

QWR 型超伝導加速空洞のためのクライオモジュールの熱侵入の見積り

HEAT FLOW ESTIMATION OF THE CRYOMODULE FOR SUPERCONDUCTING QUARTER-WAVELENGTH RESONATOR

大関和貴^{#, A)}, 加古永治^{B)}, 上垣外修一^{A)}, 仲井浩孝^{B)}, 奥野広樹^{A)}, 坂本成彦^{A)},

仙入克也^{C)}, 須田健嗣^{A)}, 梅森健成^{B)}, 山田一成^{A)}, 柳澤剛^{C)}, 渡邊裕^{A)}

Kazutaka Ozeki^{#, A)}, Eiji Kako^{B)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Hirotaka Nakai^{B)}, Hiroki Okuno^{A)}, Naruhiko Sakamoto^{A)},
Katsuya Sennyu^{C)}, Kenji Suda^{A)}, Kensei Umemori^{B)}, Kazunari Yamada^{A)}, Takeshi Yanagisawa^{C)}, Yutaka Watanabe^{A)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

^{B)} KEK

^{C)} Mitsubishi Heavy Industries Ltd.

Abstract

In order to develop the elemental technology for the superconducting linear accelerator for ions, the construction of accelerator system based on superconducting quarter-wavelength resonator is now being carried out. In this system, the cryocoolers are used as a cooling equipment for the thermal shields. For the decision of the number of thermal shields and the selection of the cryocoolers, the heat flows into the thermal shields and cavity were estimated. As a result, we decided to install single thermal shield. In this contribution, the details of heat flow estimation is reported.

1. はじめに

理研仁科センターでは、陽子や重イオンを大強度で加速するためのイオン用超伝導線形加速器の要素技術開発を目的として、四分の一波長共振器(QWR)型の超伝導加速空洞システムの製作を進めている。試作機として、QWR 空洞を 2 台搭載可能なクライオモジュール 1 基の製作を行う。本システムでは、低温の取り扱いを容易にするために、ヘリウムの再凝縮装置と熱シールドの冷却装置として小型冷凍機を使用することと決した。本稿では、熱シールドおよび加速空洞への熱侵入の見積りを元に、熱シールドの設置数、使用する小型冷凍機の種類について比較検討を行った結果を報告する。

2. 熱侵入の見積り

QWR 空洞の設計値を表 1 に示す。ヘリウム再凝縮のための小型冷凍機として、4 K において 4 W の冷凍能力を持つ GM-JT 冷凍機を 3 台使用し、合計 12 W の冷凍能力を持たせることを考えている。空洞 1 台につき許容される熱侵入の量は、RF パワー損失も含めて 6 W に制限される。

熱侵入の見積りに際して、二重の熱シールドを設置して二段式の小型冷凍機の各段に熱接触させる場合と、一重の熱シールドを設置して単段式の小型冷凍機に熱接触させる場合について比較検討を行った。それぞれの段数の小型冷凍機を使用する場合に想定される熱シールドの温度と、その温度下で想定される冷凍能力を表 2 に示す。熱シールド用の小型冷凍機は、必要に応じて複数台設置するものとする。

Table 1: Design Parameters of the Superconducting QWR Cavity

Frequency	75.5 MHz
Duty	100%
Cavity inner diameter	300 mm
Cavity height	1055 mm
Gap length g	60 mm
Gap voltage V_{gap}	800 kV
β_{geom} of cavity	0.08
Beam aperture a	40 mm ϕ
Synchronous phase for β_{geom}	-25 deg.
TTF for $\beta_{\text{geom}} = 0.08$	0.9
Operating temperature T	4.5 K
Q_0	9.3×10^8
Shunt impedance R_a	$6.7 \times 10^{11} \Omega$
$G = Q_0 \times R_s$	23.3 Ω
R_a / Q_0	714 Ω
R_a / Q_0 for $\beta_{\text{geom}} = 0.08$	573 Ω
Surface resistance $R_s = R_{\text{BCS}} + R_{\text{res}}$	25 n Ω
RF power loss P	3.84 W
E_{acc}	4.5 MV/m
$E_{\text{peak}} / E_{\text{acc}}$	6.3
$B_{\text{peak}} / E_{\text{acc}}$	10.6 mT/(MV/m)

[#] k_ozeki@riken.jp

Table 2: Assumed Temperatures of Thermal Shields and Cooling Powers for Single and Double Stage Cryocoolers

# of stages	Double	Single
20 K	8 W	-
40 K	-	100 W
80 K	28 W	-

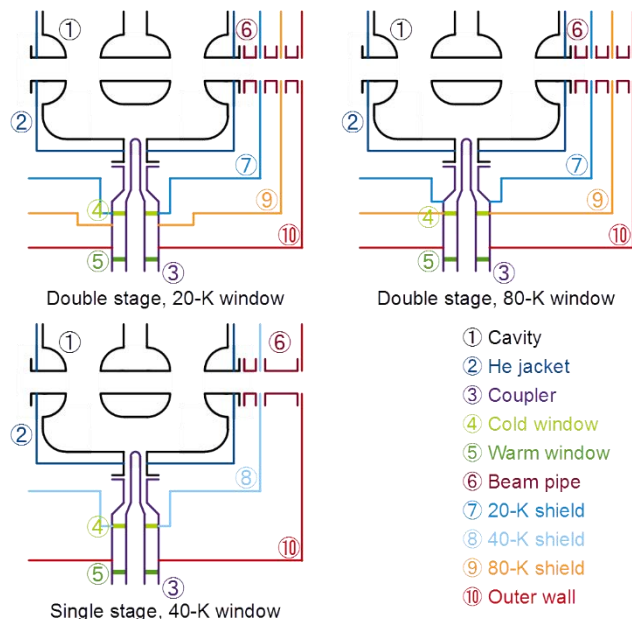


Figure 1: Schematic view of the cavity, He jacket, coupler, beam pipes, thermal shields, and outer wall for the double-stage (20-K window and 80-K window) and single-stage (40-K window) cryocooler.

2.1 静的な熱侵入

空洞や熱シールドと接触した構成要素からの熱伝導の主な経路としては、カプラーとビームパイプの2つが挙げられる。

カプラーは同軸形状とし、低温部とクライオモジュール外側の常温部に真空窓を持つ、二重窓の構造を取ることに決した。低温真空窓は、カプラーに設ける熱アンカーの近傍に配置する。低温真空窓の温度は、二段式の小型冷凍機に対しては 20 K と 80 K の 2 通り、単段式の小型冷凍機に対しては 40 K を仮定した(図 1 参照)。例として、二段式の小型冷凍機を用い、低温真空窓を 80 K とする場合に仮定したカプラーの形状を図 2 に示す。外部からの熱侵入を低減するためにカプラーの材質は 2 mm 厚のステンレスとし、冷却時の位置ずれを補償するために適宜ベローズを配した。ベローズは、常温側からの熱伝導を抑える効果も併せ持つ。

更に、RF パワー損失を低減するために表面に銅メッキを施す。75.5 MHz の RF に対する銅の表皮厚さが約 15 μm であることから、銅メッキの厚さを 20 μm とした。ステンレスと銅の熱伝導率は、参考文献

献[1]で公開されている数値を使用した。ここでは銅の残留抵抗比(RRR)を 30 とした(図 3 参照)。

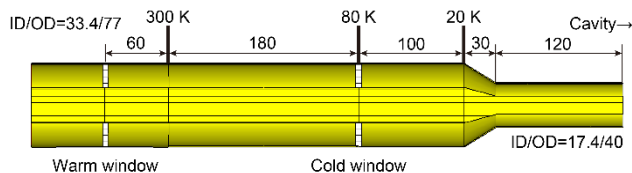


Figure 2: Schematic view of the coupler for the case of double-stage cryocooler, 80-K window.

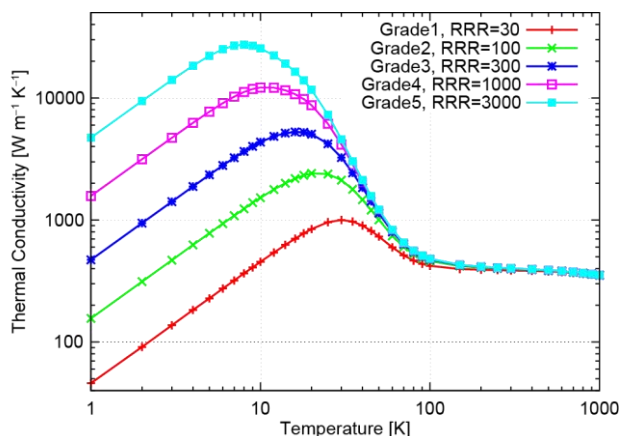


Figure 3: Thermal conductivities of copper with various RRR's.

小型冷凍機の段数に応じて、ビームパイプには熱アンカーを 1 ないし 2 ヶ所設けた(図 1 参照)。冷却時の位置ずれ補償および常温側からの熱伝導の低減のために適宜ベローズを配した。

この他の熱侵入の経路としては、クライオモジュール内の各構成要素を支持するための機構や温度センサーの配線に加え、QWR 空洞(4 K 系)に対しては、ヘリウム供給系の配管が挙げられる。仮定した温度センサーの取り付け数量を表 3 に示す。

Table 3: Assumed Number of Temperature Sensors Attached on Each Region

# of stages	Double	Single
4 K	20	20
20 K	10	-
40 K	-	20
80 K	20	-

熱輻射の見積りを行う上では、クライオモジュール外壁、熱シールドについて、円筒が全面を囲っている形状を仮定した。それぞれの円筒の形状を表 4 に示す。外壁から 80 K ないし 40 K の熱シールドへの熱輻射を低減するために、それぞれの熱シールドを断熱材(スーパーインシュレーション)で包むものとした。

Table 4: Assumed Sizes of Cryomodule and Thermal Shields for Single and Double Stage Cryocoolers

# of stages	Double	Single
Cryomodule	1040φ × 1790H	
20 K	840φ × 1520H	—
40 K	—	840φ × 1520H
80 K	920φ × 1630H	—

加えて、カプラー内導体から外導体への熱輻射の見積りを行った。内導体から外導体に輻射で伝わった熱は、その部位に応じて QWR 空洞ないし熱シールドに流入する。実際のところ、内導体は低温真空窓と接触して先端部が低温に保たれるため、内導体先端部からの熱輻射は無視できるほど小さかった。

2.2 動的な熱侵入

QWR 空洞内に RF を供給した時のパワー損失は、QWR 空洞本体(表 1 参照)の他に、カプラーにおいて発生する。カプラーで失われた RF パワーは、その部位に応じて QWR 空洞ないし熱シールドに流入する。カプラーでの RF パワー損失を、CST Microwave studio^[2]を用いて計算した。計算結果の一例を図 4 に示す。カプラー表面の銅の温度は、表 5 に示すように各部位で一定と仮定した。各温度における電気伝導率は、熱伝導率の数値より Wiedemann-Franz 則を用いて求めた。RRR=30 の銅の電気伝導率の温度依存性を図 5 に示す。ここで出力された結果を元に、使用時の供給パワーを 10 kW とした場合の RF パワー損失の見積りを行った。

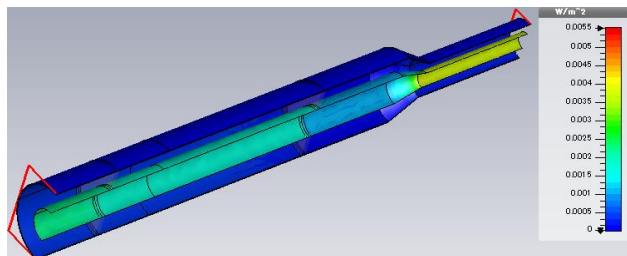


Figure 4: An example of the surface power loss computed by CST Microwave studio.

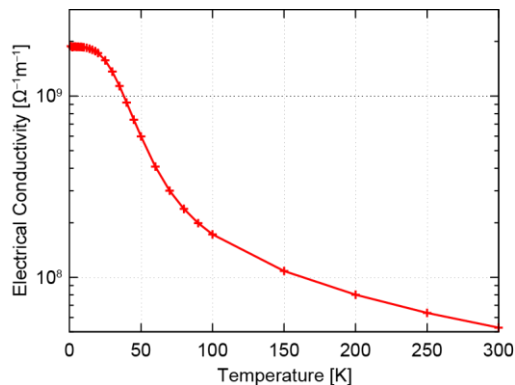


Figure 5: Electrical conductivity of copper with RRR=30.

Table 5: Assumed Temperatures and Electrical Conductivities at Each Region in the Coupler for Three Cases

Double-stage Cryocooler, 20-K Window				
Outer conductor		Region	Inner conductor	
Assumed Temp. [K]	Elec. Cond. [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]		Assumed Temp. [K]	Elec. Cond. [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]
200	8.01×10^7	300 K	150	1.08×10^8
50	5.99×10^8	80 K		
10	1.86×10^9	20-K win.		
		4 K	20	1.73×10^9

Double-stage Cryocooler, 80-K Window				
Outer conductor		Region	Inner conductor	
Assumed Temp. [K]	Elec. Cond. [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]		Assumed Temp. [K]	Elec. Cond. [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]
200	8.01×10^7	300 K	200	8.01×10^7
50	5.99×10^8	80-K win.	80	2.38×10^8
10	1.86×10^9	20 K		
		4 K		

Single-stage Cryocooler, 40-K Window				
Outer conductor		Region	Inner conductor	
Assumed Temp. [K]	Elec. Cond. [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]		Assumed Temp. [K]	Elec. Cond. [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]
150	1.08×10^8	300 K	150	1.08×10^8
20	1.73×10^9	40-K win.	40	9.22×10^8
		4 K		

3. クライオモジュールの構成

上述した熱伝導の見積りを表 6-8 にまとめる。表中の数字は、QWR 空洞 1 台当たりの熱侵入量(W)である。この表を基に、クライオモジュールの構成について比較検討を行った。二段式の小型冷凍機を用いて低温真空窓を 20 K とする場合(表 6 参照)は、20 K 系への熱流入が多くなり、空洞 2 台分に対しては、想定する小型冷凍機 1 台では冷凍能力が不足する(表 2 参照)。同様に、二段式の小型冷凍機を用いて低温真空窓を 80 K とする場合(表 7 参照)も、80 K 系への熱流入が多くなり、空洞 2 台分に対しては、小型冷凍機 1 台では冷凍能力が不足する。一方、単段式の小型冷凍機を用いて低温真空窓を 40 K とする場合(表 8 参照)は、小型冷凍機が 1 台でも、冷凍能力の

Table 6: Thermal Flow Estimation for the Case of Double-stage Cryocooler, 20-K Window

		4 K	20 K	80 K
Cavity	Dynamic loss	3.84	–	–
	Thermal conduction	0.10	2.70	3.98
Coupler	Radiation	negligible	–	0.05
	Dynamic loss	0.10	1.66	0.33
Beam pipe	Thermal conduction	0.01	0.13	0.98
Thermal shield	Radiation	negligible	0.19	1.92
He pipes	Thermal conduction	0.35	–	–
Support constructions	Thermal conduction	0.02	0.91	5.19
Sensor cables	Thermal conduction	0.08	0.04	0.03
Total		4.50	5.63	12.48

Table 7: Thermal Flow Estimation for the Case of Double-stage Cryocooler, 80-K Window

		4 K	20 K	80 K
Cavity	Dynamic loss	3.84	–	–
	Thermal conduction	0.10	1.47	5.13
Coupler	Radiation	negligible	negligible	–
	Dynamic loss	0.09	0.06	2.29
Beam pipe	Thermal conduction	0.01	0.13	0.98
Thermal shield	Radiation	negligible	0.19	1.92
He pipes	Thermal conduction	0.35	–	–
Support constructions	Thermal conduction	0.02	0.91	5.19
Sensor cables	Thermal conduction	0.08	0.04	0.03
Total		4.49	2.80	15.54

Table 8: Thermal Flow Estimation for the Case of Single-stage Cryocooler, 40-K Window

		4 K	40 K
Cavity	Dynamic loss	3.84	–
	Thermal conduction	0.36	8.13
Coupler	Radiation	negligible	–
	Dynamic loss	0.14	1.19
Beam pipe	Thermal conduction	0.06	0.99
Thermal shield	Radiation	0.01	1.64
He pipes	Thermal conduction	0.35	–
Support constructions	Thermal conduction	0.19	2.95
Sensor cables	Thermal conduction	0.08	0.06
Total		5.03	14.96

点においては全く問題ない。4 K 系への熱侵入量も、6 W 以下という制限を満たしている。クライオモジュール自体も、熱シールドを一重とした方が構造を単純化できる。

以上の検討に基づき、今回製作するクライオモジュールの構成は、単段式の小型冷凍機を用いて、一重の熱シールドを設置することに決した。熱シールドの温度は 40 K に固定して見積りを行ったが、見積られた熱侵入量と比較して、40 K における冷凍能力が十分高いため、熱シールドの温度は 40 K 以下まで下がるものと期待される。

4. まとめ

理研仁科センターでは現在、イオン用超伝導線形加速器の要素技術開発を目的として、QWR 型超伝導加速空洞システムの試作機の製作を進めている。本システムでは、熱シールド用の冷却装置として小型冷凍機を使用する。クライオモジュールの構成を決定するにあたって熱侵入の見積りを行い、使用する小型冷凍機の種類と熱シールドの設置数について比較検討を行った。その結果、単段式の小型冷凍機を用いて一重の熱シールドを設置することに決した。

謝辞

QWR 型超伝導加速空洞およびクライオモジュールの製作は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)^[3]により、科学技術振興機構を通して委託されたものです。

参考文献

- [1] <http://tpds.db.aist.go.jp/tpds-web/>
- [2] <https://www.cst.com/Products/CSTMWS>
- [3] <http://www.jst.go.jp/impact/program08.html>