

cERL 主空洞冷却モジュールにおける冷却時の空洞位置変位測定

所属：KEK 加速器研究施設 第7研究系 篠江 憲治
kenji.shinoc@kek.jp

はじめに

次世代放射光源である ERL（エネルギー回収型ライナック）を実現するための、関連技術開発や技術実証のために、小型で低エネルギーのコンパクト ERL（cERL）を建設している。cERL は 2012 年に、入射部の建設を行い、2013 年度から入射部でのビーム試験を 5 月末まで行った。その後周回部の建設を行い、2013 年 11 月までに周回部の建設が終了し、2013 年 12 月現在で周回部のビーム試験を行っている。私が携わる、主加速空洞は、2012 年に冷却モジュールへの組み込みを行い、2012 年 11 月から冷却試験を経て高電力試験が実施された。本報告では、冷却試験時において、主空洞冷



図・1 cERL 配置図（上）と周回部写真（下）2013 年 11 月でマグネットの設置、真空チャンバー据え付け、排気が完了し、周回部ビーム試験を待つ状況。

却モジュール内部に格納設置された空洞、その他機材の熱収縮による、空洞位置変位測定を行い、空洞中心の変位による設置誤差を評価したので報告する。

2・空洞変位量の測定

1...主空洞アライメントについて

まず、空洞変位量の測定に入る前に、空洞アライメントの方針について述べる。

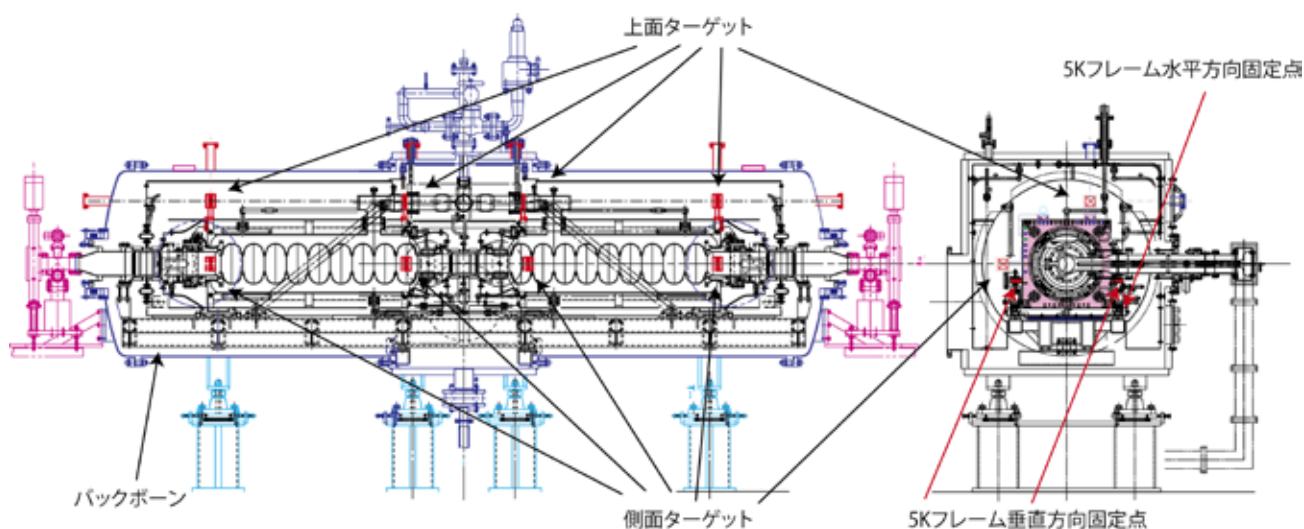
空洞の設置精度としては、ビームダイナミクス G_r からの要望で、空洞中心の設置誤差を $\pm 1\text{mm}$ 以内に納めることになっている。なので、本来なら空洞中心を位置決めし固定が行えれば、冷却時における温度変化の場合でも、空洞中心が固定されて、周りが伸縮するので空洞中心はずれないのであるが、空洞中心には何もない（何もないから空洞なのである。）よって空洞中心を固定して位置決めするのは不可能である。そこで、空洞エンドプレートと呼ばれる、空洞エンドセル外側に取り付けられる円形のディスク中心と空洞中心が合うように製作を行い、最終的にはエンドプレート中心とビーム軌道が一致するように空洞を組み立ててモジュール内に納めた。

2...主加速部超伝導空洞クライオモジュール

図2に主加速部超伝導空洞のクライオモジュールの側面図及び正面図を示す。主空洞冷却モジュール内には2台の9セルキャビティが納められている。また、空洞の前後にビームパイプ型のフェライト **HOM** 吸収体が置かれ、有害な **HOM** に関しては、**HOM** 吸収体で吸収する¹⁾。空洞は、液体ヘリウムの配管の役目も果たす、5K フレームと呼ばれるチタン製のフレームに固定されており、このフレームに空洞を設置すれば、空洞中心とフレーム中心が一致するように設計製作されている。5K フレームにはその上部と側部に、空洞1台につき2台ずつの光学ターゲットが取り付けられており、このターゲットをモジュールの外側から計測することで、ターゲットの変位量を測定し、この値を空洞中心の変位に換算し評価した。空洞フレームは、G10製の取り付け治具を介して、バックボーンと呼ばれる、空洞アライメントの基準になる剛性の高いフレームに取り付けられている。5K フレームの固定点を図2に示す。

3...空洞位置変位測定

5K フレームに取り付けられる光学ターゲットは上部、側部とも、それぞれの中心が1直線になるように設計製作されている。また、モジュールに納める前に、それぞれが1直線上に並んでいることの確認がレーザートラックを用いて取られている。モジュール内に納められた後に、それぞれのターゲット中心の延長線上にアライメントテレスコープを置き、4箇所のターゲット中心を繋いだ直線と、アライメントテレスコープの中心軸が一致していることを確認した後、



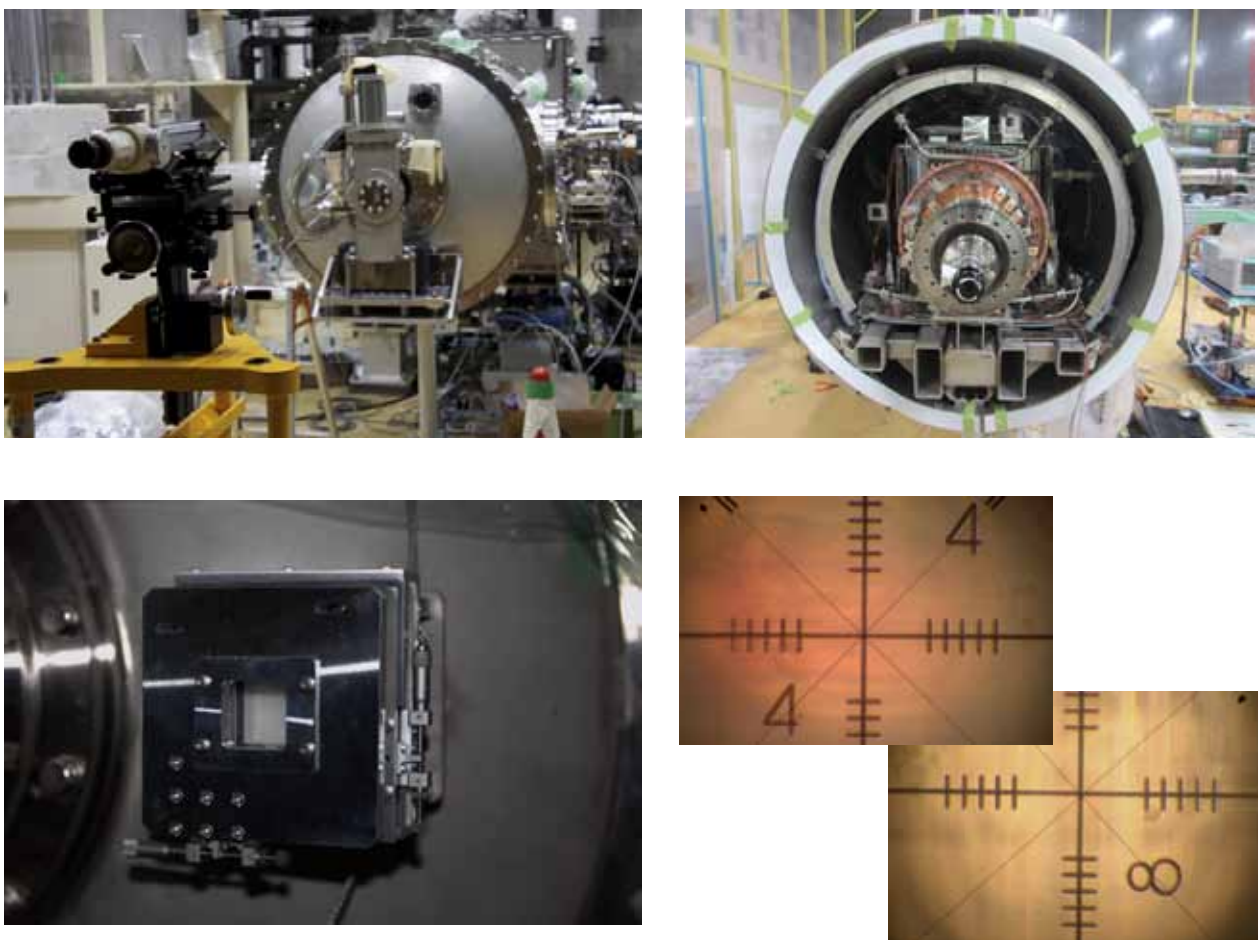
図・2 主加速部超伝導空洞のクライオモジュールの側面図及び正面図

冷却モジュール断熱真空槽上下流に取り付けられた真空用窓に、中心を写す。真空窓には水平垂直方向に微調整機構を備えたターゲットを取り付けて、中心を写し易くしてある。中心を写した後は、ターゲットに取り付けられた微調機構をロックすることで、不用意なターゲットの移動を防いでいる。これら外部のターゲットは、常に室温であるので、内部ターゲットの中心を写しておけば、内部が冷却されて熱収縮によりターゲットの位置が移動した場合でも、外部の基準からその変位量を測定することが出来るようになる。なお、使用したアライメントテレスコープはテーラーホブソン社の物を用いた。このスコープは、スコープ内にクロスした2本の線が写され、この線はそれぞれ独立に、

調整つまみを回すことで動かすことができ、そのつまみには目盛りが表示してあるので、移動した量をその目盛りで読むことができる。この機能を用いて、スコープ中心とターゲット中心のずれを読み取り、このずれを、室温からの位置の変位量として測定を行った。

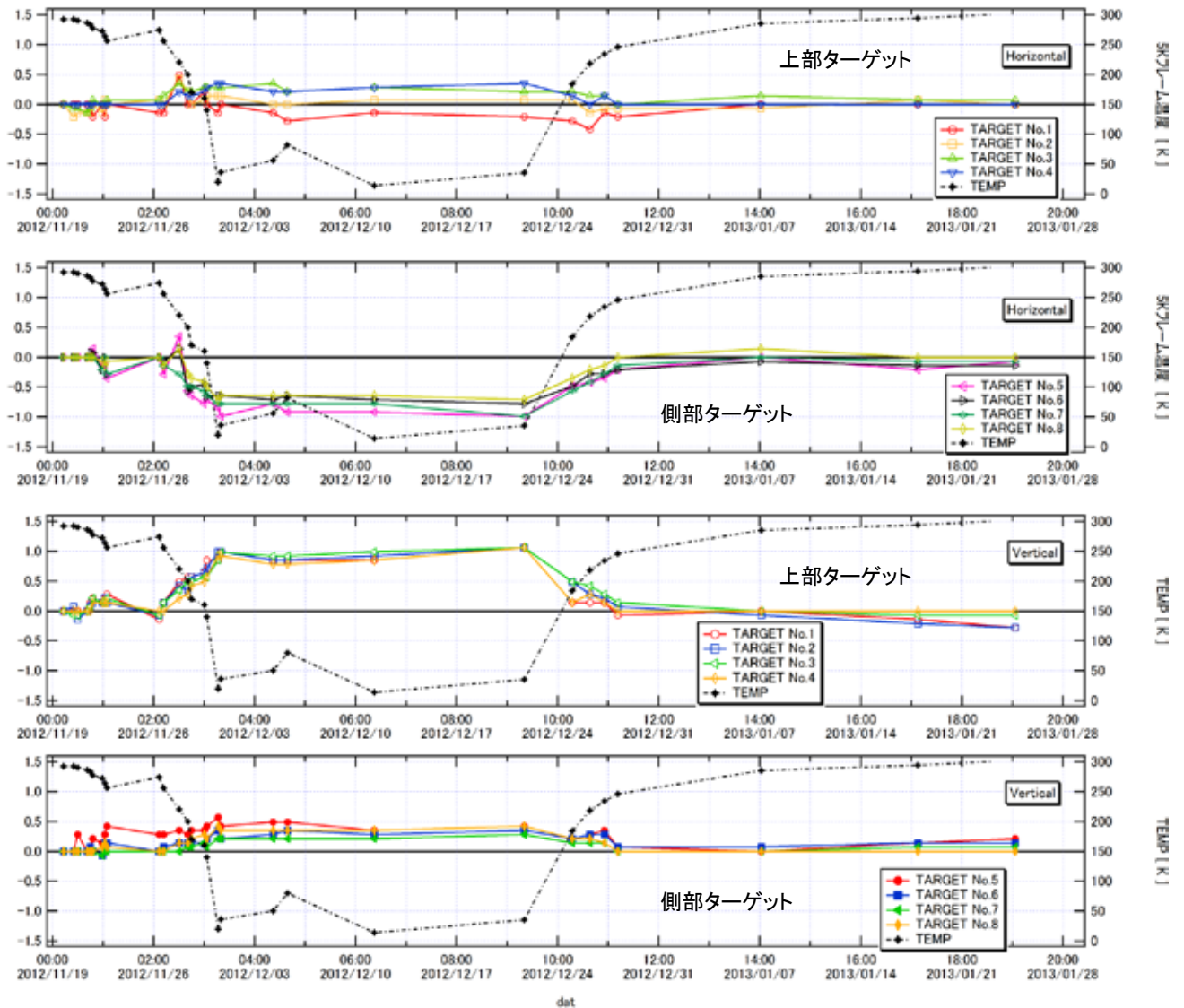
4....空洞変位量測定結果

5K フレームに取り付けられた、ターゲットの変位量を測定した結果を図3に示す。この図のaは水平方向の変位を上部ターゲットで測定した結果、bが水平方向変位を側部ターゲットで測定、cが垂直方向変位を上部ターゲットで測定、dが垂直方向変位を側部ターゲットで測定した結果である。図の横軸は日付(時間)であり、縦軸はターゲットの移動距離をmmで表示している。水平方向の変位を測定したグラフでは、縦軸マイナスの方向が入力カプラ側の方向であり、この方向に固定点がある。垂直方向の変位測定グラフでは、縦軸プラスの方向が下側の向きであり、固定点は中央よりやや下側となっている。水平方向の変位では上部ターゲットではあまり反応がないようであるが、側部ターゲットで



図・3 a：変位量測定 b：測定用光学ターゲット
c：室温ターゲット d：スコープでターゲットを見た図

ターゲットの移動量(+)が冷却機側 単位は: m



図・4 空洞変位量測定結果。水平方向ではカプラ側(固定点側)がマイナス、垂直方向では下方向(固定点側)がプラスになっている。

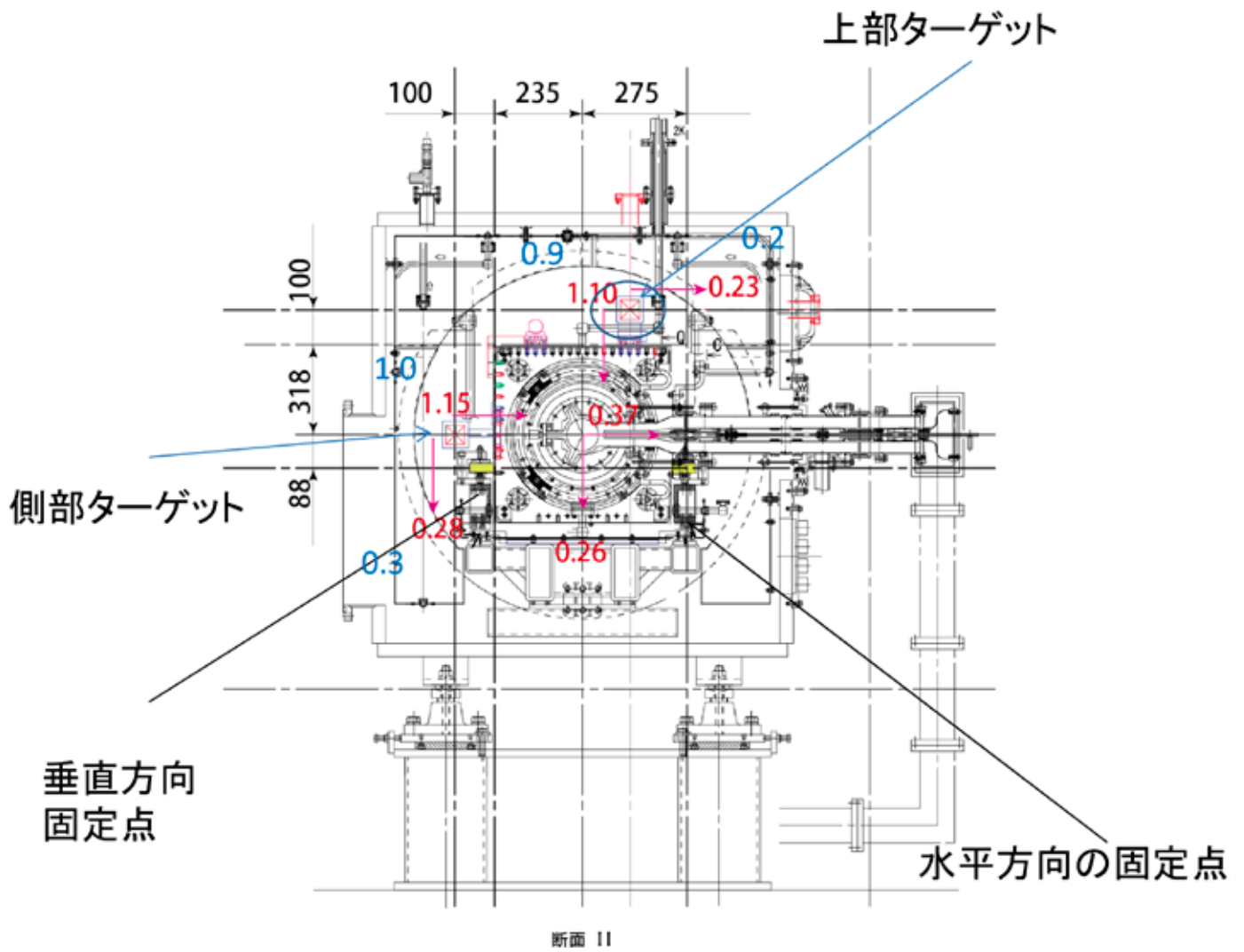
は 5K への冷却に合わせてターゲットが入力カプラのある方向に大きく移動している。垂直方向では側部ターゲットがあまり反応していない代わりに、上部ターゲットが 5K への冷却に合わせてターゲットが下がる方向に大きく移動している。

これら測定によって得られた結果と、図2に示されている、ターゲットの位置と 5K フレームの固定点を検討してみると、上部ターゲットは水平方向固定点からの水平距離が短い。垂直方向でみれば、垂直方向固定点からの距離は長くなっている。温度変化に伴う収縮や膨張では、固定点からの距離が短ければその大きさは小さく、固定点からの距離が長くなればその大きさは大きくなる。また、これらの変化が温度変化の大きいところで顕著に起きていることを考慮すると、測定結果は、温度変化に合わせた収縮量が測定できているといえる。

次に上部、側部ターゲットが 5K フレーム冷却時にどの程度収縮するかを計算によって求めてみた。計算では 5K フレームやターゲットの材質、5K フレームとバックボーンとの、接続部の構造を考慮して求めた。

それぞれのターゲットについて、計算によって求められた変位量と、測定によって得られた変位量を表・1に示す。

この表から、計算値と測定値はよく一致している。ターゲットの変位を求めたのと同じ手法で、今度は空洞中心につ



図・5 測定結果と計算値の比較
青が測定値、赤が計算値

表・1 測定結果と計算値の比較

上部ターゲット	水平方向変位量	垂直方向変位量
計算値	0.23mm	1.10mm
測定値	0.2mm	0.9mm
側部ターゲット	水平方向変位量	垂直方向変位量
計算値	1.15mm	0.28mm
測定値	1.0mm	0.3mm

いても同様の計算をした。その値は、水平方向に『0.37mm』、垂直方向に『0.26mm』の値が得られ、ターゲットについて計算値と測定値がよく一致していたので、空洞中心の変位量を計算で求めた結果は、実際の変位量と一致していると考えられる。

空洞に要求されている設置誤差の大きさは、± 1mm 以内であり、この値をアライメントと冷却による変位とで半々に分けているので、冷却時における変位を± 0.5mm 以内を目安にしており、ここで得られた値、水平方向 0.37mm、垂直方向 0.26mm は冷却モジュールに要求される要件を満たしているといえる。

3...まとめと今後

cERL 主加速部の cryomodule を建設し、2K までの冷却試験を行った。冷却時における空洞中心の変位量を、空洞 5K フレームに取り付けた光学ターゲットの変位量を測定することにより、ターゲットの変位と計算から求めた。得られた値、水平 0.37mm、垂直 0.26mm は、目標としていた変位量± 0.5mm 以内に収まっており、要求を満たしている。

年末に cERL でのビーム試験を予定しており、その準備を行っている。

4...参考文献

[1] R. Hajima et al. (ed.), KEK Report 2007-7/ JAEA-Research 2008-032 (2008) [in Japanese]

[2] S. Sakanaka et al., "Progress in Construction of the 35-MeV Compact Energy Recovery Linac at KEK", in these proceedings, WEPWA015

[3] M. Sawamura et al., "Cooling properties of HOM absorber model for cERL in Japan", SRF'2011, Chicago, July, 2011, p.350(2011)