

走査型プローブ顕微鏡用ヘリウム循環冷却システムの熱解析

Thermal analyses of a helium circulation cooling system for scanning probe microscopes

寺岡 総一郎(東大);横田 統徳, 佐々木 徹, 宮武 優(ユニソク);福山 寛(東大)

TERAOKA Soichiro (The Univ. of Tokyo); , YOKOTA Munenori, SASAKI Toru, MIYATAKE Yutaka (UNISOKU);

FUKUYAMA Hiroshi (The Univ. of Tokyo)

E-mail: teraoka.soichiro@mail.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

極低温で原子レベルの空間分解能をもつ走査トンネル顕微鏡など各種の走査プローブ顕微鏡(SPM)は、基礎研究の分野で広く使われており、液体ヘリウム浸漬式冷却が主流である。これをパルス管冷凍機に置き換えることができれば、極低温 SPM の応用範囲が拡がり、長時間連続測定による分解能向上のメリットもある。我々が開発中の SPM 用ヘリウム循環冷却システムのプロトタイプについて、今回は数値シミュレーションによる熱解析結果を中心に設計の概要を報告する。

2. 設計の概要

SPM は振動に極めて敏感なため、SPM ヘッドを直接パルス管冷凍機で冷却することは得策でない。そこで、冷凍機ユニットを SPM ユニットから独立させ、低熱損失・低振動の液体ヘリウム移送管で結ぶ循環冷却(フロー)方式とする。移送管内の送液管は銅フォイルの輻射シールドで囲み、SPM 内セパレータからの蒸発ヘリウムガスの一部を帰還させることでシールドを冷却して、送液管への輻射熱と伝導熱を低減する。移送管の内部構造は、製作の容易さと信頼性のため、できるだけ単純化する。冷凍機ユニット内に差し込まれる部分のシールドは、冷凍機 1st ステージと熱接触させて冷却する。

移送管の真空ジャケットのコーナー部には、図 1 に示すように内部が真空でも柔軟性を保てるようなベローズ 2 組と支持棒からなる T 字型除振機構を配して、冷凍機から SPM への振動伝達を防ぐ。

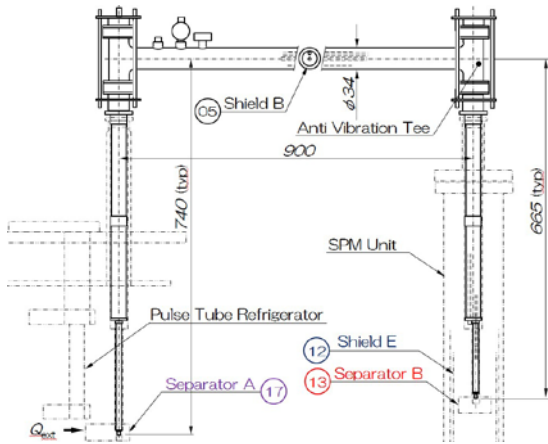


Fig.1 Schematic drawing of the helium transfer tube

3. 数値解析モデル

有限要素法の熱解析を行うため、SPM ユニット、移送管および冷凍機ユニットを 21 の要素に分割し、室温部も含めそれぞれに通し番号 i ($=1,2,3, \dots, 21$) を付番した。要素 i から要素 j への入熱を Q_{ij} で表す。 Q_{ij} は輻射熱、固体伝導熱、冷凍機による吸熱、およびヒータによる加熱の和である。時刻 t における要素 j の温度を $T_j(t)$ とする。 i について $Q_{ij} - Q_j$ の総和を取ると、要素 j の熱収支 Q_j が得られる。これに要素 i から要素 j に流れる循環ガスのエンタルピー変化 $(dm/dt)\Delta H_{ij}$

を加えれば、時刻 $t + dt$ における温度は $T_j(t + dt) = T_j(t) + [Q_j + (dm/dt)\Delta H_{ij}]/(m_j c_j)$ で求まる。ここで、 m_j と c_j はそれぞれ要素 j の質量と比熱である。熱伝導率、比熱および冷凍機の冷却力の温度依存性も考慮した。なお、冷凍機ステージの熱容量に伴う時定数は、文献[1]を参考にシミュレーション結果と比較して経験的に選定した。

4. 数値解析結果

図 2(a)に、いくつかの代表要素の温度 T_j の時間推移をシミュレーションした一例を示す。制御パラメータは、セパレータ A のヒータ加熱量 Q_{ext} と流量調整弁のコンダクタンス S_v で、これらがヘリウムガスの循環質量流速 (dm/dt) を決める。それぞれの制御過程を図 2(b)に示した。定常状態の dm/dt 値は、現に液相が存在する部分への入熱の合計を Q_{cond} とすると、蒸発率 Q_{cond}/h_l に一致する。ここで h_l はヘリウム-4 の飽和状態における蒸発潜熱である。循環流量の制御は、実効排気速度 S_{eff} を目標値 $S_0 = RT_0/(P_{in}M) \times (Q_{cond}/h_l)$ とする比例制御とした。このとき S_v は $S_v = S_p S_{eff}/(S_p - S_{eff})$ と決まる。ここで R は気体定数、 T_0 は室温、 P_{in} はポンプ吸入圧、 M はヘリウム-4 の原子量、 S_p はポンプ排気速度である。ここでは、 $S_p = 30\text{L/min}$ 、パルス管冷凍機は 1W@4K のものを想定した。

この例では、室温から冷却を開始して約 40 時間後にセパレータ B の温度が 4 K に到達している。これは、 Q_{ext} 制御を最適化すればもっと短縮できるであろう。また、定常状態を維持できるパラメータ範囲を探るため Q_{ext} を単調減少したので、5400 min 以降で急昇温している。定常状態では、循環質量流速は液換算で 0.27 L/h、室温から移送管内の送液管への流入熱と Q_{ext} の合計は 0.08 W/m と見積もられる。過去の類似の移送管の 0.2 W/m[2]より低損失が期待される。

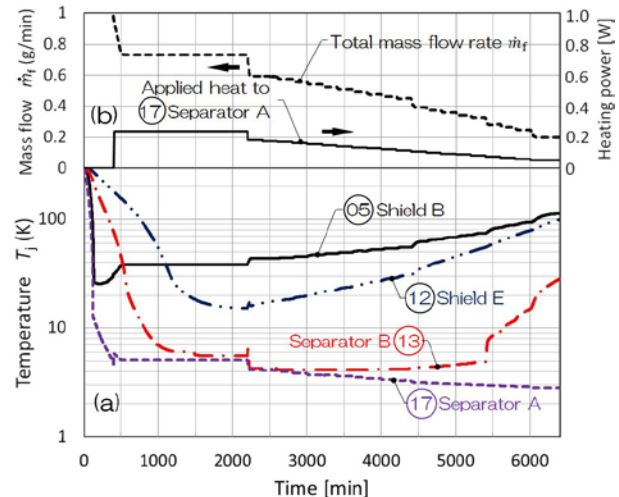


Fig.2 Simulation results: time evolutions of (a) temperatures of various elements and (b) control parameters in the helium circulation system for SPM.

参考文献

- G. Thummes, et al.: Cryogenics Vol. 38 (1998) p.337
- T. Takeda, et al.: Cryogenics Vol. 48 (2008) p.6