

(Form 3)

## Summary of Doctoral Thesis

Name in full Ramnarong WANISON

Title The Cryogenic Parallel Heat Pipe System for Application to Conduction Cooled Superconducting Magnet

High Energy Accelerator Research Organization, known as KEK, whose purpose is to operate the largest particle physics laboratory in Japan. Numerous experiments have been constructed at KEK especially cryogenic science and engineering that involve the study of very low temperatures in order to support accelerator science research mostly for superconducting magnet. A superconducting magnet must be cooled to cryogenic temperatures during operation therefore, a cooling system is necessary. A cryogenic heat pipe can be proposed for application to conduction cooled superconducting magnet to improve efficacy of cooling system. However, a cryogenic heat pipe has operation limits such as low maximum heat transport capability,  $Q_{max}$ . The parallel heat pipe system, which is composed of a combination of individual heat pipe, can enhance the performance of a single heat pipe with respect to  $Q_{max}$  and expand the operating temperature range.

It is the experimental study to survey thermal behavior of cryogenic heat pipes under condition of a wide range of heat load and of heat pipe operating states; from the normal heat pipe operation to the local dry-out state. The heat pipes tested were commercially available ones but working fluid was replaced by nitrogen or argon or neon to work at cryogenic temperatures. The size of the tubular copper heat pipe is; 6 mm in outer diameter and 200 mm in length. The thermal performance of the heat pipes were examined together with the effects of the working fluid filling ratios, the inclination angle, the condenser temperatures as well as the wick structures; axial groove (G), sintered metal powder (S), and combination of them (GS). The parallel heat pipe system, which consists of a N<sub>2</sub>-heat pipe and an Ar-heat pipe, or of a Ne-heat pipe and a Ne-heat pipe arranged in parallel, was tested in order to investigate the thermal performance for extending the operating temperature ranges. Effective thermal resistance, axial temperature distribution and pressure inside the heat pipes were measured for a wide range of heat load. The thermal behavior in the film boiling and even the local dry-out states for large heat input was also examined for the potential application to a conduction-cooled superconducting magnet.

It was experimentally confirmed that the commercially available conventional heat pipes with working fluid replaced with nitrogen or argon or neon could operate normally at temperatures of 63 – 87 K, 83 – 110 K and 27 – 35 K respectively. The prediction of the heat pipe operation at near the critical temperature shows that the value of the

maximum heat transport capability,  $Q_{max}$ , becomes very small since the value of latent heat of vaporization becomes zero at the point. The filling ratio of working fluid should be higher than 50% to activate the cryogenic heat pipe, and the working fluid filling ratios considerably affect  $Q_{max}$  of the heat pipe. The gravity force acting on the excess liquid puddle accumulated in the end portion of the condenser section causes increasing of  $Q_{max}$  in cases of the filling ratio larger than 100 %. The inclination angle of higher than 10 degree when the evaporator section is below the condenser section can much enhance the value of  $Q_{max}$ . The minimum value of the overall thermal resistance,  $R_{th}$ , which appeared during the normal heat pipe operation, was 0.20 K/W, 0.25 K/W and 0.12 K/W for the N<sub>2</sub>-heat pipe, the Ar-heat pipe and the Ne-heat pipe, respectively. It was found that the effective thermal conductance was approximately 150 times superior to that of the heat pipe without working fluid filled where heat transferred by conduction through the copper tube wall, and 75 times superior to that of simple copper rod having the same diameter and length as the heat pipe. The performance rank by the wick structures on the basis of  $Q_{max}$  is as follows in descending order; GS, S and G. It was the results of the experiments that the N<sub>2</sub>-heat pipe, the Ar-heat pipe and the Ne-heat pipe with GS wick structure and 100% filling ratio had the values of  $Q_{max}$ , 12.0 W, 14.0 W and 7.0 W, respectively. The parallel heat pipe can enhance the performance of the single heat pipe in term of  $Q_{max}$ , which was 29.0 W that can be obtained at the operating temperature of 87 K. It was seen that even in the local dry-out state the heat pipe still has high heat transfers rate compared to solid copper. This may indicate it can be utilized for cooling of superconducting magnet from high temperature.

It is experimentally confirmed that the commercially available conventional heat pipe can be utilized as a cryogenic heat pipe for the application to conduction cooled superconducting magnets. It was demonstrated that the wide range of cryogenic heat pipe operation consisting not only of the normal heat pipe operation but also the local dry-out state is effective for thermal management owing to very small temperature gradient and cooling from high temperature.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏 名 Ramnarong WANISONTitle  
論文題目 The Cryogenic Parallel Heat Pipe System for Application to Conduction Cooled Superconducting Magnet

本研究の対象にしているヒートパイプとは、封じきられた“パイプ”の中に適量の凝縮性流体を入れ、吸熱（高温）側での蒸発と放熱（低温）側での凝縮によって対流を発生させて熱の輸送をする伝熱要素である。凝縮後の液体の吸熱側への移動を促進するため、パイプの内表面は“ウィック”と呼ばれる毛細管構造となっている。その優れた熱輸送特性（高い等価熱伝導率）を生かし、水を作動流体とするものが室温域で、カリウムやナトリウムを作動流体とするものが数百度以上の高温域で伝熱部品として実用されている。さらに、 $-200^{\circ}\text{C}$ 以下の極低温領域でも、超伝導磁石などの伝導冷却材としての活用を目指して、ヘリウムや窒素の液化ガスを作動流体とするヒートパイプの研究が進められており、本研究もこれに分類される。

本研究では、水を作動流体として設計された市販の銅製ヒートパイプに大気圧での凝縮温度が  $87\text{ K}$  のアルゴン、 $77\text{ K}$  の窒素及び  $27\text{ K}$  のネオンを作動流体として充てんしたヒートパイプを研究対象にしている。銅丸管の内表面に長手方向の微細溝加工したタイプ、内表面を焼結銅で覆ったタイプ及び溝加工のさらに内径側を焼結銅層で覆う複合タイプの 3 種類のウィック構造のヒートパイプを調達し、ヒーター加熱される吸熱側から液体窒素やヘリウム小型冷凍機で冷却された放熱（凝縮）側への熱流の状況を、温度分布や圧力の測定を通じて解析している。放熱側は、実験中一定の温度を保つように、冷凍機や液体窒素の寒冷能力を調整する工夫がされている。

実験では、ウィック構造のタイプ、充てんする流体の量や放熱側の温度を変えて、吸熱・放熱間の温度差（熱抵抗）や限界熱（加熱量が増えていくと吸熱部の温度が急激に立ち上がる現象）のデータを主に収集している。3 つのウィック構造のヒートパイプの限界熱は概ねこれまでのヒートパイプの計算式からの予測と傾向は一致していることを確認した。一方で加熱前ウィック部全体が液相で満たされた状態を充てん率 100%と定義すると、水では 100%で最も低くなる熱抵抗がアルゴンや窒素では約 85%の時に最小になることが観測されている。さらに有効温度の異なる作動流体のヒートパイプ（アルゴンと窒素）を並列の配置することによって、ヒートパイプとして作動する有効温度範囲が拡大できることを実証した。また、加熱側がヒートパイプ有効温度以上の状況でも、放熱側で部分的にヒートパイプのメカニズムが機能し、全体としての熱抵抗は通常の伝熱板（純銅板など）より低くなることを実測している。

以上の実績から、本論文では、予冷速度など伝導冷却タイプの超伝導磁石の冷却性能を向上する技術要素として、低温流体を封入したヒートパイプの有効性を示している。

出願者は英語で上記実験内容を公開発表し、質疑にも滞ること無く回答した。現在まで

に複数の国際会議（peer review 付き）で発表を行っており、十分な英語能力を有していると判断する。論文も予備審査で指摘された、①充てん用配管体積がヒートパイプ性能に及ぼす影響を定量的に解析しておくこと、②限界熱の計算式の再確認、③限界熱の要因を掘り下げて分析すること、という点に関して改善されており、研究内容を十分理解していると判断する。

以上のことから、審査委員全員一致で Wanison 氏の博士論文本審査を合格と判定する。