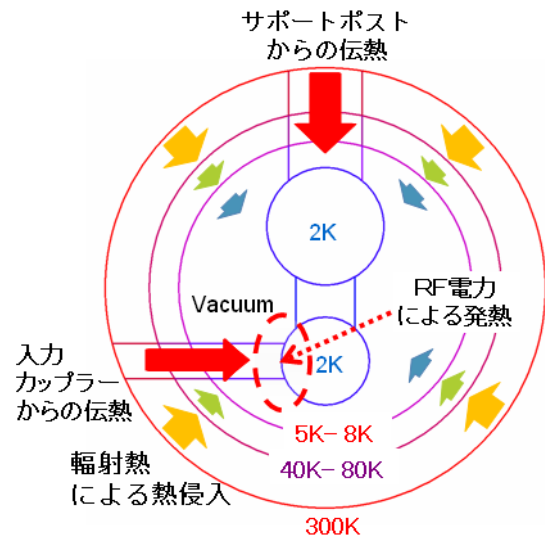
第5図にクライオモジュールのフローを示す。冷却はまず、4 Kの液化ヘリウムを空洞容器下部の予冷ラインへ送り込み、空洞容器を4 Kまで冷却し、容器内が液で満たされた後、減圧を開始し、クライオモジュールへ超流動ヘリウムを供給する。空洞容器は冷媒供給ラインに並列に接続されており、コールドボックスから供給される超流動ヘリウムは、超流動流体のもつ性質により各空洞容器に落下し分配される。



第5図：クライオモジュールフロー図

5 クライオモジュールへの熱侵入経路

クライオモジュールへの熱侵入経路について第6図に示す。外部からの侵入熱は、①外部からの輻射熱、②サポートポスト、入力カップラーからの伝熱であり、それに③運転時のRF電力によるカップラーからの発熱が加わる。このうち①輻射熱に対しては5Kと80Kの輻射シールドを設ける事によって、②サポートポスト、入力カップラーからの伝熱と、③RF電力による発熱は、5K 80Kシールドにそれぞれサーマルアンカーを取り対処している。5K、80Kシールドは上下に二分割されており、冷却配管がそれぞれのシールド板に溶接されている。クライオモジュールの熱侵入量は、2K：0.8W、5K：11.1W、80K：41.1W（定常時）が得られている。

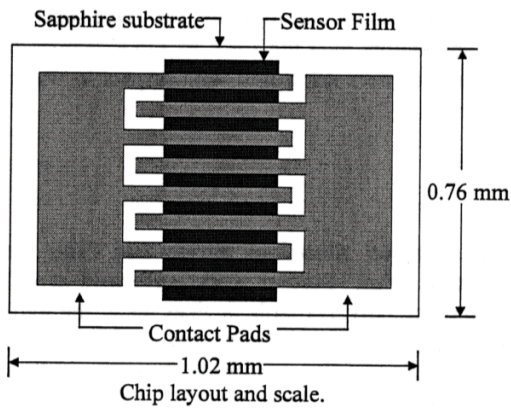


第6図：熱侵入経路

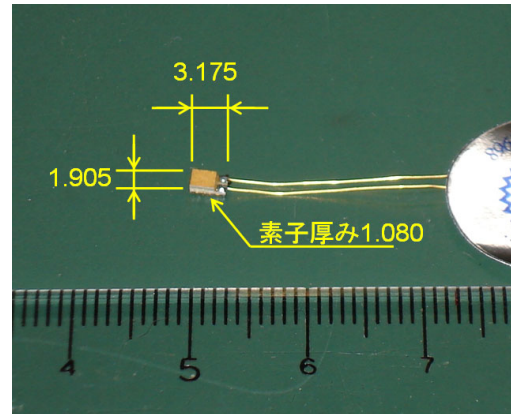
6 温度計について

温度の測定には主にセルノックス抵抗温度計を用いた。セルノックス抵抗温度計は、サファイア基板上にジルコニウム等の窒化物を蒸着し、薄膜を形成したものを測温抵抗体としたもので、負の温度係数を持ち、低温領域の感度が高い、磁場による誤差が少ない、測定温度範囲が広い(100mK~420K)、放射線の影響を受けにくい等、カーボン抵抗温度計等には無い特徴を有している。セルノックス温度計は個体差があるが、2Kでおおよそ1KΩから2KΩ、1.4Kで数KΩの抵抗値を示す。実際にはセルノックス抵抗温度計のみで全ての温度領域をカバーできないので、同位置に白金コバルト温度計を取付け測定している。また、この測定では温度計素子への通電電流を10μAとした。第7図、第8図はセルノックス温度計

内部の素子構造と外観である。



第7図：素子構造（参考文献〔2〕参照）

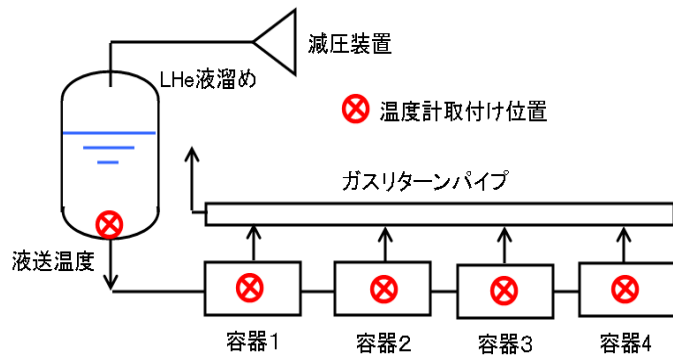


第8図：温度計素子外観

7 モジュールAでの測定結果

クライオモジュールの性能試験は、まずモジュールAから行われた。モジュールAは実機とほぼ同様な内部機器の架装がなされており、低温関係の試験のみならず、各種性能試験に供された。

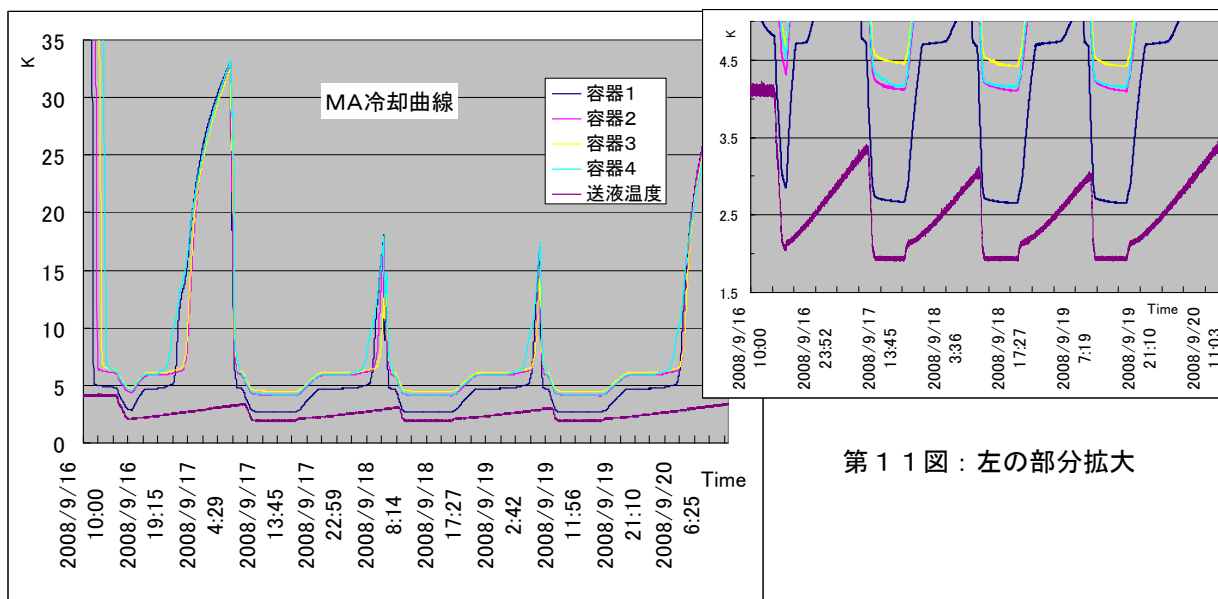
冷却試験を行った冷却パスの概略を第9図に示す。



第9図：冷却パス

液溜めから2 Kの超流動ヘリウムが容器1～容器4の各々の空洞容器内部に流れ込み、空洞を冷却・超伝導状態を維持する。セルノックス温度計は液送り部とそれぞれの容器胴部に取付けられている。冷却の1例を第10図に示す。（2008年9月16日から9月20日の冷却曲線。）

セルノックス温度計は液送り部とそれぞれの容器胴部に取付けられている。冷却の1例を第10図に示す。（2008年9月16日から9月20日の冷却曲線。）



第11図：左の部分拡大

第10図：モジュールA冷却曲線

080917 18:00	送液温	容器 1	容器 2	容器 3	容器 4
セルノックス	1.95	2.67	4.12	4.46	4.17
Pt-Co	—	2.81	2.24	2.43	2.95

表 1：2008年9月17日 18：00の測定値（K）

冷却試験の結果、送りの液温度が1.95 Kであるにもかかわらず、セルノックス温度計は表 1（冷却曲線中における‘08/09/17 18：00のデータからセルノックスとPt-Coについて記したもの）に示す様に、同位置に取付けたPt-Co温度計よりも高い値を示している。第 11 図は第 10 図の拡大である。これから温度が落ち着かず安定した状態ではないことが判る。

8 不具合の原因として考えられるもの

モジュール A の温度計測不具合は、セルノックス温度計素子の実装状態に起因すると考えられ、原因として、

- ① 温度計保護のため、素子全体をカプトンテープで包んでいた。
- ② アピエゾングリースの塗布状態が適切でなかった。（グリース層が厚い）
- ③ 素子取付けのアルミテープの貼付けが良好でなく素子が浮いていた可能性がある。
- ④ 表面汚れ等により、素子と取付部表面との熱伝導が悪化した可能性がある等。

これらが相互に影響し不具合が発生したものと推察された。モジュール A での冷却試験は一旦終了したので、続くモジュール B の冷却試験にこの結果を反映させ、確実な測定を期する事とした。

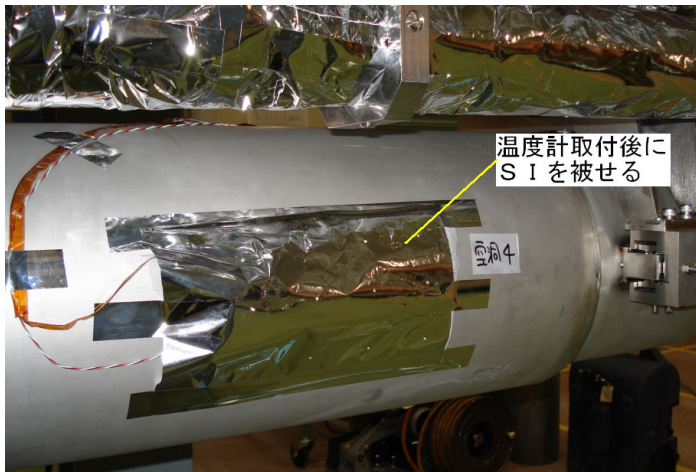
9 モジュール B の温度計実装について

モジュール B は、各部熱侵入量や熱収縮による変位の測定に供される目的で製作された。モジュール A での経験を踏まえ、モジュール B の冷却試験においては、セルノックス温度計の取り付け方法を見直し、確実に温度測定が行える様に以下の改善策を講じた。



第 12 図：素子取付状態

- ① 空洞容器胴部に温度計素子取付ブロック（材質は容器と同質、取付面は平滑）を溶接し、ブロック表面に温度計を取付けた。（第 12 図）
- ② 施工後に温度計全体を S I で覆った。（第 13 図）



- ③ 温度計素子、及び取付表面の洗浄を十分に行い、脱脂、塵埃を除去した。
- ④ 素子の取付部表面を可能な限り平滑にした。
- ⑤ アピエゾングリースを薄く均一に塗布し、取付後はみ出した余分なグリースを除去した。
- ⑥ アルミテープに十分な貼付け面積を確保し、素子を確実に取付部表面に密着させ貼付けた。

第3図：S Iによる素子の被覆

モジュールBでの素子実装上の留意点は、温度計素子への熱侵入を抑え、また温度計との熱接触状態を良好に保つ事である。なお温度計素子リード線のサーマルアンカーについては、モジュールAでの施工方法に問題は無いと判断し、その処理はモジュールAと同一とした。また冷却パスはモジュールAと同じものである。

10 モジュールBでの測定結果

モジュールBの測定結果を第14図に示す。容器2のデータが一部飛んでいるのは、ノイズによるものである。表2は2009年4月21日15:00の測定値を示したものである。送液温度はモジュールA冷却時と同じ1.95Kである。

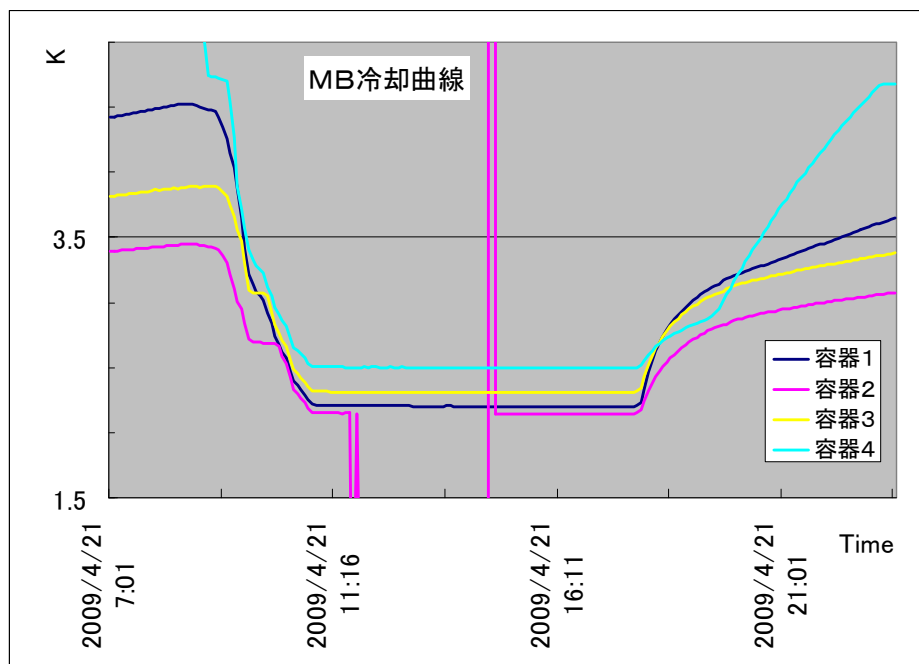


図14：モジュールB冷却曲線

20090421 15:00	送液温度	容器1	容器2	容器3	容器4
セルノックス(K)	1.95	2.19	2.14	2.31	2.49

表2：2009年4月21日 15：00の測定値（K）

モジュールBの冷却試験においては、モジュールAの温度測定時のような送液温度との大きな温度差は生じておらず、良好な測定結果を得ることが出来た。測定データでは送液温度と容器温度との間に平均約0.3K程の温度差があるが、送液温度は液温そのものであり、容器1から4は容器の外表面温度を測定しているために生じた差であると考えられる。また現状において容器間の温度勾配に逆転（容器1より容器2の温度のほうが低い）が生じており、温度計のエラーか装置特有の性質なのか明確ではない。同様な現象はモジュールAにおける冷却試験の際にも見受けられた。

1.1 まとめ

クライオモジュール内の空洞は、2Kの超流動ヘリウムによって冷却される。この温度領域では温度計素子の実装状態に測定精度が左右されるので、測定を行う際には、通常のヘリウム液化機等の低温機器ではあまり問題とされない点についても、細心の配慮と慎重な施工を行う必要がある。

今回はモジュールAの冷却試験に続き、モジュールBの温度測定において、空洞容器という限定された範囲ではあるが、一応の改善をみて満足できる測定結果を得る事が出来たが、例えば細管やケーブル表面、流体中の温度測定方法等には課題が残る。これらについては、さらに検討を加えて試験を重ねる必要があると考える。今回の経験を生かしてILCにおいて予定されている装置試験に備え、測定精度の更なる向上を目指したい。

1.2 謝辞

今回のモジュールBの温度測定を行うにあたり、実装上の様々なテクニックについて、池上技術の野口隆志氏に多くのご教示を頂きました。厚くお礼申し上げます。

1.3 参考文献

- [1] Norihito Ohuchi Fundamentals of Cryomodule SRF2009 Tutorial Program 2009/9/19
- [2] S. S. Courts & P. R. Swinehart STABILITY OF CERNOX RESISTANCE TEMPERATURE SENSORS
CEC/ICMC 1999 July 12-16 Lake Shore Cryotronics, Inc.
- [3] レイクショア温度センサー使用の手引き 13/Jan 2000 日本語版 Rev. A