

液体水素液面センサー用 MgB₂ 長尺線材のショートサンプルの超伝導特性

Superconducting characteristics of MgB₂ short wires of long level sensor for liquid hydrogen

井上 雄貴, 山崎 瑛也, 前川 一真, 武田 実(神戸大学); 松野 優, 藤川 静一, (岩谷産業); 熊倉 浩明(物材機構)
 INOUE Yuki, YAMAZAKI Teruya, MAEKAWA Kazuma, TAKEDA Minoru (Kobe University);
 MATSUNO Yu, FUJIKAWA Shizuichi (Iwatani Corp.); KUMAKURA Hikoaki (NIMS)
 E-mail: 130w502w@stu.kobe-u.ac.jp

1. はじめに

本研究室では高精度かつ連続的に液面検知可能な液体水素用の液面計を開発するために、MgB₂ 線材を利用した電気抵抗式の超伝導液面計の研究を行っている。これまでの研究では外部加熱型液面センサーを試作し、液面センサーの液面平衡時における液面検知特性や外部ヒーターの熱応答性、小型容器を対象とした液面振動の研究などを行ってきた[1,2]。

一方、海外より大量に液体水素を海上輸送する計画が進んでいる。その際、液体水素運搬船に搭載するタンク内部に長尺液面センサーを設置することが求められる。液面センサーを長尺/大型化する場合に、MgB₂ 線材全体の超伝導特性が均一であることが必要である。そこで本研究では、MgB₂ 長尺線材から 20 mm 程度のショートサンプルを切り出し、ショートサンプルの超伝導特性の個体差を調べることを目的とする。

2. MgB₂ 液面センサー

MgB₂ 液面センサーは、MgB₂ に CuNi をシース材として被覆したもので、線材の直径は 0.32 mm である。MgB₂ 線材は、Powder-In-Tube 法をベースとした in-situ 法により作製を行った。具体的には、CuNi (7 : 3)のシース管の中に、Mg と B の混合粉末を充填した後に、直径 0.32 mm まで線引き加工をし、最後に Ar 雰囲気中にて熱処理を施した。尚、超伝導転移温度をタンク内の LH₂ 温度である、およそ 32 K まで下げするために、混合粉末をシース管に充填する際 10%の SiC を添加し、サンプルの熱処理時の焼成温度を 600 °C で 1 時間とした。

3. 実験装置

Fig.1 に自作した超伝導試験装置の写真と設計図を示す。この装置に MgB₂ 長尺線材のショートサンプルを取り付けて LHe の入ったデュワーで冷却して、サンプルの電気抵抗値と温度の関係を調べた。

この装置の特徴は、サンプルの取り換えが容易であること、複数のサンプルを同時に計測できることなどである。

4. 実験結果

自作した超伝導試験装置を用いて、今回新たに作製した 1.7 m の MgB₂ 線材からショートサンプルを切り出し、超伝導特性試験を行った。Fig.2 に実験結果を示す。

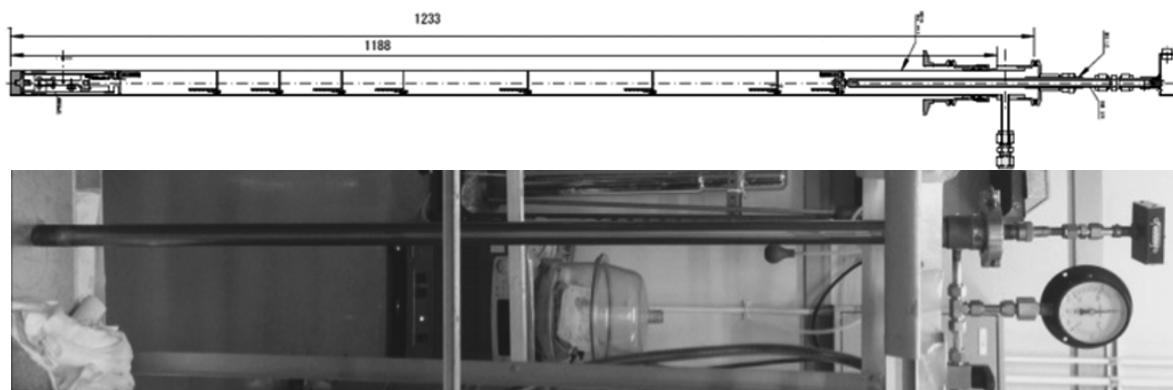


Fig.1 Superconducting characteristics test device.

図中の A-a1, A-a2 は、線材の片端から切り出したショートサンプルを表している。実験結果より、A-a1 の方が常伝導時における電気抵抗値の温度依存性が大きいことがわかる。この結果が個体差によるものであるのか、現在検討中である。

5. まとめ

超伝導試験装置を作製するとともに、今回新たに作製した 1.7 m の MgB₂ 線材からショートサンプルを切り出し、超伝導特性試験を行った。

今後は、連続的にデータを測定するためのプログラムを LabVIEW で構成し、追加実験を行う予定である。

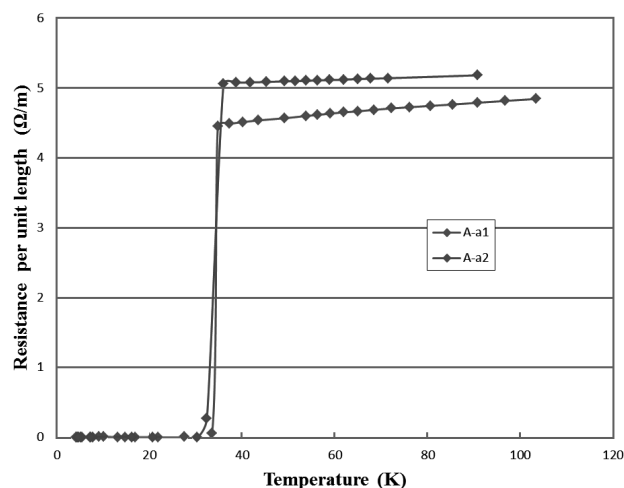


Fig.2 Superconducting characteristics of MgB₂ short wires.

謝辞

超伝導試験装置の製作にあたって、TS・テクノサポートの田中峰雄氏に技術的支援を頂きました。また本研究の一部に対して、科研費基盤研究 A(24246143)の援助を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1. M.Takeda, *et al.* : ICEC24-ICM2012 (2013) pp.311-314.
2. K.Maekawa, *et al.* : ICEC24-ICM2012 (2013) pp.59-62.

高磁場耐性 HTS-SQUID の開発 – SQUID 特性に関する研究 –

Development of robust HTS-SQUID in magnetic field – Characteristics –

廿日出 好 (近畿大学); 鈴木 健文, 田中 三郎 (豊橋技科大)
 HATSUKADE Y. (Kinki Univ.); SUZUKI T., TANAKA S. (TUT)
 E-mail: hatsukade@hiro.kindai.ac.jp

1. 緒言

材料や構造物に発生する深部欠陥の早期検出技術として、高温超伝導 (HTS) SQUID を用いた非破壊検査技術の研究・開発が行われてきた[1]。本技術は磁性体などの存在する通常環境中でも適用できることが望ましく、従来は磁気シールドなどの磁気遮蔽環境中で使用してきた HTS-SQUID に高い磁場耐性を付与するための研究が行われてきた[2]。近年新たにランブエッジジョセフソン接合を用いた HTS-SQUID グラジオメータが開発されている[3]が、普及するためには製作コストを下げる必要があると考えられ、グラジオメータのため深部欠陥検出には適さないという課題があった。そこで、我々は、普及しやすいバイクリスタル SrTiO₃ (STO) 基板と YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO) 薄膜をベースとして、高い磁場耐性を有する HTS-SQUID マグネトメータの開発を行ってきた。今回、通常環境での冷却中に HTS 薄膜に磁束がトラップされる現象を抑制するため、薄膜線幅が最大 5 μm となるメッシュ構造を有する HTS-SQUID マグネトメータを設計・作製し、環境磁気によるジョセフソン接合の臨界電流変動の抑制のため、同様のメッシュ構造をもつ HTS 薄膜を超伝導シールドとしてフリップチップ構造で積層した HTS-SQUID マグネトメータを開発した。この HTS-SQUID マグネトメータの特性を、DC および AC 磁場中で測定したので、それらの実験及び結果を以下に示す。

2. HTS-SQUID の設計・作製・評価

本研究では、Fig.1 に示すダイレクトカップル型 HTS-SQUID マグネトメータを設計した。SQUID リングは素子の中心にあり、線幅は 5 μm で、SQUID インダクタンスは約 43 pH である。バイクリスタル粒界を持たないよう 4 個に分割した正方形のピックアップコイルが SQUID リングと直接結合している。ピックアップコイルには、線幅が 5 μm となるようスリットを設けたメッシュ構造となっており、液体窒素冷却時に約 65 μT 以下の静磁場中で冷却しても磁束が薄膜にトラップされにくい構造となっている。一方、ピックアップコイルを分割したため、4 つのスリットから計測磁場が漏れ出すことや、磁束フォーカス効果によりピックアップコイル間に磁束がトラップしやすくなる可能性が考えられたため、この素子に積層する HTS 薄膜として、Fig.1(b)に示す十字型薄膜を超伝導シールドとして設計した。この薄膜をフリップチップ構造で Fig.1(a)に一点破線で示した場所に積層すれば、SQUID リングとピックアップコイル間のスリットが薄膜によってカバーされる。この HTS 薄膜自体にも上記と同様のメッシュ構造を導入し、こちらも線幅を 5 μm とした。これら素子と薄膜を、それぞれバイクリスタル STO 基板、およびノーマル STO 基板に YBCO 薄膜を 200 nm 厚さで蒸着し、前述の一般的なパターンニング技術を用いて作製した。なお、比較のため、メッシュ構造を持たない Fig.1(b)と同形状の HTS 薄膜も作製した。

作製した HTS-SQUID マグネトメータ単体、およびメッシュ構造をもつ HTS 薄膜・メッシュ構造を持たない HTS 薄膜をそれぞれフリップチップ構造で積層した場合の 3 パターンの SQUID 特性について計測を行った。環境磁気雑音の影響をなるべく排除するため、磁気シールドルーム内に 3 重の磁気シールドケースを設置し、この中において SQUID を液体窒素で冷却した。SQUID を冷却する場所の残留 DC 磁場は約 50 nT であった。計測した SQUID 特性は、SQUID の臨界電流 $2I_c$ 、抵抗 $R_n/2$ 、変調電圧 V_{pp} 、磁束ノイズ $S_{\phi}^{1/2}$ である。ここではジョセフソン接合一つの臨界電流と抵抗を I_c , R_n とした。磁束ノイズ

ズは商用 SQUID エレクトロニクスを DC バイアスで用いた。DC 磁場中および AC 磁場中での上記特性を計測するため、SQUID プローブの周辺に円形コイルを設置し、これに電源を接続して DC および AC 磁場を SQUID に印加した。DC 磁場印加の場合、1~500 μT の磁場を SQUID に印加し、SQUID の $2I_c$ を計測した。AC 磁場印加の場合、10 MHz の正弦波を 1~350 nT の実効値振幅まで印加し、SQUID の V_{pp} および $S_{\phi}^{1/2}$ を計測した。

SQUID 単体の $2I_c$, $R_n/2$ と V_{pp} は、それぞれ約 80 μA, 1.4 Ω, 10.7 μV となった。メッシュ構造を持つ、およびメッシュ構造を持たない HTS 薄膜を積層して同様に冷却した SQUID の上記特性は、SQUID 単体の場合とほぼ同様の値を示した。SQUID の磁束ノイズスペクトラムでも 3 種の SQUID ではほぼ同様のノイズレベル・パターンとなったが、SQUID 単体よりも HTS 薄膜を用いた場合の方が、わずかにホワイトノイズレベルは小さかった。Fig.2 に DC 磁場印加中の、3 種の SQUID の $2I_c$ の計測結果を示す。SQUID 単体の場合、印加磁場強度の増加にしたがい $2I_c$ は減少したが、HTS 薄膜を積層した SQUID の場合、約 140 μT 以上の磁場が印加されるまで $2I_c$ の減少が抑制された。薄膜を積層した SQUID を約 40 μT の地磁気中で地磁気を切るように一回転させた結果、回転中に $2I_c$ は変化せず、薄膜の超伝導シールド効果により環境磁場による $2I_c$ の変化が抑制されることが示された。Fig.3 に AC 磁場印加中の 3 種の SQUID の $S_{\phi}^{1/2}$ @ 1 kHz の計測結果を示す。 V_{pp} および $S_{\phi}^{1/2}$ が減少および増加を開始する AC 磁場強度は、メッシュのない薄膜を積層した SQUID の場合が一番大きくなった。これは、薄膜のピン止め力による影響と考えられる。

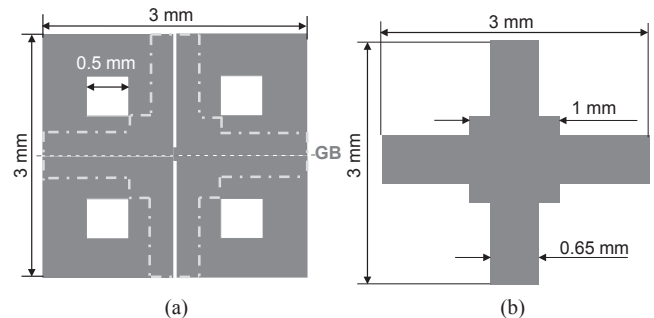


Fig.1 (a) HTS-SQUID magnetometer. (b) Cross-shaped film shield.

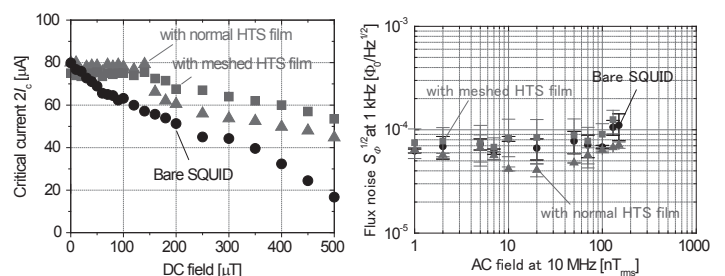


Fig.2 $2I_c$ vs. DC filed.

Fig.3 $S_{\phi}^{1/2}$ vs. AC filed.

参考文献

- [1] 廿日出好, 低温工学 **47** (2012) 345.
- [2] Y. Hatsukade, et al., Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 114010.
- [3] S. Adachi, et al., Physica C **468** (2008) 1936.

高磁場耐性 HTS-SQUID の開発 – 非破壊検査への応用 –

Development of robust HTS-SQUID in magnetic field – NDE application –

廿日出 好 (近畿大学), 鈴木 健文, 田中 三郎 (豊橋技科大)
 HATSUKADE Y. (Kinki Univ.), SUZUKI T., TANAKA S. (TUT)
 E-mail: hatsukade@hiro.kindai.ac.jp

1. 緒言

材料や構造物に発生する深部欠陥の早期検出技術として、高温超伝導 (HTS) SQUID を用いた非破壊検査技術の研究・開発が行われてきた[1,2]。本技術は磁性体などの存在する通常環境中でも適用できることが望ましく、従来は磁気シールドなどの磁気遮蔽環境中で使用してきた HTS-SQUID に高い磁場耐性を付与するための研究が行われてきた[1-3]。近年新たにランジュビョセフソン接合を用いた HTS-SQUID グラジオメータが開発された[4]が、普及には製作コストを下げる必要があり、グラジオメータのため深部欠陥検出に適さないという課題があった。そこで、我々は、低コストで作製可能なバイクリスタル SrTiO₃(STO)基板と YBa₂Cu₃O_{7-x}(YBCO)薄膜をベースとして、高い磁場耐性を有する HTS-SQUID マグネトメータの開発を行ってきた。今回、薄膜線幅が最大 5 μm となるメッシュ構造を有する HTS-SQUID マグネトメータに、同様のメッシュ構造をもつ HTS 薄膜を超伝導シールドとしてフリップチップ構造で積層した HTS-SQUID マグネトメータを開発し、この HTS-SQUID マグネトメータが地磁気中でも安定して動作し、移動させても臨界電流が変化しないことを明らかにした(2D-a02 参照)。そこでこのマグネトメータを小型クライオスタットにマウントしてロボット式非破壊検査装置に搭載し、通常環境中で SQUID を移動させた際の特性を計測・評価した。また、厚い金属材料の深部欠陥検出デモを行い、グラジオメータとの欠陥検出性能を比較した。

2. アクティブシールドを適用した SQUID 非破壊検査装置

今回、学会にて発表予定の 2D-a02 に示す HTS 薄膜を超伝導シールドとしてフリップチップ積層した HTS-SQUID マグネトメータを文献[1]に示す小型クライオスタットにマウントした。クライオスタットのサファイヤロッドと SQUID および積層薄膜基板の接着は銀ペイントを用いた。このクライオスタットを同文献に示すロボットアーム式非破壊検査装置に搭載した。本 SQUID は地磁気中で移動・回転させても地磁気による臨界電流の変化は抑制されるが、ピックアップコイルに鎖交する環境磁気雑音は SQUID リングを通じて電圧として出力される。このとき、エレクトロニクスのスルーレートを超える磁束が鎖交した場合、FLL (磁束ロックループ) 回路のロックが外れて SQUID の動作は不安定となる。そこでこの現象を抑制するため、SQUID 自身の出力電圧を、SQUID 周辺に設置した補償コイルに電流としてフィードバックして、鎖交磁束を打ち消すアクティブシールド (AS) 回路を導入した。この回路のダイアグラムを Fig.1 に示す。ここでは、非破壊検査に用いる 100 Hz 以上の周波数は打ち消さないようにするため、フィードバック回路にカットオフ周波数 10 Hz の 1 次 LPF を適用した。これによりロボットアームの起動時や、SQUID を移動させた際に鎖交する環境磁場雑音中でも、FLL 回路のロックが外れることなく SQUID を移動できるようになった。ロボットにより SQUID を 20mm/s の速度で移動させた際のノイズを Fig.2 に示す。比較のため、アクティブシールドを適用していない場合、および適用して SQUID を固定した場合のノイズを示した。商用電源や建物振動由来と考えられるピークノイズが計測されているが、約 1kHz 以下、特に 100Hz 以下の周波数でアクティブシールドにより磁束ノイズが低減したことが示されている。

3. 厚板サンプルの深部欠陥検出実験

上記装置を用いて、アルミ板の裏面に作った切れ込み欠陥に対して、渦電流法を適用して検出実験を行った。渦電流

発生用の励磁コイルとして、SQUID マグネトメータの位置を調整すればセンサに鎖交する励磁磁場をゼロとできるダブル D コイルを用いた。サンプルの板厚が 5 mm のため、アルミへの侵入深さが約 4 mm となる 400Hz で 3mA の電流をコイルに流してサンプルの励磁を行った。16 mm × 3 mm の表面積をもつ欠陥で、貫通 (裏面からの深さ 5 mm)、表面から欠陥頂上まで 2.5 mm (同 2.5mm)、表面から欠陥頂上まで 3.75 mm (同 1.25 mm) の欠陥の検出実験を行った。この結果、最も深部にある頂上まで 3.75 mm の欠陥由来の信号を測定磁場分布中に検出することができた (Fig.3(a))。次にほぼ同等の検出面積を有する文献[1]記載の HTS-SQUID グラジオメータを用いて、上記と同様の条件で欠陥検出実験を行い、両者の深部欠陥検出性能を比較した。Fig.3(b)に欠陥のサンプル表面からの深さと、それらに対応する欠陥からの信号 SN 比の関係を示した。図に示すように、グラジオメータの場合、マグネトメータと比較して深さに伴う信号の減少率が大きくなった。この結果より、深部欠陥の検出にはマグネトメータの方が適していることを実証した。

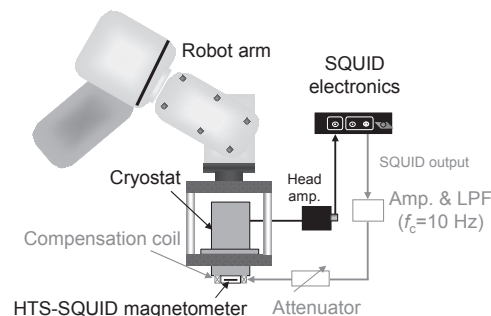


Fig.1 Schematic diagram of active shielding (AS) circuit.

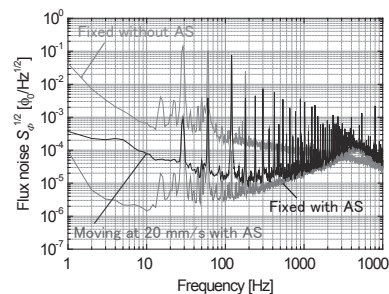


Fig.2 Flux noise spectrum of moving HTS-SQUID with AS.

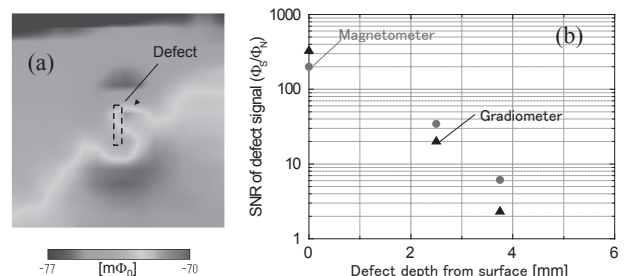


Fig.3 (a) Signal due to inside defect. (b) SNR vs. defect depth.

参考文献

- [1] 廿日出好, 低温工学 **47** (2012) 345.
- [2] 廿日出好, 他, 低温工学 **49** (2014) 439.
- [3] Y. Hatsukade, et al., Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 114010.
- [4] S. Adachi, et al., Physica C **468** (2008) 1936.

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA 用低温設備の開発(7)

—極低温鏡用クライオスタット伝導冷却部の評価—

Development of Cryogenic System for Large-scale Gravitational Wave Telescope KAGRA (7)

—Performance Evaluations of Thermal Conduction of the KAGRA Cryostat—

東谷 千比呂(東北大); 木村 誠宏, 鈴木 敏一, 都丸 隆行, 久米 達哉, 小池 重明 (KEK);
 榊原 裕介, 山元 一広, 陳 たん, 内山 隆, 大橋 正健 (東大)

TOKOKU Chihiro (Tohoku University); KIMURA Nobuhiro, SUZUKI Toshikazu, TOMARU Takayuki,

KUME Tatsuya, KOIKE Shigeaki (KEK); SAKAKIBARA Yusuke, YAMAMOTO Kazuhiro,

CHEN Dan, UCHIYAMA Takashi, OHASHI Masatake (University of Tokyo)

E-mail: tokoku@lms.tohoku.ac.jp

1. はじめに

大型低温重力波望遠鏡 KAGRA は干渉計の要である鏡を 20K まで冷やすことで熱雑音を低減して目標感度の達成を目指している。冷凍機を用いた伝導と輻射の低減により効率よく鏡を冷やす。本講演では、2013 年に行った KAGRA クライオスタット冷却性能試験[1][2]における伝導冷却部の実効的な熱抵抗について評価する。

2. 伝導冷却路の概要

クライオスタット 1 台につき 2 段式パルスチューブ冷凍機を 4 台接続する。4 つの第 1 段コールドヘッドはクライオスタットのアウターシールドへ接続されそれを約 90K に維持する。一方で、4 つの第 2 段コールドヘッドのうち 2 つは鏡へのヒートリンクへつながる「低温懸架系」(Fig. 1 の上、Table 1 の Mirror Line 1 と 2)、他の 2 つは「インナーシールド系」として主に輻射冷却のためにインナーシールドを冷やしそれを約 8K に維持する(Fig.1 の下、Table 1 の Inner-shield Line 1 と 2)。それぞれの系は防振構造を含み、ボルト締結による接続部が数カ所ある。

3. 試験概要

クライオスタット単体での冷却性能試験において、温度センサにより各部(Fig. 1 で T1 から T11)の最低到達温度を測定し、また鏡を含む低温懸架部の熱負荷や干渉計の散乱光による熱負荷に相当する熱を鏡のヒートリンク接続部(に相当する部分)およびインナーシールドの天井部へ与えて各系の温度応答を調べた。この与えた熱[W]により各接続部に生じた温度差[K]によって熱の流れ難さ、すなわち熱伝導抵抗[K/W]を求めた。さらに各系の両端の温度差から系全体の実効的な熱伝導抵抗を求めた。これにより接続部の材質・物性値・構造等に依らない熱伝導抵抗を 4 台のクライオスタットの個々の低温性能として比較・評価できる。

4. 結果

測定で得られた温度から求めた各系の実効的な熱抵抗を Table 1 にまとめた。ここでは、冷凍機から一番遠い末端部(低温懸架系では T5、シールド系では T11)へ 5W の熱負荷を入熱した時の系全体の熱抵抗についての結果のみ示している。

Table 1 Total effective thermal resistances of each of the mirror lines and inner-shield lines.

CRYOSTAT NO.	Thermal Resistance [K/W]			
	NO. 1	NO. 2	NO. 3	NO. 4
Mirror Line 1	0.40	0.20	0.22	0.10
Mirror Line 2	0.08	0.26	0.16	0.22
Inner-shield Line 1	0.24	0.46	N/A	0.36
Inner-shield Line 2	N/A	0.24	0.64	0.50

5. まとめ

KAGRAクライオスタット4台の伝導冷却路について、実効的な熱伝導抵抗を調べた。これらは今後、クライオスタットが干渉計に組み込まれた際の低温性能評価の指標となる。

参考文献

1. C. Tokoku, et al.: Adv. Cryog. Eng. AIP Conf. Proc. (2014) 1573, p.1254-1261
2. C. Tokoku, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.211

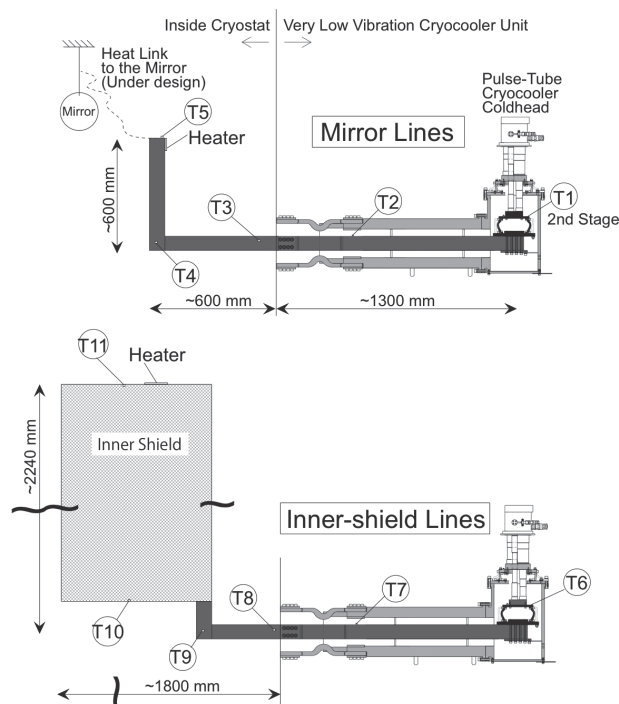


Fig. 1 Sectional view of two conduction cooling lines. The positions of temperature sensors and heaters are shown. All measurements are approximate.

二重管式窒素サーモサイフォン型ヒートパイプの熱輸送限界に関する研究 Study on Heat Transfer Limitation in Double-tube Nitrogen Thermosyphon Heat Pipe

安齋 裕貴, 岡村 哲至(東工大)

ANZAI Hiroataka, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech)

E-mail:anzai.h.aa@m.titech.ac.jp

1. はじめに

浸漬冷却方式による超電導機器の冷却は、蒸発する冷媒を定期的に補充する必要があり、この作業を省くため、GM 冷凍機による直冷方式と浸漬冷却方式を組み合わせた極低温ヒートパイプ冷却方式が考案された。過去の研究において、単管ヒートパイプでの実験を行っており、その熱輸送限界として、フラッシング限界の発生が確認されている^[1,2]。フラッシング限界は、一定量以上の熱が液貯部に入力されたとき、液貯部より蒸発した気体によって、壁面を伝って液貯部に還流する凝縮された液が吹き上げられることで、液貯部の液が徐々に減少し、温度が上昇するものである。本実験では、このフラッシング限界を防ぐため、気液の流れを分離した二重管ヒートパイプによる実験を行い、単管ヒートパイプの熱輸送限界との比較について報告する。

2. 実験方法

Fig.1 に実験装置の概略図を示す。冷凍機を用いてヒートパイプ全体を冷却し、凝縮部温度が窒素の沸点以下になると窒素を供給する。一定量の液体窒素を封入が供給されると、温調器を用いて、凝縮部を所望の作動温度になるよう調整する。温度が定常になったことを確認し、液貯部にヒーターで一定の熱を入力し、各点の温度を記録する。熱輸送が正常に行われている場合、液貯部温度は凝縮部の設定温度付近で安定するが、限界熱輸送量を超える入熱となった場合、液貯部温度は上昇を開始する。本研究では、ヒートパイプ内を可視化していないため、液貯部の温度上昇によって、限界熱輸送量であると判断した。断熱部の管径 5mm, 管長 100mm の単管ヒートパイプ、また同様の単管に内管を挿入した二重管を用いて、実験を行った。

3. 実験結果

凝縮部温度を 77K に設定した単管、二重管に入熱したときの液貯部温度の時間変化を Fig.2, Fig.3 にそれぞれ示す。単管では 23.4W 以下、二重管では 25.3W 以下の入熱量のとき液貯部温度の上昇は見られず、熱輸送が正常に行われている。それ以上の入熱量ではともに温度の上昇が見られ、限界熱輸送量は単管において 22.0W から 23.4W、二重管においては 25.3W から 26.1W の間にあると判断できる。

Fig.4 には、単管と二重管での液貯部温度の上昇開始時間をプロットしたものを示す。また、曲線は仮に再凝縮が行われない場合に液体窒素が液貯部から完全なくなる時間を示している。単管の場合、入熱量が大きくなるにしたがい、曲線に近づく傾向にある。これは、入熱量が大きくなるほど液貯部に還流する液が少なくなることを示しており、フラッシング現象による限界が生じていると示唆される。一方、二重管では、25.3W 以下の熱入力では 2 時間以上温度上昇は見られなかったが、26.1W では、再凝縮がないと仮定した曲線よりも短い時間で温度上昇をはじめた。単管のフラッシング限界とは異なる熱輸送限界が二重管では発生していると考えられる。

参考文献

1. S.Inoue, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 88 (2013) p.214
2. M.Sugimoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 85 (2011) p.116

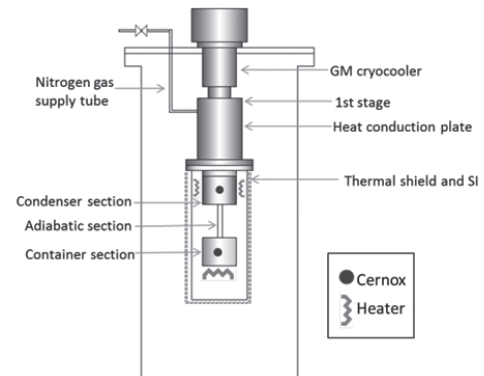


Fig. 1 Experimental apparatus

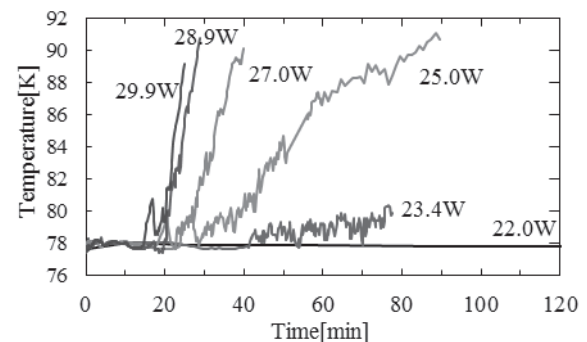


Fig.2 Temperature data of single-tube at 77K

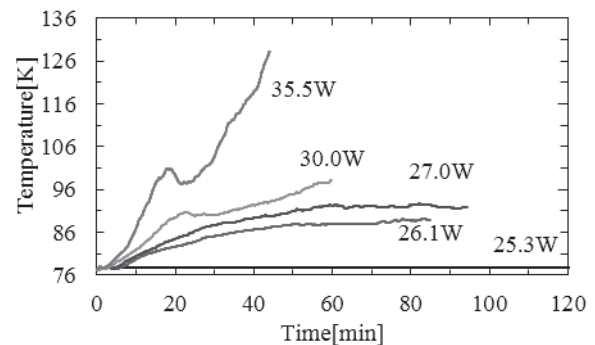


Fig.3 Temperature data of double-tube at 77K

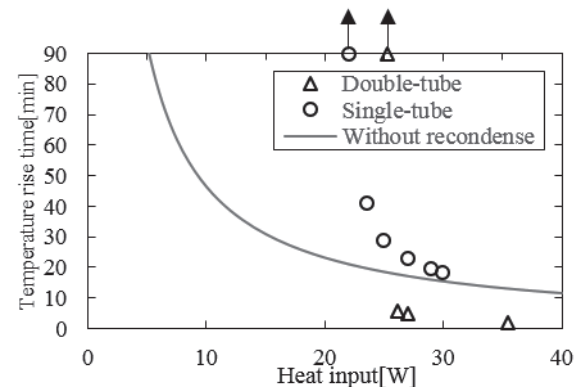


Fig.4 Comparison of temperature rise time

大型超伝導実験用温度可変低温設備

Variable Temperature Cryogenic System for Large Scale Superconducting Experiments

三戸利行, 岩本晃史, 濱口真司, 高畑一也, 高田卓, 森内貞智, 今川信作
 MITO Toshiyuki, IWAMOTO Akifumi, HAMAGUCHI Shinji, TAKAHATA Kazuya, TAKADA Suguru,
 MORIUCHI Sadatomo, IMAGAWA Shinsaku,
 e-mail: mito@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合科学研究所の超伝導マグネット研究棟に平成2年に設置された「超臨界圧ヘリウム発生装置」は、ヘリウム液化能力として 250L/h, 4.5K での冷凍能力 600W, 超臨界圧ヘリウム循環能力として 50g/s を持ち、大型ヘリカル装置の試作開発研究に活躍すると共に、その後の大型超伝導機器開発の共同研究に役立てられてきた。しかし、設備設置から 24 年を経過し、老朽化による更新が必要な時期となった。更新に際してこれまでのヘリウム液化能力、冷凍能力、超臨界圧ヘリウム循環能力を維持すると共に、今後重要となる高温超伝導機器の開発研究にも対応できるように温度可変機能を追加した。本発表では更新設備の概要について説明する。

2. 温度可変低温設備

温度可変低温設備の中心となる冷凍機のコールドボックス部を図1に示す。クロードサイクルにより、旧システムと同等の液体ヘリウムの生成能力及び超臨界圧ヘリウムの循環能力を有している。更に、温度可変冷媒の供給/回収が行えることが本設備の特徴となっている。図1のV1～V5に示した適切な温度領域の弁を選択し、開閉制御することにより、4.5K～300Kの温度制御した冷媒を温度可変冷媒供給口から供給することができる。同時に、温度可変冷媒回収口では、温度領域に応じて V11～V15 の弁を選択し、開閉することにより、寒冷が無駄なく回収される。

本設備のもう一つの特徴として、高圧ガス保安法の適用を受けないガス設備となっていることがあげられる。本設備に接続されるヘリウム圧縮機の吐出圧力は 1MPa 未満であり、圧縮機を含む冷凍機はガス設備となっている。既設の超臨界圧ヘリウム発生装置は、高圧ガス保安法(一般則)の設備であったため、保安検査や保安係員の必要性など、実験設備としての運用には様々な制約が生じていた。温度可変低温設備では同設備に接続する試験コイル等もガス設備となるため、高圧ガス保安法に関する変更申請等の手続きは必要なく、実験の自由度が増している。

3. 整備計画

平成 26 年 12 月までに、冷却する負荷の種類に応じた様々な運転モード等の運用法案の詳細を検討すると共に、既設設備の撤去作業を行う。平成 26 年 12 月～平成 27 年 2 月に更新設備の現地設置工事を行う。平成 27 年 2 月～3 月に試運転を行い、温度可変低温設備の能力を確認して 3 月末に設備を完成する。平成 27 年 4 月以降は、温度可変低温設備の特徴を活かした共同研究等への積極的な活用を期待している。

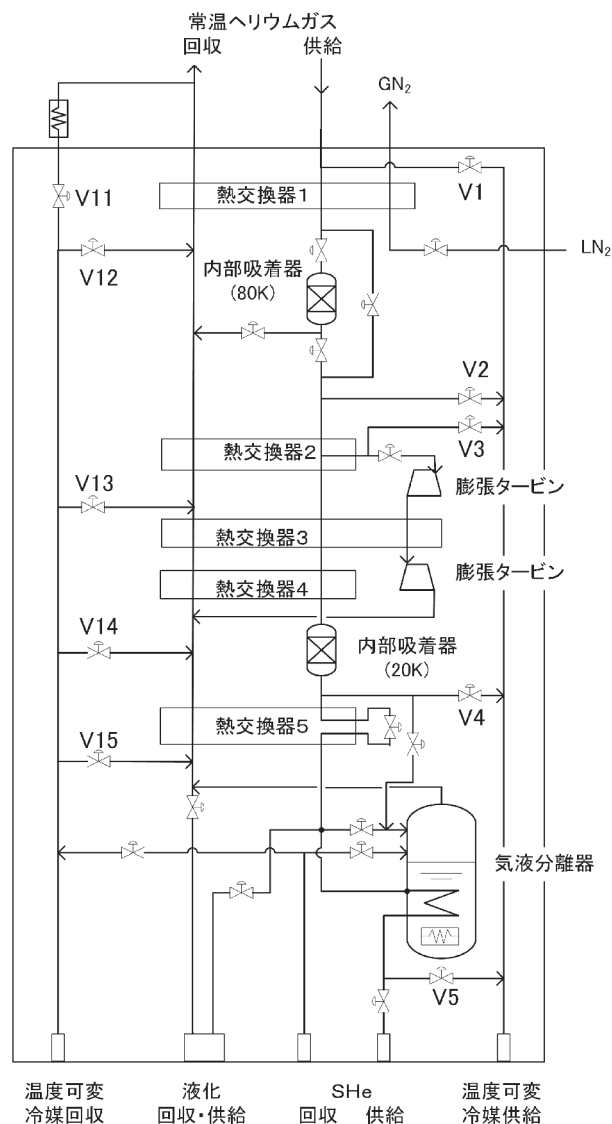


Fig. 1. Flow diagram of the variable temperature cryogenic system

表1. 温度可変低温設備諸元

冷凍サイクル	クロードサイクル
ヘリウム液化能力	250 L/h
冷凍能力	600 W at 4.5 K 350 W at 4.5 K with 50 g/s SHe 1 kW at 20 K - 30 K, 18 g/s 1.5 kW at 40 K - 50 K, 20 g/s
ヘリウム圧縮機	油噴射スクリープ式
	吸入圧力 0.004 MPa(G)
	吐出圧力 0.95 MPa(G)
	流量 101.7 g/s
	消費電力 239 kW

2014 年度 低温技術夏合宿 –77K 小型冷凍機を作ろう–

Summer Seminar on Cryogenic Engineering—the challenge to make a 77K cryocooler–

松本 拓也(神戸製鋼); 大下 将宗(住重); 柁川 一弘(九大); 出口 啓太(ジェック東理社); 包 乾(住重)
 MATSUMOTO Takuya (KOBE STEEL); OSHITA Masahiro (SHI); KAJIKAWA Kazuhiro (Kyushu University);
 DEGUCHI Keita (JECC Torisha); BAO Qian (SHI)
 E-mail: matsumoto.takuya-1@kobelco.com

1. はじめに

低温技術夏合宿は、若手の研究者や技術者を対象とし、超電導や低温技術の理解を深めることを目的として開催されてきた。今回は第3回目となる小型パルス管冷凍機製作の企画となった。物質・材料研究機構にて2014年8月25日から29日までの一週間で学んだ内容や、製作した小型パルス管冷凍機の実験について報告する。

2. 座学

本合宿は座学と小型冷凍機の製作実習により構成される。座学はパルスチューブ冷凍機の原理と実習で製作する冷凍機についての講義、及び冷凍機の応用と計測・安全性などの低温技術についての講義から構成される。

3. 小型パルス管冷凍機の製作

パルス管冷凍機の製作実習は2班に分かれて行った。パルス管冷凍機の諸元を Fig. 1 に示す。A 班が電磁弁、B 班がロータリーバルブユニットを使用し、両班ともに2種の蓄冷材 (SUS メッシュ、Cu メッシュ) について比較実験を行った。

4. 冷却試験および実験結果

Fig.2 において、パルス管のバルブ①、②の接続を切り換えることで、ベーシック、オリフィス、ダブルインレット型に変更することができる。オリフィスやダブルインレットの開度を調整し、各型の動作特性を確認できるよう実験条件を調整しながら目標到達温度 77K を目指した。

ダブルインレット型における各班の最低到達温度を Table.1 に示す。上述の3型については、いずれの冷凍機においてもダブルインレット型が最も冷える結果となった。今回の合宿では、A 班(電磁弁)が蓄冷材に Cu メッシュを用いた冷凍機において、最低到達温度 65K を記録し、これが最も冷える結果となった。

5. おわりに

今回の夏合宿では初めて小型パルス管冷凍機の製作に取り組んだ。座学だけではなく、自らの手で冷凍機を製作することで、冷却原理や構造をより理解することが出来た。特に構造のシンプルさや微妙な調節で温度が変化する“奥深さ”を実感した。なにより講師の方々や受講者同士のつながりができたことは、受講者にとって貴重であった。今後もこのような実習が継続されることを希望する。

6. 謝辞

今回の合宿に参加するにあたり、物質・材料研究機構 西島元氏、産業総合研究所 淵野修一郎氏、大陽日酸 平井寛一氏、松原洋一氏、住友重機械工業 許名堯氏、ColdTech 上岡泰晴氏、東京農工大学 上田祐樹氏、産業技術総合研究所 古瀬充徳氏、高エネルギー加速器研究機構 細山謙二氏、クライオウェア 藤岡耕治氏には座学および製作実習を通じて貴重な知識と技術をご教授賜りました。この場をお借りして講師の皆様へ深く感謝申し上げます。

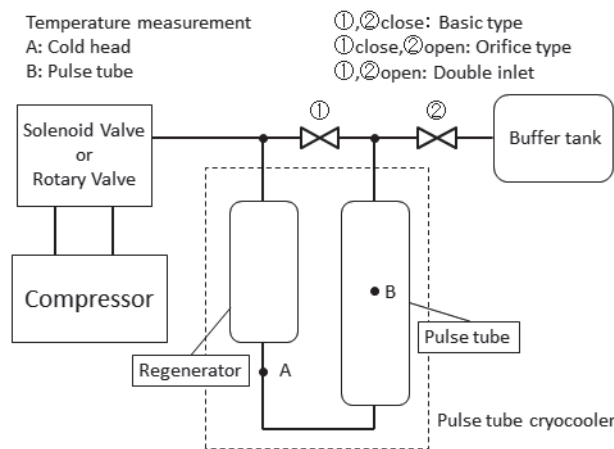


Fig.2 Schematic diagram of the cooling test

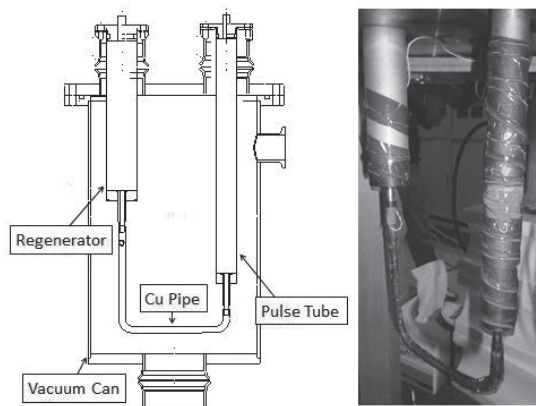


Fig.1 Schematic and picture of the Pulse tube cryocooler

Table.1 Minimum temperatures obtained by various conditions(Double inlet type)

Valve unit	Regenerator	Minimum temperature
Solenoid valve (A group)	SUS #300	71 K
	Cu #200	65 K
Rotary valve (B group)	SUS #300	82 K
	Cu #200	92 K
	Cu #100	105 K

Shuttle Chef™ による空気液化 — 夏休み科学体験教室に於ける試み — Air liquication using Shuttle Chef™ —Trial for summer sicence class—

星野 勉, 辰口 弘太郎, 長利 海杜, 武田 涼, 坊良 駿太, 吉羽 恒太, 西原 太一, 宮下 隼貴 (明星大)

HOSHINO Tsuotmu, TATSUGUCHI Koutarou, OSARI Kaito, TAKEA Ryo, BOURA Shunta,

YOSHIBA Kota, NISHIRARA Taichi, MIYASHITA Hayaki (Meisei Univ.)

E-mail: thoshino@ec.meisei-u.ac.jp

1. はじめに 本学では、2004年から、小中学生を対象とした夏休み科学体験教室を開催している。「液化窒素と超電導」も担当者を変えながら4年目を迎えた。学部1年生が先生役となり、卒研究生、大学院生がサポートする体制である。実験内容は、気体の圧縮膨張、固体の硬化、凍結粉碎、酸素の燃焼効果、液化空気の観察、液化酸素(LO₂)の磁化と色、バルク体浮上である。その準備の過程において、空気からLO₂を得ようとして、液化空気を得たので、その概要を報告する。

2. 空気液化方法 従前の体験教室では、Fig.1に示すように、金属容器に液化窒素(LN₂)を満たし、容器表面の空気濡れ面で、液化する酸素を捕集していた。濡れ面積や面角度によって、集率が大きく変わる。今回、真空調理器であるShuttle Chef™ KBA-3001を用いて、空気液化を行った。その手順は、1) 調理鍋にLN₂を1L入れ、予冷する。この時、鍋底で膜沸騰から核沸騰へ遷移する様子が観察できる。2) 調理鍋の予冷と共に保温容器にLN₂を2Lを満たし、調理準備をする。調理鍋のLN₂が核沸騰へ遷移したら、調理鍋に空気を満たす(調理鍋のLN₂を保温容器に空ける)。3) 調理鍋を保温容器に吹き零れないよう、ゆっくり入れて、30分程調理を(放置)する。この時、Fig.2に示すように、保温容器・調理鍋ともに蓋をしない。

調理鍋の上縁から霜が付き始めるが、数分で鍋底には、液体が溜まり始める。更に時間が経過するとFig.3に示すように、液体下に白いフレーク状の固体が現れる。液体は、窒素と酸素の混合物であり、固体アルゴン(SAr)も生成していると考えられる。液体は無色であり、青みがかったはいない。

液体を調理鍋から発泡スチロールの保温容器(いわゆるスチロール井)に取り分けると、窒素から気化して行き、液化酸素LO₂が残るので、徐々に青みがかってくる。調理鍋を保温容器から取出し、室温に曝しておく、窒素、酸素の順に蒸発して行き、SAr様のものが鍋底に残る。

3. 結果と考察 空気成分の大気圧下における沸点をTable 1に示す。超伝導・低温工学ハンドブック [2]の図2-18空気の比体積からは、空気の0.1 MPaにおける飽和蒸気温度は82 Kと読み取れる。すなわち、LN₂で冷却されていて78 K程度になっている面に接している空気は、O₂やArが液化されるのではなく、混合気体である空気が液化されるものである。

なおArの0.1 MPaにおける融点は83.8 K[3]であるので、液化空気中のLArは固相へ相転移していると考えてよい。LO₂だけを収集するには、空気との接触面を85 K程度にするか、捕集容器の温度を85 K程度に保ち、生成するLN₂, SArを気化させる必要がある。

4. おわりに 市販の真空調理器Shuttle Chef™により、空気が液化出来る事が示された。得られたLN₂, LO₂混合体は無色に近く、LO₂の発色は見られない。

開放容器等で、液化窒素が空気に触れる状態であると、LO₂, SArがLN₂中に蓄積されていくと考えられる。このため、長

Table 1 Saturated vapor temperature under atmospheric pressure (101.3 kPa).

Contents	Barron[1]	NAOJ[3]
He	4.212 K	4.22 K
H ₂	—	20.28 K
N ₂	77.36 K	77.36 K
Air	78.8 K	—
Ar	87.28 K	87.3 K
O ₂	90.18 K	90.2 K

期間放置したLN₂にはLO₂, SArが含まれており、SArが配管を詰まらせたり、LO₂により急激な酸化反応が起こる可能性があり、その取扱には注意を要する。

参考文献

1. R.F. Barron: "Cryogenic Systems", Oxford Univ. Press (1985) 473 – 476
2. CAJ: "Handbook of Superconductivity and Cryogenic Engineering", Ohm (1993.11) 1041
3. NAOJ: "Chronological Scientific Tables", 83, Maruzen (2009.11) 395



Fig.1 Photograph of LO₂ collector.



Fig.2 Photograph of cooking air.



Fig.3 SAR remained on the vessel bottom.