

## 1. はじめに

ILC 用クライオモジュールは、8 台の超伝導空洞、各空洞に取付けられた入力カップラー及び周波数チューナ、超伝導 4 極磁石及び冷却機器を真空容器に格納したもので、1 個の完成された加速器コンポーネントに組み上げたものをいう。現在、ILC 用に検討されているクライオモジュールの最終的な設計は存在しないが、その構造に於いて最も近い形を持つものが DESY-TESLA 用に開発されたクライオモジュールである。本稿では、2 章で TESLA 用クライオモジュールを構成する主要部品について述べ、3 章でクライオモジュールの冷却に関する事項について解説を行う。4 章では本稿のまとめとして、今後 ILC クライオモジュールを設計していく上で改良が期待されるパラメータについて述べる。

## 2. クライオモジュールの構成

### 2-1 クライオモジュールのコンポーネント

クライオモジュール真空容器内に組み込まれているコンポーネントは、超伝導空洞及びその液体ヘリウム容器、入力カップラー、周波数チューナ、4 極磁石及び補正コイル、ビームポジションモニター、及びこれらの機器を低温 (2K) に保持する為の冷却機器である。図 1 に TESLA-TYPE-III クライオモジュールの断面図<sup>[1]</sup>を示している。真空容器としては、外径が 965.2mm の鉄製のパイプが用いられている。超伝導転移前の空洞周辺の外部磁

場は、空洞が超伝導転移後トラップされ空洞の性能劣化の原因となる為、鉄製の真空容器は超伝導空洞にとって磁場遮蔽の機能も持っている。真空容器の内部には外側から中心に向かって 80K 熱輻射シールド板とその冷却配管、5K 輻射シールド板と冷却配管が配置され、5K の輻射シールド板内部には超伝導空洞ヘリウム容器、2K 飽和蒸気圧液体ヘリウム供給配管、内径 300mm の蒸発ガス戻り配管とその他冷却配管が組込まれている。超伝導空洞ヘリウム容器は蒸発ガス戻り配管より支持され、蒸発ガス回収配管はサポートポストを介して真空容器から支持されている。

図 1 に示された TESLA クライオモジュールの断

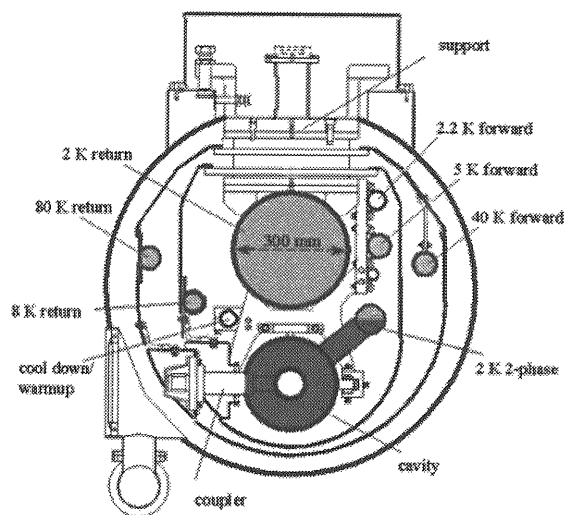


図 1 TESLA-TYPE-III クライオモジュール断面形状

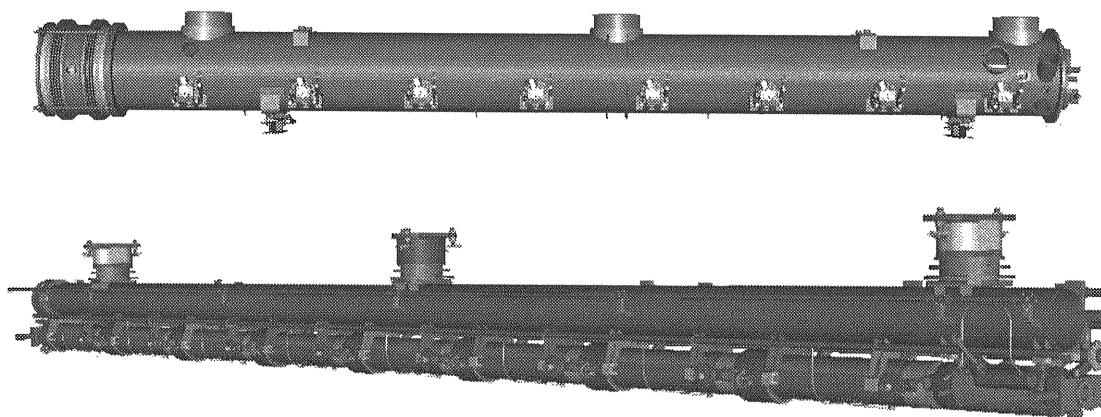


図 2 TESLA-TYPE-III クライオモジュール真空容器 (上) 及びコールドマスと空洞ストリング (下)

面設計は、クライオモジュールの設計に於いて3代目となる。液体ヘリウム供給配管（2K 2-phase）を、空洞中心を通る垂直面から右方向にずらし、空洞ヘリウム容器と蒸発ガス戻り配管間の距離を小さくすることにより、全体的に断面形状をコンパクトに設計している。この結果、真空容器の外径を1200mm（初代）から965.2mmまで小さくできている。図2にはクライオモジュール真空容器及びコールドマスと空洞ストリングを示してある<sup>[2]</sup>。真空容器全長は12.2メートルあり、3本のサポートポストによりコールドマス全体を支持している。外径300mmの蒸発ヘリウムガス戻り配管に8台の超伝導空洞ヘリウム容器と1台の超伝導4極電磁石が吊り下げられている。この蒸発ヘリウムガス戻り配管は、クライオスタット内で背骨の役割を担っている。以下の節では真空容器内部に含まれる主要機器について説明する。

### 2-2 超伝導空洞ヘリウム容器と付属部品

図3にTESLA TYPE-IIIの改良型であるTYPE-IVのヘリウム容器及び空洞の断面形状（設計）を示してある<sup>[3]</sup>。2Kの超流動ヘリウムは容器内部の超伝導空洞と容器間の隙間部にためられて空洞を冷却する。この容器には、2Kの超流動ヘリウムを供給する配管の他、空洞周波数チューナ、予冷・加温配管、スライドサポート機構が取り付けられる。図3にはIFNF研究所が開発したブレード型周波数

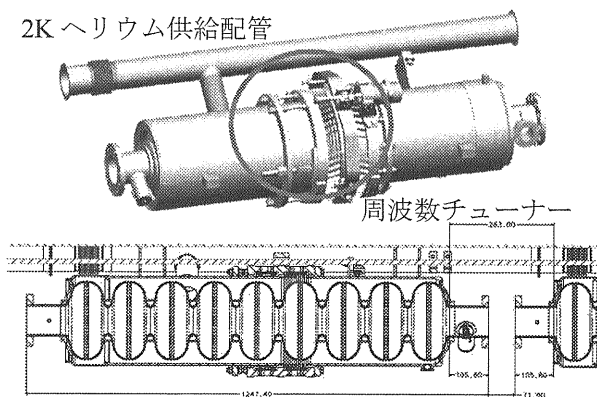


図3 IFNFが開発したブレード型周波数チューナーが組込まれた空洞ヘリウム容器

数チューナーが描かれている。このチューナーの駆動には、5Kに冷却されたモータ（遅い周波数変化）とピエゾ素子（速い変化：1200Hz）が用いられる。8台の超伝導空洞ヘリウム容器は、外径300mmの蒸発ガス戻り配管からサポートされている。この戻り配管の材質はステンレスであること、又長さが12m以上あることから、2K迄の冷却時には全体として約32mm熱収縮する。空洞容器に接続されるビームパイプには後に説明する入力カップラーが取り付けられる。この入力カップラーは室温の真空容器に固定されるため、空洞容器を蒸発ガス戻り配管に固定すると熱収縮によるクライオモジュール内軸方向の位置変化によりカッ

表1 中心位置からの超伝導空洞距離変化

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$
r. t.	5693	4312	2929	1547	165	1217	2599	3981
2K	5678	4301	2921	1543	165	1214	2592	3970
$\Delta L$	15.1	11.4	7.8	4.1	0.4	3.2	6.9	10.5
$\Delta L_{in}$	1.9	1.5	1.0	0.5	0.1	0.4	0.9	1.4

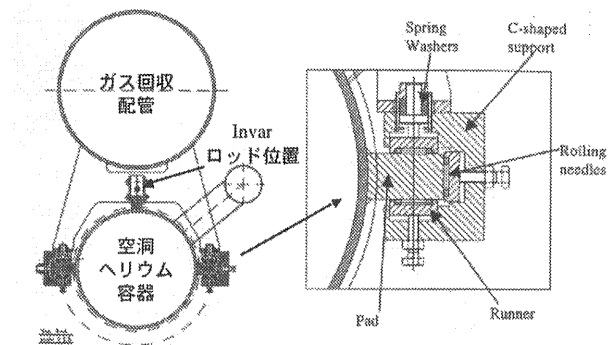


図4 空洞容器スライド機構概念図

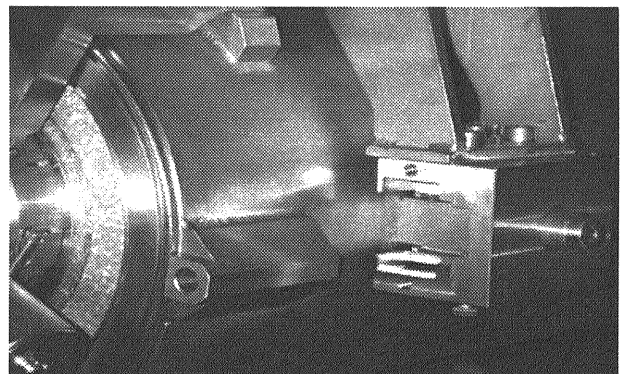


図5 空洞容器スライド機構

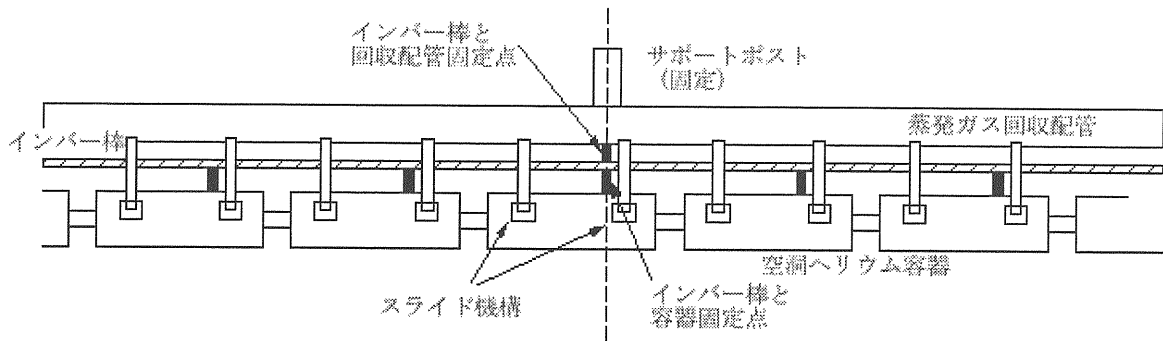


図6 超伝導空洞ヘリウム容器軸方向固定概念図

プラーを破損することになる。表1に、室温と2Kに冷却した場合の中央サポートポスト位置（固定点）から各ヘリウム容器中心位置までの距離を示した。表中 $C_n$  ( $n=1\sim 8$ )は空洞番号を表している。中央サポートポストから一番離れている空洞容器では室温の真空容器に対して15.1mmの位置変化がある。この位置変化を緩和する為に、空洞容器サポート部にはスライドする機構を導入し、更に軸方向の位置を固定する為に熱収縮率の小さなInvar材で出来た棒を軸方向の固定に用いている。図4、5にスライド機構の概略図と写真を、図6には空洞の固定の概念図を示してある。空洞のサポートは蒸発ガス戻り配管に固定されているので、冷却・加温時には配管と共に位置を変える。空洞容器はサポート内に組み込まれたベアリングにより上下方向には固定されるが、軸方向にはスライドする。空洞容器と固定されているInvar棒は中央のサポートポスト位置で蒸発配管に固定され、この位置は空洞容器ストリングの固定点となる。Invar材の熱収縮率は0.034%で、この方式による位置変化を表1に $\Delta L_{in}$ として示した。空洞容器の変位量は最大で2mm以下となり、この変位は入力カップラー内部のベローパイプで対応可能な変位である。

入力カップラーの熱負荷について、KEKで開発が進められているSTF-Phase-1用クライオモジュール（Low Lossタイプ：45MV/m<sup>[4]</sup>）用入力カップラー<sup>[5]</sup>を用いて説明を行う。図7に示すように、

この入力カップラーは真空容器外面からサポートされる為、直接室温部と2Kの極低温部を熱的に接続することになり、熱伝導による侵入熱には十分注意を払う必要がある。カップラーを通じて2Kへ侵入してくる熱を軽減する為に80K及び5Kの熱輻射シールド板からサーマルアンカーが取られている。この入力カップラーの熱侵入量の計

表2 Low-Loss タイプ用入力カップラー侵入熱（1台当たり）

	80 K	5 K	2 K
定常ロス[W]	1.24	0.54	0.00
RFロス[W]	2.14	2.88	0.25
合計[W]	3.38	3.42	0.25

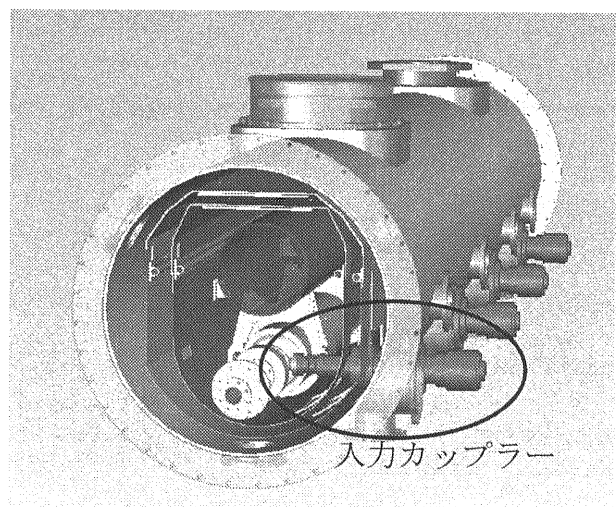


図7 STF用に開発されたクライオモジュール

算値が表 2 に示されている。定常時の 2K への侵入熱（室温からの熱負荷）は殆どゼロであるが、RF 運転時にはカップラー本体に発熱があり 1 台当たり 0.25W の熱負荷が発生する。

導空洞ヘリウム容器には、その他付属部品として室温からの冷却及び加温を行う為の予冷配管（外径 5mm、内径 3mm）と定常運転時に超流動ヘリウムを供給する為の配管（外径 60mm、内径 57mm）が接続されている。これら配管については後に説明を行う。

### 2-3 サポートポスト

超伝導空洞ヘリウム容器を支持している蒸発ガス回収配管は、サポートポスト 3 本でクライオモジュール真空容器から支持されている。3 本のポストの内、中央のポストは真空容器に固定されており、両側のポストはガス回収配管の冷却による熱収縮の影響を緩和する為に真空容器に対してスライドする機構を持っている。サポートポスト間の距離は 4850mm と 4995mm あり、パイプ材のステンレスの熱収縮率が 0.265% であることから、冷却時には各々 12.9mm 及び 13.2mm だけ両側のポストは中央へ移動する。

サポートポストは、真空容器内に組込まれる超伝導空洞、4 極磁石及び冷却機器を支持することから、1 本あたりの支持荷重は約 750kg 程度になる。又、室温と 2K 配管を直接繋いでいることから 2K への侵入熱を低減する為に、80K 及び 5K の熱輻射シールド板からサーマルアンカーが取られている。図 8 にはサポートポストの写真が示されているが、以下にサポートポストの基本的な熱計算を紹介する<sup>[6]</sup>。

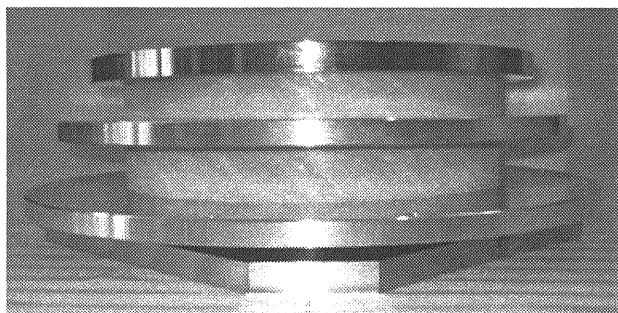


図 8 サポートポスト

熱計算を行なうモデルとして、ポスト両端の温度を 300K と 1.8K とし、中間部に 70K 及び 4.5K のサーマルアンカーをとる。70K と 4.5K の位置を最適化し、冷凍機への負荷を最小にすることを目標にしている。冷凍機負荷を考慮に入れる為、Carnot 効率と冷凍機の効率から各温度域で 1W の侵入熱に対する室温での必要な仕事量を計算する。最小可逆仕事を表す Carnot 効率は以下の式で表される。

$$\text{Carnot Efficiency} = T_c / (T_o - T_c) \quad (2-1)$$

式中、 $T_c$  = 低温、 $T_o$  = 室温。

表 2 室温での冷凍必要仕事量

Temp.	Carnot eff	Refrig. eff	Combined eff	Room temp. W/W
70K	30.43%	20%	6.09%	16
4.5K	1.52%	20%	0.30%	328
1.8K	0.60%	10%	0.06%	1657

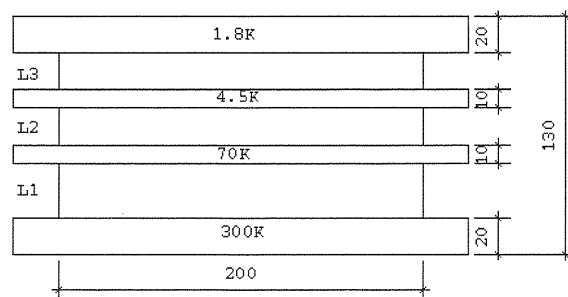


図 9 サポートポスト熱解析モデル

計算で用いられたパラメータは、表 2 に示されており、又冷凍機の効率は FNAL-Tevatron 冷凍機及び DESY-Hera 冷凍機の経験値を用いている。

図 9 に示す簡易モデルで、室温での必要仕事量を最小にするようなサーマルアンカー位置についての検討を行った。サポートポストの材質は S-ガラスにエポキシ樹脂を含浸させた FRP パイプ（肉厚 1mm）である。計算に用いた熱伝導積分値を表 3 に示してある。

表3 FRPパイプの熱伝導積分値

$\int k dT$ (300K-70K)	$\int k dT$ (70K-4.5K)	$\int k dT$ (4.5K-1.8K)
1.249 W/cm	0.146 W/cm	0.0015 W/cm

図10に解析結果を示してある。図9に示した $L_2$ の距離をパラメータにして冷凍機負荷への影響を調べたものである。この結果によると、 $L_2$ がサポートポストの室温から2K迄の熱伝導距離の50%の値で冷凍機の負荷は最小値になり、又50%の前後では冷凍機への負荷に対して鈍感であることがわかる。この様な解析をもとに最終的に採用された形状は、サポート高さ140mm、1.8Kと300Kのフランジの厚みが18mm、4.5Kと70Kのサーマルアンカーフランジ厚み15mm、各フランジ間距離 $L_1=27$ mm、 $L_2=37$ mm、 $L_3=10$ mmとなる。FRPパイプの外径は300mmで肉厚は2.2mmである。この時の、サポートポスト1本あたりの1.8Kへの侵入熱は0.023W、4.5Kへは1.104W、70Kへは11.84Wであり、室温での冷凍機の必要仕事量は327Wと計算される。

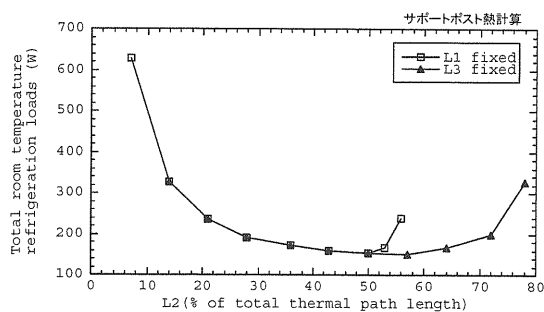


図10 サーマルアンカー位置の熱負荷への影響

#### 2-4 熱輻射シールド

熱輻射シールドは5Kと80Kの肉厚3mmのアルミ板とアルミ蒸着したフィルム(SI)で構成されている。アルミ板には冷却配管が溶接されており、4.5Kと70Kのヘリウムガスにより冷却されている。図11、12にDESYでの組立中のシールド板及び完成後の写真を示してある。5Kシールド板には10層のSIを巻き、80Kシールド板には30層のSIが巻かれており、シールド板への熱輻射による侵入

熱はSIにより低減される。アルミ蒸着フィルム

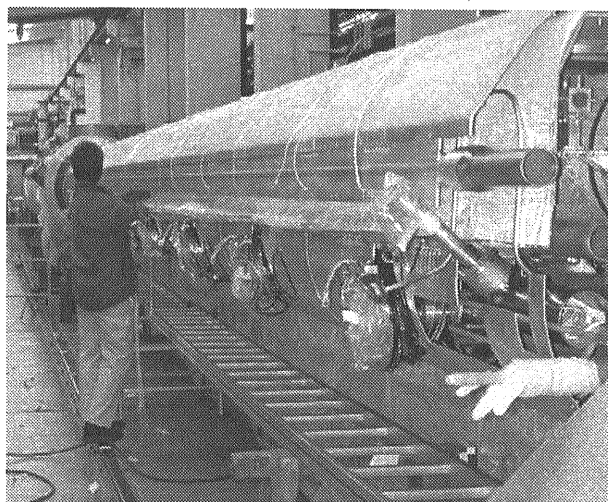


図11 熱輻射シールドの組立て

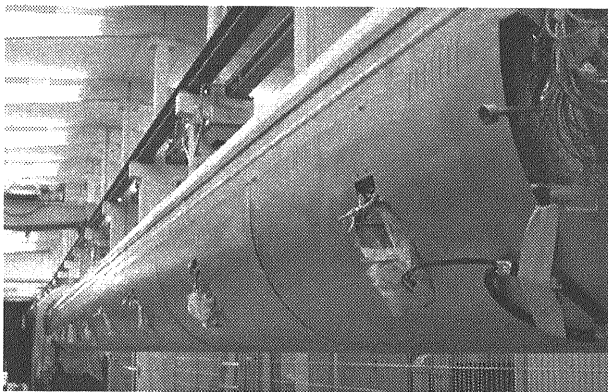


図12 完成した80K熱輻射シールド板

は厚さが、6-25ミクロンのポリエステルフィルムにアルミを0.1ミクロン蒸着したもので、300Kから80Kで $\epsilon=0.056$ 、80Kから4.2Kで $\epsilon=0.011$ の放射率を持つ。各熱輻射シールド板への侵入熱を表4に示してある。又、SIが無い場合で且つ放射率 $\epsilon=0.1$ の表面への侵入熱を参考の為に併記した。熱輻射による全侵入熱の計算に用いられたシールド板の表面積は、80Kシールド板が35m<sup>2</sup>で5Kシールド板が30m<sup>2</sup>である。SIが施された場合の各温度域での実効侵入熱量はCERNのデータを用いている。又、比較として示したSIがない場合の放射率はアルミ板の表面が機械研磨しただけの状態を仮定している。表から分かる様にクライオモジュールは長さが12mあり、これにより輻射シールド板の面積が非常に大きくなり輻射による侵入

熱も 5Kシールドへは 1.5W、80Kシールド

表 4 熱輻射による侵入熱

	SI 有り	SI 無し
300K→80K実効熱束, W/m <sup>2</sup>	1-1.5	45.7
300K→80K 全熱侵入量, W	35-53	1599.5
80K→5K実効熱束, W/m <sup>2</sup>	0.05	0.232
80K→5K 全熱侵入量, W	1.5	6.96

へは 35-53W に達することが分かる。しかしながら、SI が無い場合では 5K シールドへは約 5 倍、80K シールドへは約 30-50 倍の侵入熱となり、アルミ蒸着マイラーの断熱効果が非常に大きいことがわかる。

熱輻射シールド板は、サポートポストに支持された上部板と下部板から構成され、冷却配管はこれらシールド板に溶接されている。室温からの予冷時、各シールド板の定常温度である 80K と 5K に到達する迄はシールド板内の温度分布は過渡期にあり、板内で冷却速度に応じた大きな温度勾配が存在する。INFN の Calro Pagani 等は、シールド板の冷却速度、温度分布、それにより誘発されるシールド板の変形を ANSYS によって詳しく調べた [7]。これらの結果は図 13-17 に示されている。図 13 には計算に用いた冷却曲線を示してある。計算に用いた条件として 1 時間あたり 21.5K の直線的な温度降下を仮定している。同図にはシールド板内の最大温度の時間変化についても示されている。図 14 はシールド板内に発生する最大の温度差の時間変化を示したものであるが、70K シールド板、4.2K シールド板共に最大の温度差は冷却開始後 8.5 時間付近で現れ、60K 以下である。図 15 から、熱輻射シールド板は冷却配管が溶接されている部分の冷却が促進され、冷却配管は 1 ラインで行なわれていることから容器断面に対して左右対称に冷却されていない。図 16、17 にシールド板内の応力分布と変形を示した。計算結果より、冷却時に発生する応力は最大で 30MPa 以下であり、横方向の変形が 10mm 程度であることが分かっている。この横方向の変形に対して、実機のシールド板は中央部はポストにボルト固定されているが両端のサポートポストにはボルト固定されず、

サポートポストフランジ上を滑る構

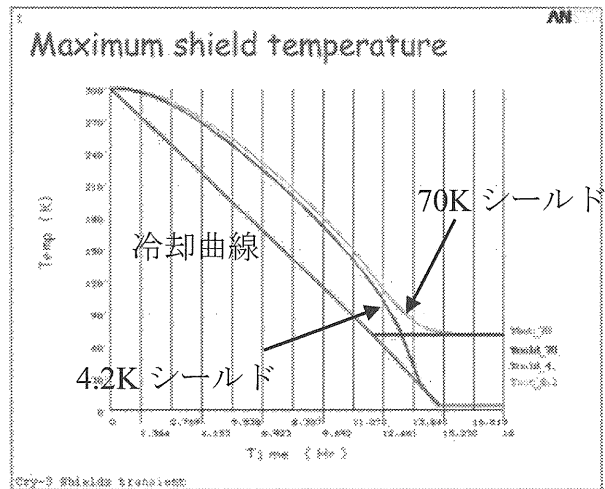


図 13 計算に用いた冷却曲線

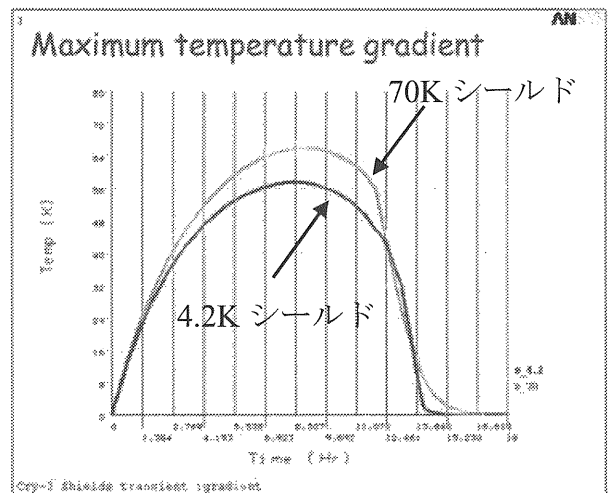


図 14 シールド内最大温度差の時間変化

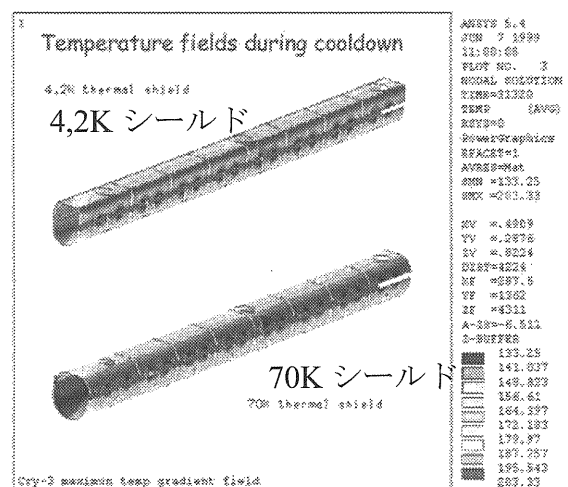


図 15 冷却開始 8.7 時間後のシールド板内温度分布

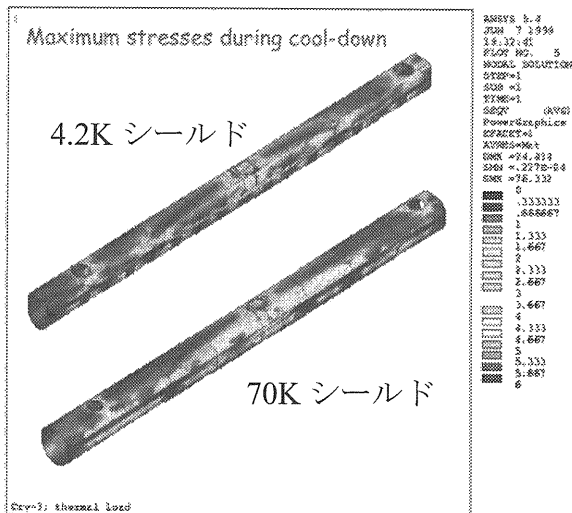


図 16 シールド板内応力分布

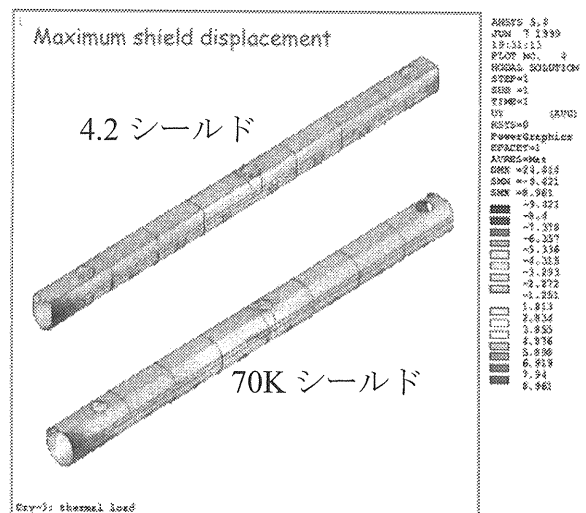


図 17 シールド板の変形

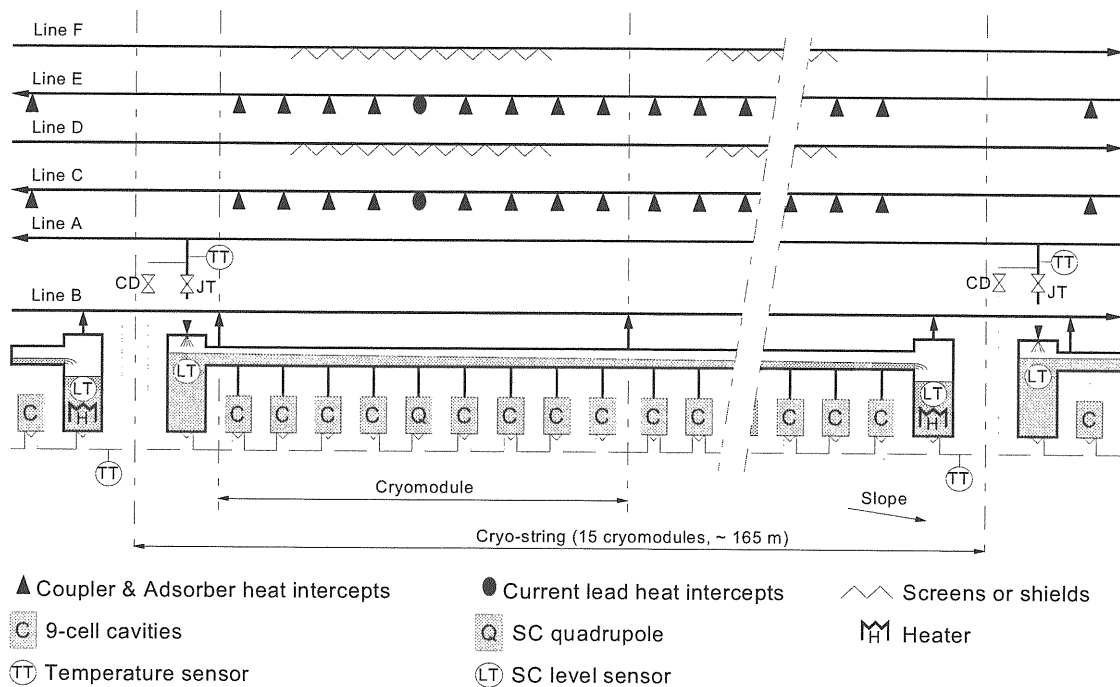


図 18 クライオモジュール内冷却回路

造となっている。この構造はガス回収配管と接続されているサポートポストの冷却時の移動量とアルミのシールド板の熱収縮量が異なることから必要である。この熱収縮量の差は約 5mm である。両端のサポートポストとシールド板の熱接続は銅のフレキシブルなケーブルで行なわれている。

## 2-5 冷却配管

### 2-5-1 冷却回路

図 1 に示したようにクライオモジュールには外径 300mm の蒸発ガス戻り配管の他、7 本の冷却配管が使用されている。図 18 にはこれらの配管の回路図が示されている。図中、Line-A=過冷却液体ヘリウム供給配管、Line-B=蒸発ガス戻り配管、Line-C=5K ヘリウムガス供給配管、Line-D=5K ヘリウムガス戻り配管、Line-E=50K ヘリウムガス供給配管、Line-F=80K ヘリウムガス戻り配管を示



している。この他、空洞容器に 2K 飽和液体ヘリウムを供給する配管及び空洞容器予冷・加温用ヘリウムガス供給配管が含まれている。

図 18 に示すように、クライオモジュールは 15 台 (165m) で 1 単位のクライオモジュールストリングを形成している。1 クライオモジュールストリングには過冷却の液体ヘリウムを等エンタルピー膨張する JT 弁、液化された 2K の飽和蒸気圧ヘリウムをためる容器及び液回収の為の容器、2K 飽和液体ヘリウムを供給する配管、予冷・加温配管を含んでいる。

Line-A で供給される過冷却液体ヘリウムは JT 弁により等エンタルピー膨張され、2K の飽和液体ヘリウム (圧力 3.1kPa) となる。液体ヘリウムは一度容器に蓄えられ飽和ヘリウム供給配管により 15 台のクライオモジュールに送られる。又、Line-A からは予冷・加温配管が分岐されている。図中に提案されている冷却回路は、空洞ヘリウム容器を配管の管壁を通して冷却を行う間接 (伝導) 冷却方式で、空洞容器の冷却も直列で行われる。TESLA のクライオモジュールに於いては、予冷及び加温は並列に行われ、ヘリウムガスは直接容器内に流されている。

Line-C は 5K のヘリウムガスが流され、インプットカップラー、4 極磁石の電流リード等のサーマルアンカーがとられている。Line-D は、5K のヘリウムガスラインの戻りラインで 5K の熱輻射シールド板の冷却を行っている。

表 5 クライオモジュール内冷却配管

	内径 (mm)	温度 (K)
Line-A	60	2-4
Line-B	300	2
Line-C	70	5
Line-D	70	8
Line-E	100	50
Line-F	100	75
2K-飽和 He 供給ライン	72	2
予冷・加温ライン	39/3	2-300

Line-E は 50K のヘリウムガスが流され、Line-C と同様、インプットカップラー、4 極磁石の電流リード等の高温側のサーマルアンカーがとられている。Line-F は、50K のヘリウムガスラインの戻りラインで 75K のヘリウムガスが流され 80K 熱輻射シールド板の冷却を行っている。表 5 には以上述べた配管のサイズ及びヘリウムガス温度が纏められている。予冷・加温ラインの配管内径 39mm は TESLA-TYPE-III で採用されている配管内径で、又並列冷却配管部の内径は 3mm (長さ 1m 程度) である。

### 2-5-2 蒸発ヘリウムガス戻り配管

減圧ポンプを含めた冷凍機システムは約 2.3km 毎に配置される。クライオモジュールの熱負荷に伴う蒸発ガスは内径 300mm の配管で減圧ポンプまで導かれるが、このガスの流れに沿って圧力降下 (配管に沿った圧力分布) が発生する。この圧力分布により、戻り配管に接続した空洞ヘリウム容器内液体ヘリウムの飽和蒸気圧温度は変化する。そこで簡単なモデルにより、この温度変化を検討してみる。計算のモデルは、配管距離 2.5km、配管内径 300mm、クライオモジュール 1 台の熱負荷 30W で 147 台のクライオモジュールが等間隔で配置されているとした。計算の簡単化のためクライオモジュールの圧力は 3.129kPa (飽和温度 2K) と仮定した。計算に用いた式を以下に示した。

クライオモジュールの蒸発ガス流量

$$m = Q / (i_{satV} - i_{satL}) \quad (2-2)$$

各クライオモジュールが接続されている配管部流量 (n=1~147)

$$M_n = n \times m \quad (2-3)$$

式中、 $m$ : 蒸発ガス流量 (kg/s)、 $Q$ : 熱負荷 (W)、 $i_{satV}$ : 飽和ガスエンタルピー (J/kg)、 $i_{satL}$ : 飽和液エンタルピー (J/kg)、 $M_n$ : 配管部流量 (kg/s) である。

配管内の圧力損失は、レイノルズ数と呼ばれる流体の状態を示す無次元数により決まる摩擦係数を用いて計算した。

$$Re = DG/\mu \quad (2-4)$$

式中、 $Re$ : レイノルズ数、 $D$ : 配管内径 (m)、



$G$ : 質量流速 ( $\text{kg/m}^2/\text{s}$ )、 $\mu$ : 粘性係数 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )  
 である。

流体の状態は、 $Re < 2300$  の範囲で層流となりその時の摩擦係数  $f$  は、

$$f = 16/Re \quad (2-5)$$

$Re > 2300$  では乱流となり摩擦係数  $f$  は、

$$f = 0.0014 + 0.125 \times Re^{-0.32} \quad (2-6)$$

圧力損失  $\Delta P$  は摩擦係数  $f$  を用いて次の式で計算される。

$$\Delta P = 4f \times (G^2/2\rho) \times (L/D) \quad (2-7)$$

式中、 $\Delta P$ : 圧力損失 (Pa)、 $\rho$ : 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $L$ : 配管長 (m)。

計算結果を図 19 に示してある。この結果より、クライオモジュール 1 台に 30W の熱負荷を仮定した場合、蒸発ガスの流れに伴う圧力差は配管の両端で 141Pa であることがわかる。この圧力分布による高圧側の飽和蒸気圧温度は 2.015K と計算される。この温度変化 (15mK) が超伝導空洞の性能に与える影響は小さいと考えられる。

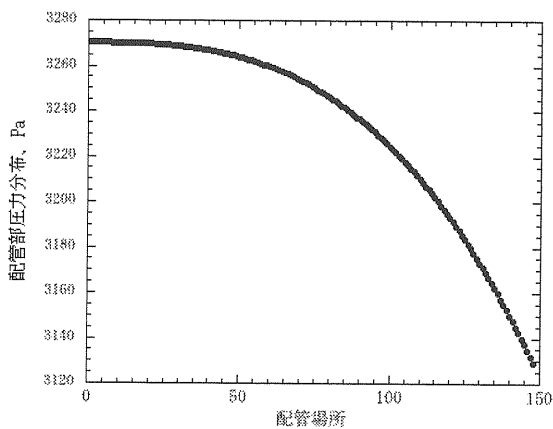


図 19 蒸発ヘリウムガス戻り配管内圧力分布

### 2-5-3 2K 飽和ヘリウム供給管

図 18 に示すように、空洞容器に 2K 飽和液体ヘリウムを供給する配管は、クライオモジュールの 1 冷却ユニット (長さ 165m) に渡る内径 72mm の配管と空洞容器とこの配管を結ぶ枝管から構成されている。枝管の内径は 55mm で長さは 200mm である。図 19 に TESLA-TYPE-III のヘリウム供給配管及び空洞容器の写真を示した。

各空洞容器には、液体ヘリウムが強制的に空洞

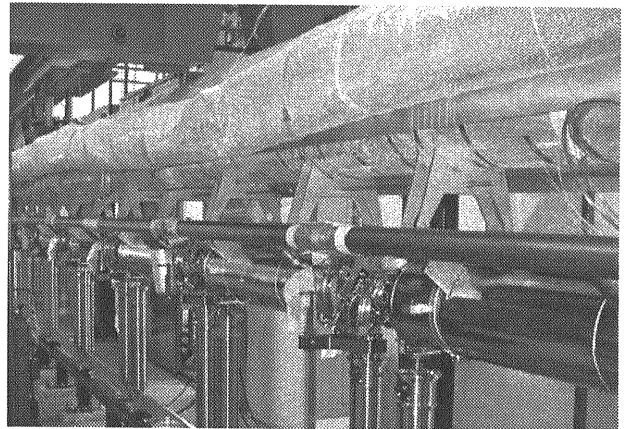


図 19 空洞容器及びヘリウム供給管

容器に送られるのではなく、2K の飽和蒸気圧ヘリウムの特性である超流動性を利用して液が自重で容器内に落ちていくことで各容器に分配される。又、空洞の熱負荷に対しては飽和液の蒸発で対処されるが、ヘリウム供給管が液で完全に満たされてしまうと蒸発面積が不足し液温の上昇を引き起こす。供給配管が液で満たされると蒸発面が 8 空洞毎にある液体ヘリウム供給配管と蒸発ガス戻り配管を接続している配管部位置まで上昇し、この結果蒸発断面積が減少する。液の蒸発面積を確保するため液体ヘリウム液面がヘリウム供給配管内部にあるように制御されている。

熱負荷がある場合の液体内温度分布について計算によるシミュレーション<sup>[8]</sup>が行われており、この結果について以下に説明する。計算のモデルを図 20 に示す。空洞を単純化して円筒でモデル化している。熱負荷は 4 台の空洞に対して 30W とした。熱伝達機構には粘性とエントロピーがゼロの超流動成分と粘性とエントロピーを持つ常流動成分からなる 2 流体モデルを用いて、計算を行っている。計算結果を図 21 に示してある。仮定した熱負荷では、超流動ヘリウムは乱流状態とな

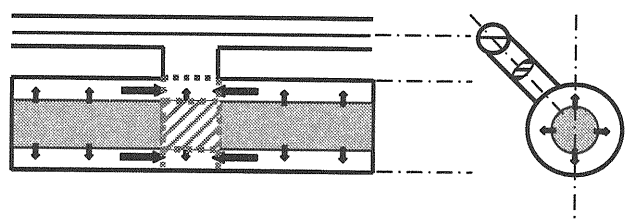


図 20 空洞容器内ヘリウム温度分布計算モデル

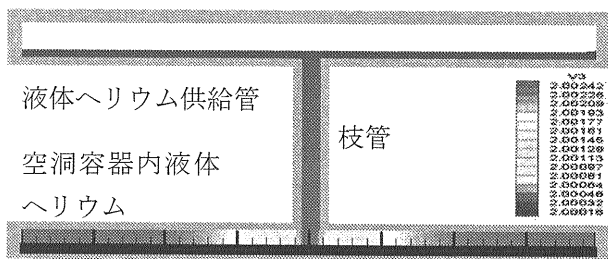


図 21 容器内液体ヘリウム温度分布

り液体ヘリウム内部に温度分布が存在していることが分かる。この温度分布は加熱面から蒸発液面までの液頭圧により超流動ヘリウムがサブクール状態になることから発生すると考えられるが、蒸発面積が減少すると液温が全体的に上昇し

サブクール度が小さくなり加熱面で蒸気膜が発生しやすくなると考えられる。このために空洞は冷却効率の低下により容易に温度上昇を起しやすくなると考えられる。

### 3. クライオモジュールの冷却・加温

#### 3-1 クライオモジュール冷却システムの構成

2-5-1 で示したようにクライオモジュールは、15 台で約 165m の 1 スtring を形成している。この 1 クライオモジュール String は、16 String で 1 冷却単位とされ、冷凍機 1 台で冷却される。図 22 には、このシステム図を示してある。1 台の冷凍機が担当する距離は約 2.3km となる。又、図 23 には e-ライナックの冷凍機シ

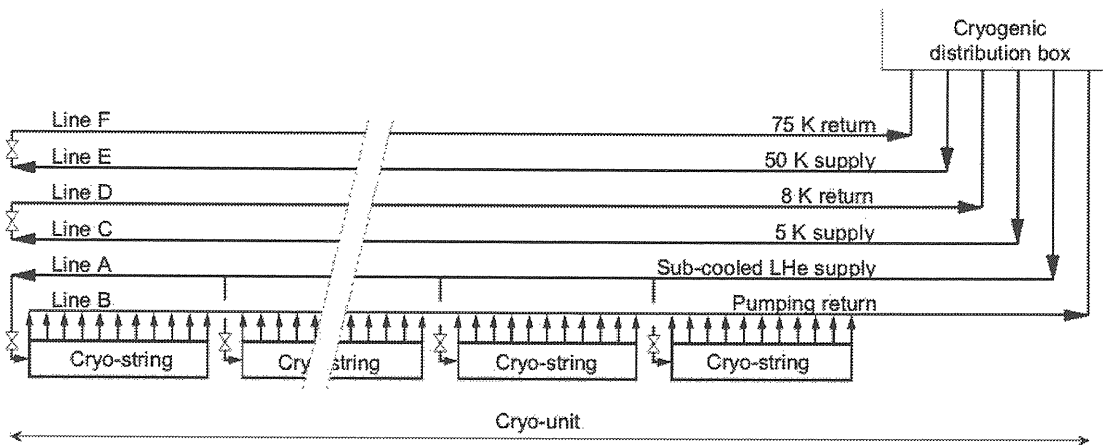


図 22 1 冷却ユニット (16 クライオモジュール String)

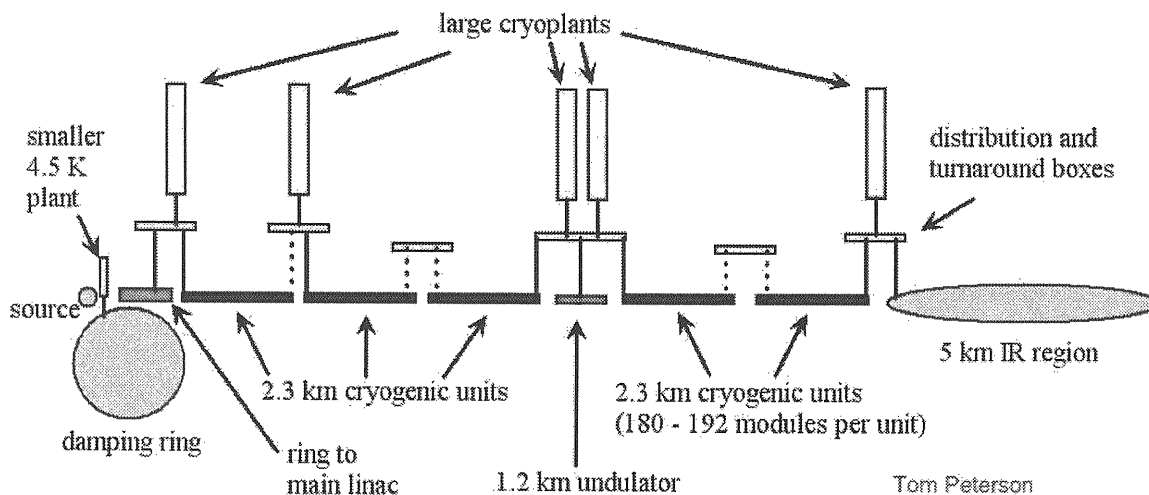


図 23 e-ライナックの冷凍機システム構成

システムの構成を示してある。e-メインライナックのクライオモジュールの全台数は1050あり、4.5Kで25kWの冷凍能力を持つ冷凍機5台で冷却する。

### 3-2 クライオモジュール冷却の検討

図22に示すように、16個のクライオモジュールストリングは1台の冷凍機で並列に冷却される。DESYでは、同様の冷却システムをXFEL加速器に対して既に検討しており、ここではDESYの解析結果<sup>[9]</sup>を元にしてILCのクライオモジュールの冷却について考えてみる。尚、XFELで用いられるクライオモジュールの設計はTESLA-TYPE-IIIをベースに検討が進められており、冷却のシミュレーションにはTESLA-TTF2の冷却結果を用いている。又、XFELの場合、ストリングの数は10個である。

図24に最も冷凍機に近いストリングの冷却ガスの状態を示す。供給されるヘリウムガスの温度は、戻りのガスの温度との差が50K以下になるように段階的に下げられている。冷却時間は約5000分(3.5日)を仮定しており、この時のガス流量は室温付近では11g/s、50K程度まで冷却が進むと31g/sまで増やされる。

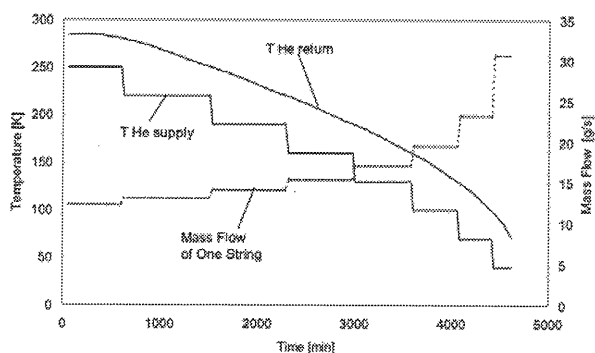


図24 XFEL-No.1ストリングの冷却ヘリウムガス状態(供給ライン及び戻りライン)

図25には2K過冷却ヘリウム供給配管内での流量及び圧力を各ストリング位置で異なる温度レベルに対して示してある。室温からの冷却時はこの配管内には温度制御されたヘリウムガスが圧送される。又、各ストリングに並列に流される流量は同じと仮定している。No.1ストリングは冷凍機に最も近い位置にあることから、この位置のヘ

リウムガス流量が全流量に相当する。初期冷却時、250Kのヘリウムガスの全流量は約110g/s(圧力18bar)である。ILCの場合、16ストリングを冷却することになるので176g/sのガス流量を必要とする。冷却が進んで温度が低下すると、流量が増加する。40Kのヘリウムガスに対しては310g/s以上のガスが流れている。ILCでは概ね500g/sの流量に相当する。図26にはNo.1とNo.10ストリングの真中部でのクライオモジュール温度と戻り配管内のヘリウムガスの温度差を示している。各ストリングが並列で冷却されているので冷凍機からの距離の影響は殆ど見られない。又、図中に示された温度差はストリング中央部の温度を示しているので6台のクライオモジュール間で発生する温度勾配に相当し、最大でも40K以下に抑えられている。

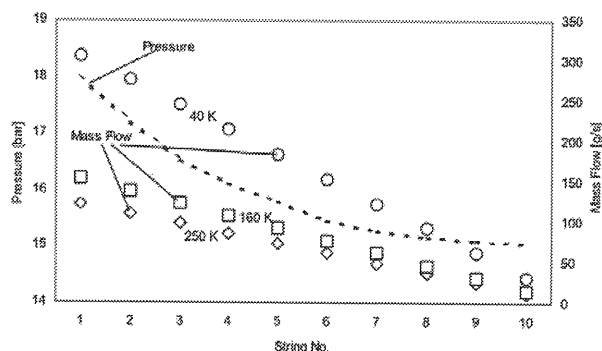


図25 過冷却2Kヘリウム配管内での各ストリング位置での冷却ヘリウムガス流量及び圧力

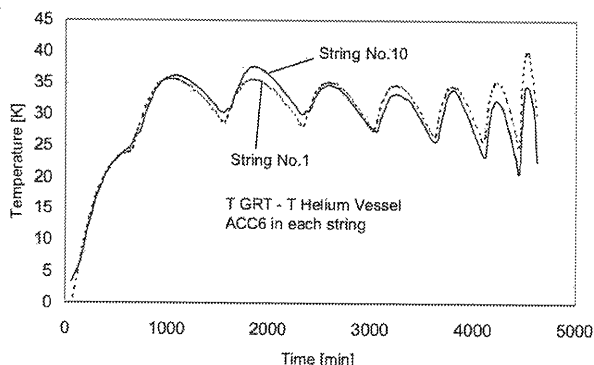


図26 No.1とNo.10ストリングでのクライオモジュールと戻り配管内ヘリウムガス温度との差

### 3-3 冷却・加温時の超伝導空洞の位置変化

8台の超伝導空洞及び4極電磁石は、クライオモジュール真空容器に挿入前にアライメントされる。真空容器に挿入後は、相対的な空洞及び4極磁石の位置変化がワイヤー位置センサー (WPM) により測定される。WPM のクライオモジュール内での様子を図 27 に示してある。このセンサーは内部に張られた金属のワイヤーに交流電流を流し、センサーに取り付けられた電極に発生する電圧により位置変化を測定する。ワイヤーは室温のクライオモジュールフランジから固定されており、基準位置となる。

DESY-TTF では5台のクライオモジュールがトンネル内に組み立てられ冷却試験が行われて

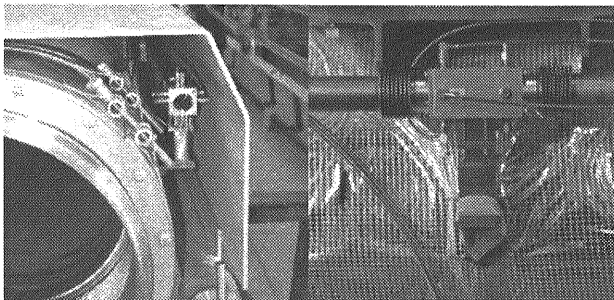


図 27 ワイヤー位置センサー

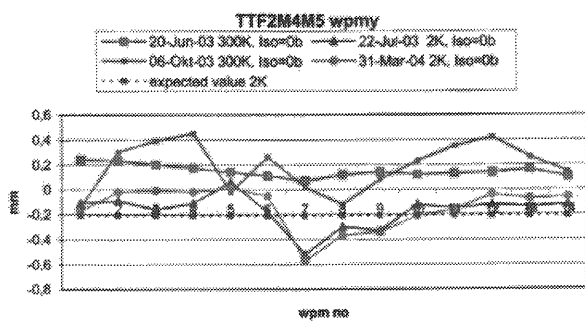
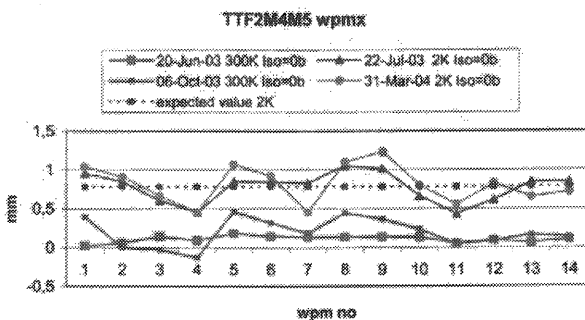


図 28 冷却・加温時の空洞位置変化  
(上図：水平方向変位、下図：上下方向変位)

いるが、図 28 は ACC-4 モジュールと ACC-5 モジュールに対する測定結果を示している。この2台のクライオモジュールは真空容器も含めてベローズにより配管の接続が行われている。図中、No. 1~7 が ACC-4 モジュール、No. 8~14 が ACC-5 モジュールの結果に対応する。又、No. 4 と No. 11 の位置は、サポートポスト (固定点) に対応する。測定は、冷却前 (2003 年 6 月 30 日)、2K 冷却時 (2003 年 7 月 22 日)、加温完了後 (2003 年 10 月 6 日)、2K 再冷却時 (2004 年 3 月 31 日) に行われた。図 28 に示されるように、2K 冷却時の測定位置は予想される位置に対して  $\pm 0.3\text{mm}$  で分布している。又、測定結果より、2 回の冷却に対する上下方向の測定位置が最大で  $0.3\text{mm}$  の差があり、十分な再現性があるとはいえない。

### 3-4 熱負荷の評価

TESLA クライオモジュールは今迄 5 台建設されており、それらの熱負荷は詳しく測定されている。改造によるものも含めると 10 例の測定が存在する。この結果は表 6 に纏められている。この中でモジュール 1\*、4、5、2\*及び 3\*は、TTF2-linac で運転されている。又、この5台のクライオモジュールは TESLA-TYPE-II と III の設計断面をもっている。2K への定常負荷としては、設計値が  $2.8\text{W}$  であるのに対して、測定値は  $3.5\text{W}$  以下となっている。同様に、4.3K への定常負荷は設計値  $13.9\text{W}$ 、測定値  $13\text{W}\sim 14.5\text{W}$  となっている。加速器運転時は定常負荷の他に入力カップラーでの発熱による熱負荷が発生し、2K 及び 4K ではこの負荷の割合

表 6 TESLA クライオモジュール熱負荷測定値

Module	40/80 K [W]			4.3K [W]			2 K [W]			Notes
	Design	Estim.	Meas.	Design	Estim.	Meas.	Design	Estim.	Meas.	
Catcher			46.0			3.0			5.5	Source
Module 1	118.0	76.6	90.0	21.0	13.9	23.0	4.2	2.8	6.0	* Open holes in isolation
Module 1 rep. 1	118.0	76.6	81.5	21.0	13.9	15.0	4.2	2.8	5.0	* end-caps
Module 2	118.0	76.6	77.9	21.0	13.9	13.0	4.2	2.8	4.0	* end-caps
Module 3	118.0	76.6	72.0	21.0	13.9	48.0	4.2	2.8	5.0	* no cap 10/04 rib. 2b-caps
Module 4	118.0	76.6	73.0	21.0	13.9	13.0	4.2	2.8	<3.5	* end-caps
Module 5	118.0	76.6	74	21.0	13.9	13.5	4.2	2.8	<3.5	* end-caps
Module 6	118.0	76.6	74	21.0	13.9	13.0	4.2	2.8	<3.5	* end-caps
Module 7	118.0	76.6	72.0	21.0	13.9	12.0	4.2	2.8	4.5	* special 2 end-caps
Module 8	118.0	76.6	75	21.0	13.9	14	4.2	2.8	<3.5	* end-caps
Module 2*	118.0	76.6	74	21.0	13.9	14.5	4.2	2.8	<4.5	* end-caps
Module 5 EP	Type II, EP-Cavities. Cool Solution close to XFEL Machine (assembly End 04/7)									

Design and estimated values by Tom Peterson 1995 - Fermilab. Modules under Test in TTF2-Linac.

が大きくなる。例として、表2で示したカップラーの運転時の発熱は、4Kでは $2.88\text{W} \times 8 = 23\text{W}$ 、2Kでは $0.25\text{W} \times 8 = 4\text{W}$ である。

#### 4. まとめ (ILC用クライオモジュールとして改良が期待される項目)

ILC用クライオモジュールはTESLA-TYPE-IIIの設計が基本となっている。ILCでは更に加速器の性能を向上させるために、DESY-TTFでのクライオモジュール製作及び試験の経験から、ILC用クライオモジュールの設計に於いて検討が必要とされる項目について議論が始まっている。本稿のまとめとして、以下にこの点について述べる。

(1) 超伝導4極磁石、補正コイル及びビーム位置モニターのパッケージをクライオモジュール中央のサポートポスト位置で支持する。TESLA-TYPE-IIIの設計では、この4極電磁石のパッケージはクライオモジュールの片端に設置されている。クライオモジュール両端では熱収縮による位置変化が大きい為、固定点である中央のサポートポスト位置で支持することにより、4極磁石のパッケージをより安定に運転することを目的としている。

(2) 4極磁石パッケージ用クライオスタットを空洞クライオモジュールとは別にした場合の設計。4極磁石に対してアライメントの精度の向上、磁場測定及び組立作業の簡単化、振動に対する対処が施工しやすい等の利点がある。

(3) 空洞容器間の接続距離の短縮化及び簡単化。TESLA-TYPE-IIIでは空洞間の距離は345.45mmで

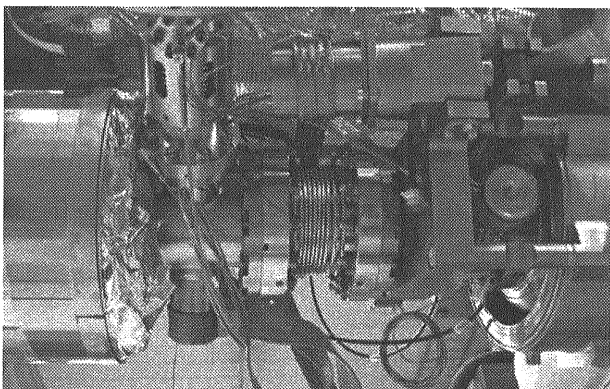


図29 空洞容器間接続部

あるが、この距離を283mmまで短くする。空洞容器の長さが1034.55mmであるから、約5%の加速電場の向上につながる。図29にTESLAクライオモジュールの空洞接続部の様子を示した。周波数チューナーが容器端にあるため、この部分の構造が非常に複雑である。

(4) クライオモジュール間の接続を含めた全体的なパッキングファクターの向上。

(5) クライオモジュールの組立作業の簡単化。

(6) 輸送を考慮した機械的設計。

(7) チューナー用駆動モータの低温運転に対する信頼性の向上。

以上、ILC用クライオモジュールとして改良すべき点は少なくなく、今後大いに検討及び開発が必要である。

最後に、本稿を纏めるにあたり2006年5月葉山で行われたInternational Accelerator School for Linear CollidersでのMilano大学Carlo Pagani教授の講義ノートを参考にさせて頂いた。

#### 参考文献

[1] TESLA Technical Design Report: TESLA Report 2001-23.

[http://tesla.desy.de/new\\_pages/TESLA/TTFnot01.html](http://tesla.desy.de/new_pages/TESLA/TTFnot01.html)

[2] L. Lilje, "XFEL Modules", presented at GDE-RDR-Main-Linac-Meeting (DESY), May 10-12 (2006).

[3] C. Pagani, International Accelerator School for Linear Colliders (葉山) 講義ノート、2006年5月19-27日。

[4] H. Matsumoto, etc., "A New Design for A Superconducting Cavity Input Coupler", Proceedings of the 2005 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC), pp. 4358-4360 (2006).

[5] K. Saito, etc., "Design of a Low Loss SRF Cavity for The ILC", Proceedings of the 2005 IEEE Particle Accelerator Conference (PAC), pp. 3622-3624 (2006).

[6] T. Nicol, "TESLA Test Cell Cryostat Support Post Thermal and Structural Analysis", Fermi-TM-1794,

August (1992).

[7] C. Pagani, D. Barni, M. Bonezzi, J. G. Weisend, “Future Improvements of The TESLA Test Facility(TTF) Cryostat in View of The TESLA Collier”, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 45, pp.939-946, 2000.

[8] 岡村、「超流動ヘリウム冷却に関する勉強会」(内部資料)、2005年。

[9] K. Jensch, R. Lange, B. Peterson, “Numerical Simulations for The Cool-down of the XFEL and TTF Superconducting Linear Accelerators”, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 49A, pp.371-378, 2004.