

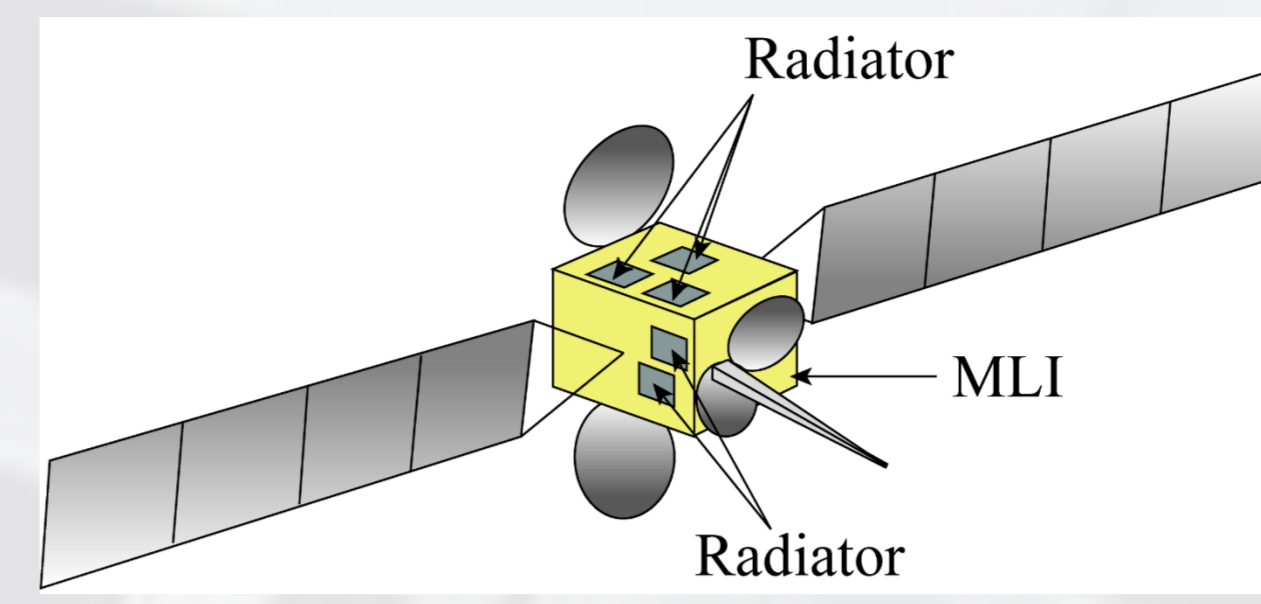
研究背景/目的

江口駿作(東理大), 太刀川純孝(JAXA), 小川博之(JAXA), 齋藤智彦(東理大)

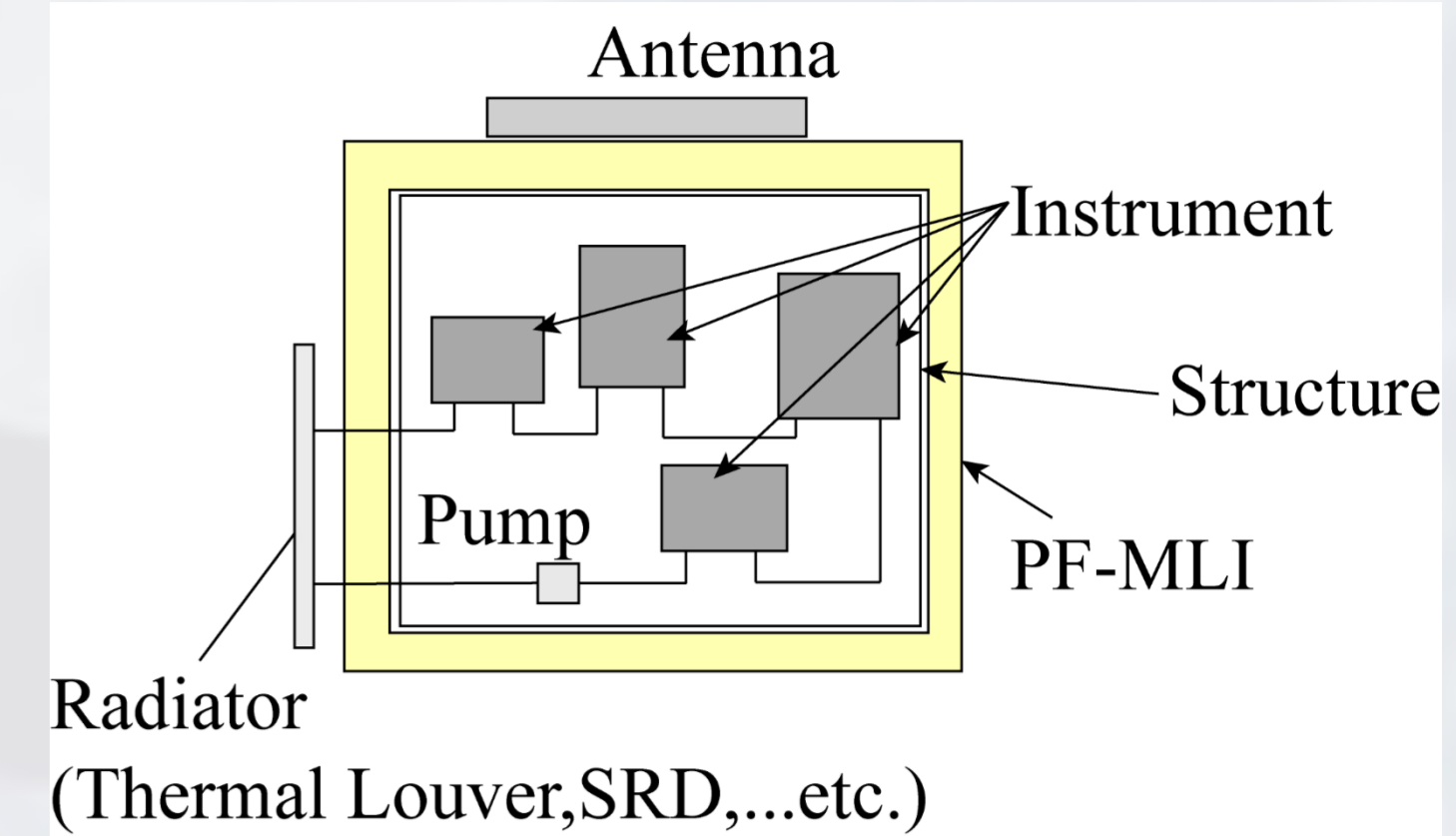
従来の熱制御(コールドバイパス方式):
搭載機器を取り付けているパネルの裏面に設けたラジエータを用いて放熱し冷却を行っている。
このとき、ラジエータの面積は機器の高温側許容温度範囲を上回らないように決定され、機器の低温側許容温度範囲を下回らないようにヒータを用いて加熱している。
また、宇宙機表面は多層断熱材(MLI)で覆い、輻射断熱を図っている。

問題点:

- ・ヒータによる加熱中もラジエータから排熱されており、**ヒータ電力が無駄に消費される。**
- ・ラジエータの裏面に機器をつける必要があり、設計の上で**機器配置の自由度が小さい。**
- ・各機器のラジエータ面にMLIの切り欠きが必要のため、宇宙機の**断熱性能が低下する。**



一般的な人工衛星の外観。



TMSを使用した場合の衛星概念図。

これらの問題を解決するため、ラジエータを1つにまとめ、单相流体ループを用いて各機器の熱制御を行う Thermal Management System(TMS)を提案する。本研究の目的は单相流体ループを用いたTMSの試作を行い、单相流体ループの習熟とその温度制御特性に関する知見を得ることが本研究の目的である。

TMSの構成/概要

TMSはTMS-E(コントロール部)、ラジエータ(放熱部)、コールドプレート(熱交換部)、ポンプ、バルブで構成されており、作動流体(单相流)を循環させることで、対流熱伝達によって搭載機器から熱を回収し、ラジエータからまとめて放熱する。
システム全体で、全ての搭載機器に対して温度制御を達成するために、微重力環境下でも影響を受けにくく、制御が簡易な单相流を作動流体に用いる。
TMS-Eによって、各機器の温度をモニターし、バイパスバルブを開閉およびポンプの回転数の制御を行うことで流量を調節する。

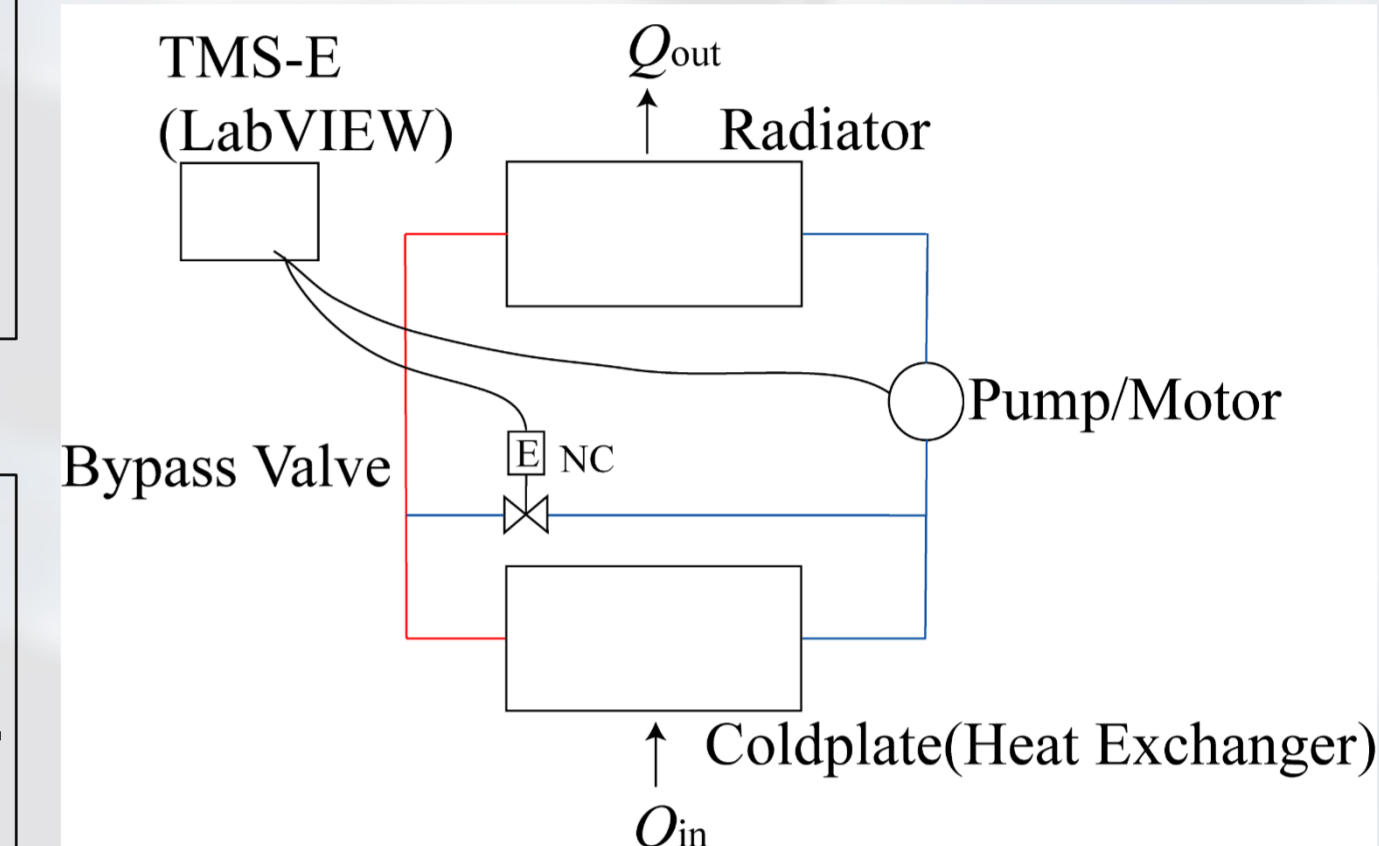


Fig.1 試作したTMSの概念図。

TMSの特徴

- ・各機器がラジエータを持つ必要がないので、**ラジエータを1枚にまとめられる。**(MLIの切り欠きが少なくなるため、システムとしての断熱性能が増す。)
- ・**搭載機器の配置がラジエータに束縛されない**ので、システム設計の自由度が増す。(構体パネルに機器を取り付ける必要がなくなる。)
- ・各機器の流体出口にある**バイパス弁の開度を調節**し、機器に流れる流量を変え、機器自身の発熱を有効利用することによってヒータ電力を大幅に削減できる。
- ・熱輸送を行うのに最低限必要な流量が供給されるように、**ポンプのモータ回転数を制御**することでポンプの電力を削減する。

熱輸送能力の評価

单相流体ループの熱輸送量 Q_t は、流体を選定すれば(比熱 c_p と密度 ρ が決定すれば)ポンプからの吐出流量 G によってのみ決定され、理論上、式(1)により求められる。

$$Q_t = \int_{T_{in}}^{T_{out}} c_p \rho dT \cdot G/A \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1)$$

Fig.2に示すシステムを構築し、流量と熱輸送量の関係を測定したところ、Fig.3のような結果を得た。これより、測定と理論で良好な一致が見られた。

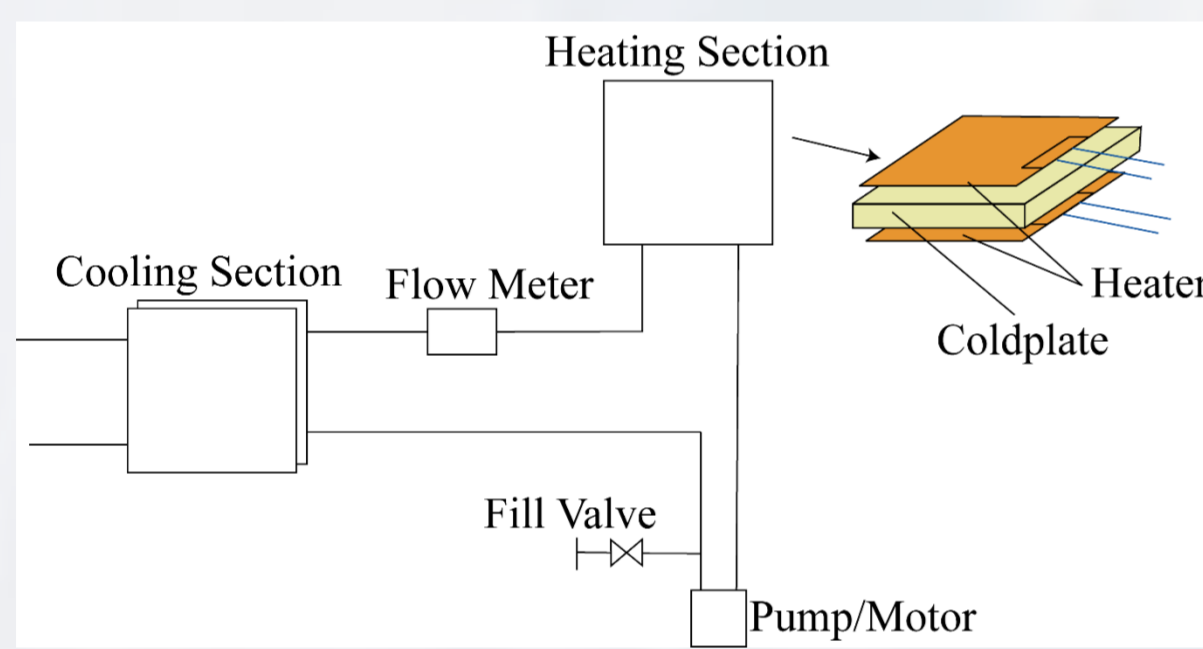


Fig.2 熱輸送量測定システム。

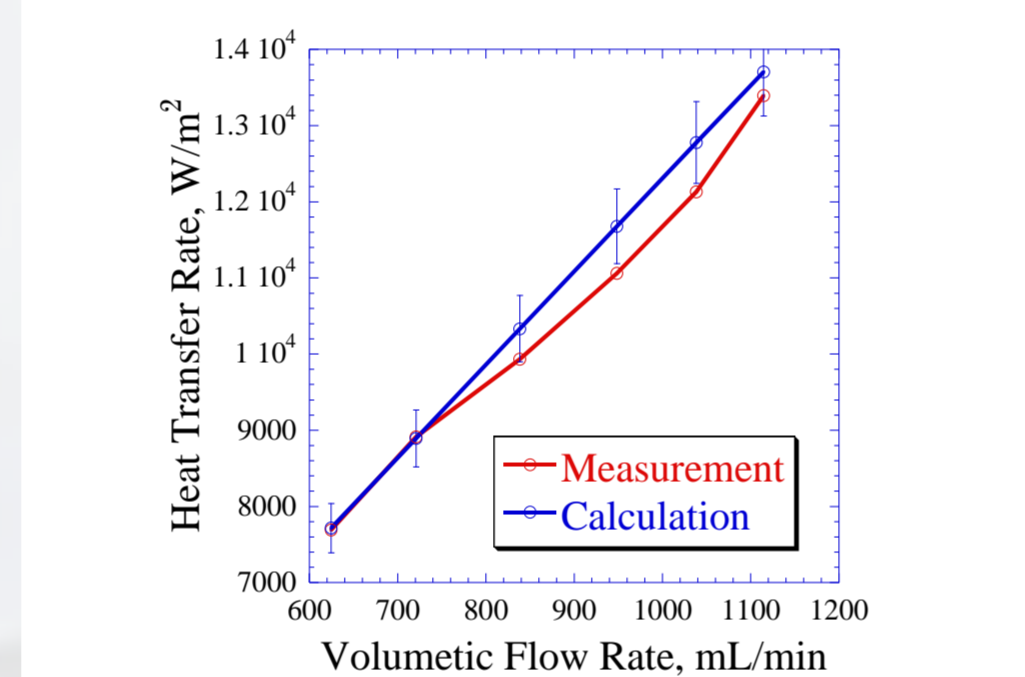


Fig.3 流量と熱輸送量の関係。

このとき吐出流量 G は、ポンプの揚程とシステム抵抗で決定され、ポンプの能力に依存する。また、制御温度範囲 $\Delta T = T_{out} - T_{in}$ や発熱量 Q (熱輸送量に等しい)は機器に依存する。

システム流量の決定方法

【1つの機器に対する流量の決定方法】

作動流体: 軽水($c_p = 4.18 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$, $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$)
制御温度範囲(ΔT): 5°C
発熱量に対する必要最小限の流量を求めるとFig.4のグラフを得る。

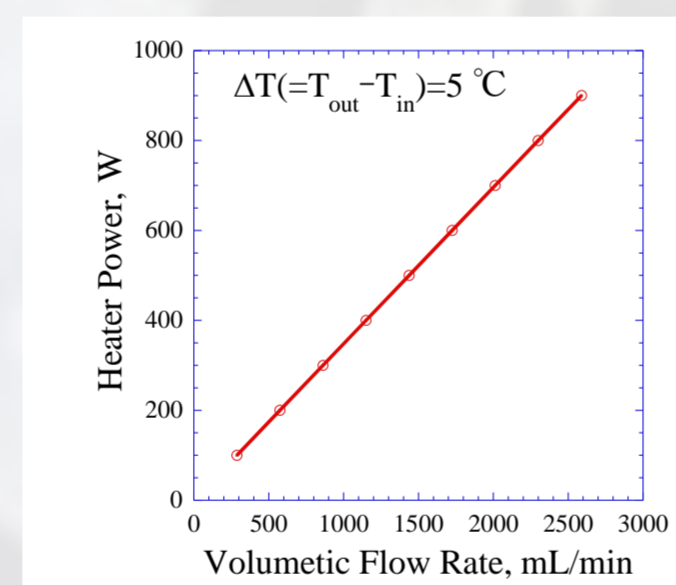


Fig.4 発熱量と流量の関係。

作動流体: 軽水
発熱量(Q): 500 W
制御温度範囲に対する必要最小限の流量を求めるとFig.5のグラフを得る。

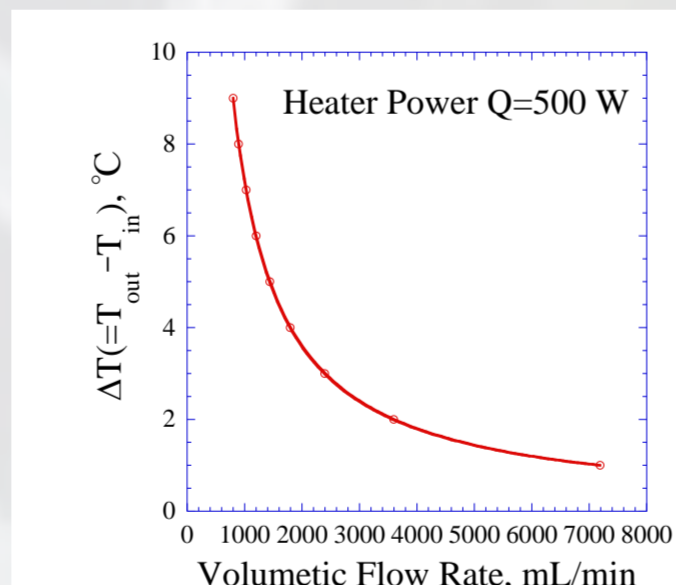


Fig.5 制御温度範囲と流量の関係。

【複数の機器に対する流量の決定方法】

機器をFig.6のように配置した場合、求められる流量は、式(2)で決定される。

$$G_r = \text{MAX}(G_1(\Delta T_1, Q_1), G_2(\Delta T_2, Q_2), \dots, G_N(\Delta T_N, Q_N)) \quad (2)$$

また、システム抵抗は流路の長さに依存するので、流体ループを搭載する衛星の大きさにより、次の揚程 H を満たすポンプを選定する必要がある。

$$H(G_r) = \text{SYSTEM RESISTANCE}(G_r)$$

ここでFig.7にポンプの揚程とシステム抵抗と流量の関係を示した。この2曲線が唯一交わる点でシステム流量が決定される。

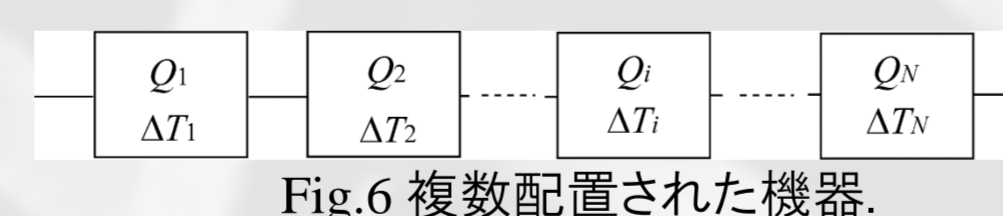


Fig.6 複数配置された機器。

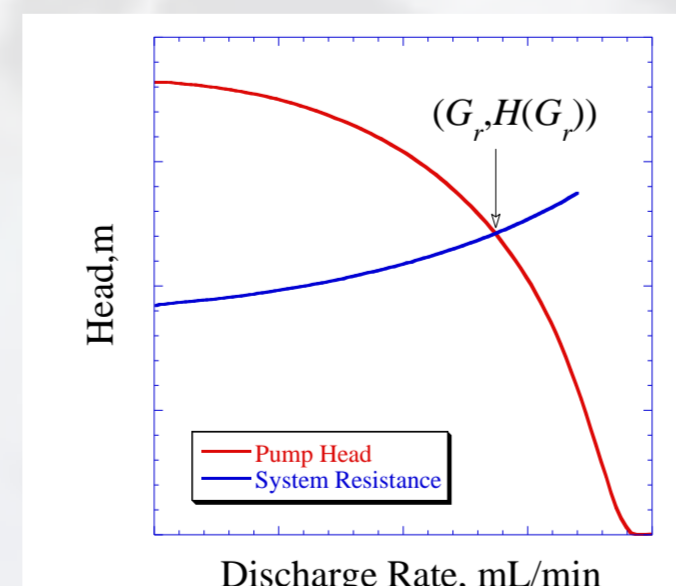


Fig.7 制御温度範囲と流量の関係。

温度制御の評価

温度制御はバイパス弁の開閉によって流量を変化させて行う。具体的には、搭載機器の自己発熱を利用し、温度範囲を下回る可能性がある場合にはバイパス弁を開いて機器の熱回収を止めることで温度を上昇させる。

【機器が1つの場合】

まず、Fig.8のTMSを用いて、実際に温度制御ができることを確認した。この場合は機器が1つであるので、式(1)を用いて制御に必要な最小限の吐出流量となるようにポンプの電圧を制御している。温度制御の設定をTable 1に示し、制御の結果をFig.9, 10のグラフに示す。

Table 1 機器の許容/制御温度範囲。

	許容温度範囲/制御温度範囲
INS-A: ON	+5~+25 °C/+16~+18 °C

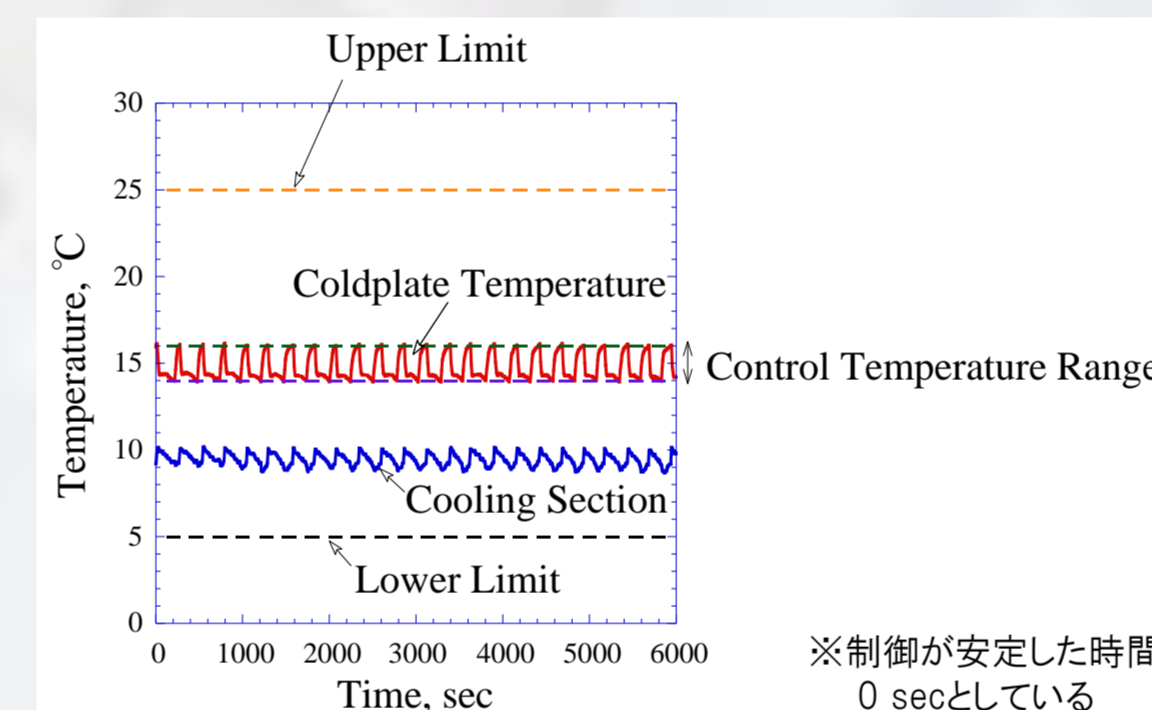


Fig.9 INS-A.

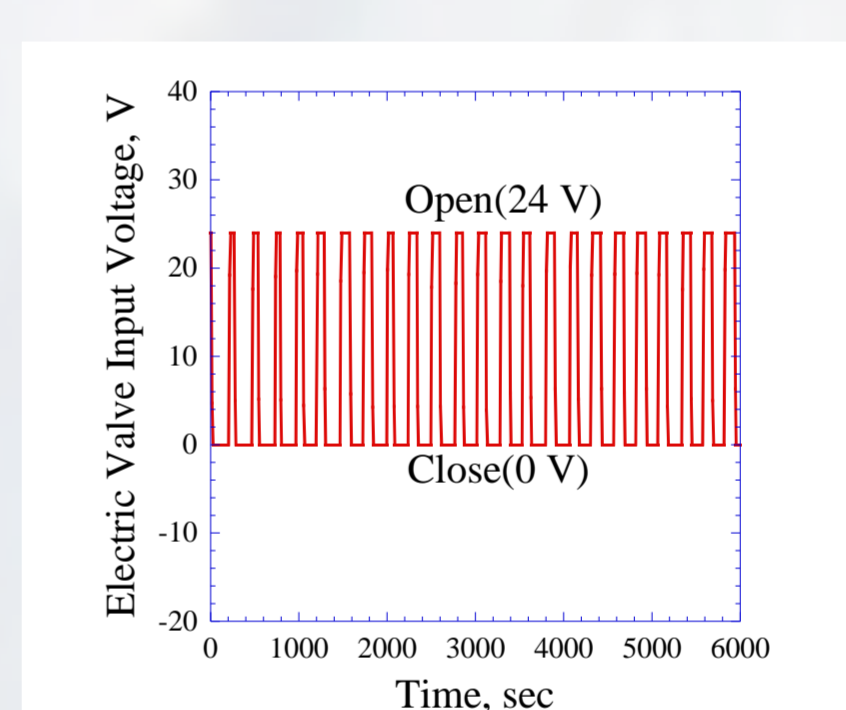


Fig.10 バイパスバルブの制御。

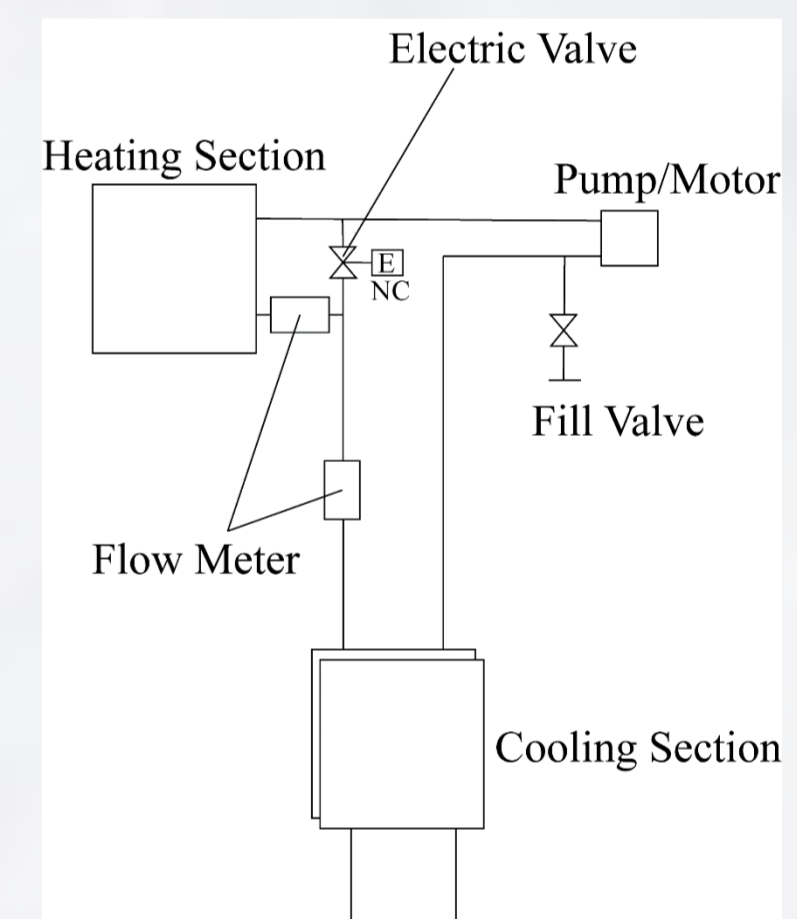


Fig.8 TMS(機器1つ)。

【機器が2つの場合】

次に、Fig.11のTMSを用いて、実際に温度制御ができることを確認した。この場合は機器が2つであるので、式(2)を用いて制御に必要な最小限の吐出流量となるようにポンプの電圧を制御している。温度制御の設定をTable 2に示し、制御の結果をFig.12~14のグラフに示す。

Table 2 各機器の許容/制御温度範囲。

	許容温度範囲/制御温度範囲	
	INS-A	INS-B
INS-A: ON, INS-B: ON	+5~+25 °C/+16~+18 °C	-5~+15 °C/-5~+15 °C
INS-A: OFF, INS-B: ON	-5~+25 °C/-5~+25 °C	-5~+15 °C/-5~+15 °C

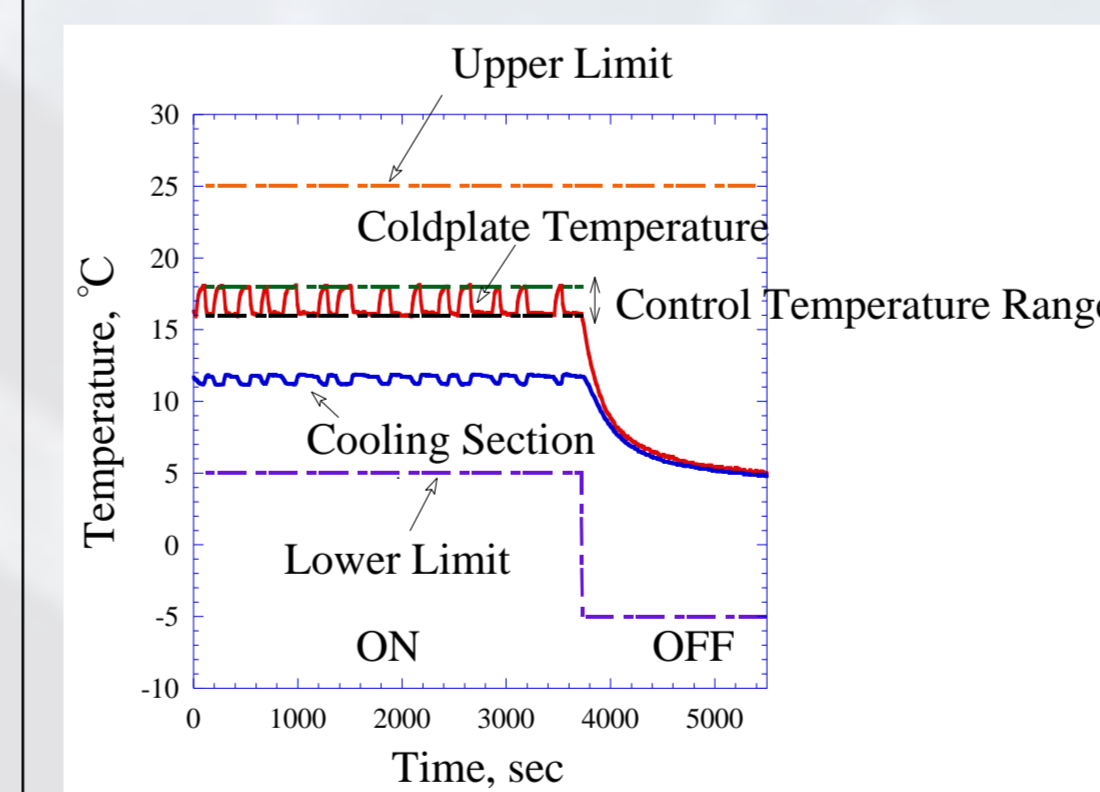


Fig.12 INS-A.

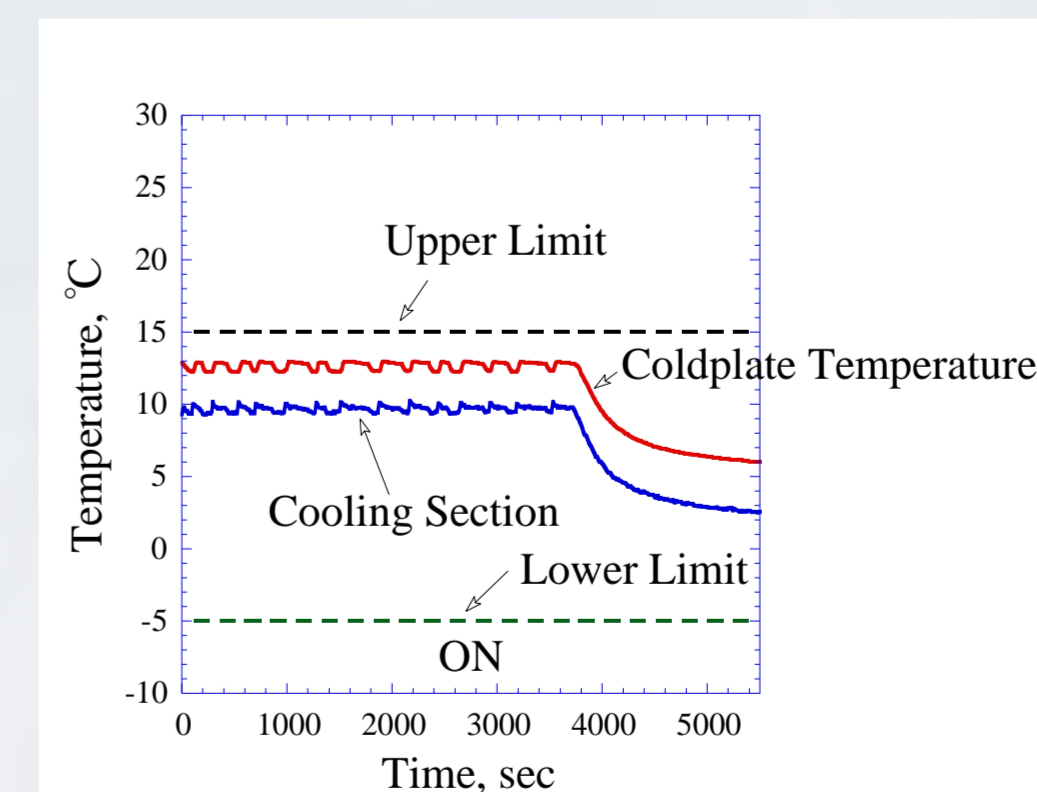


Fig.13 INS-B.

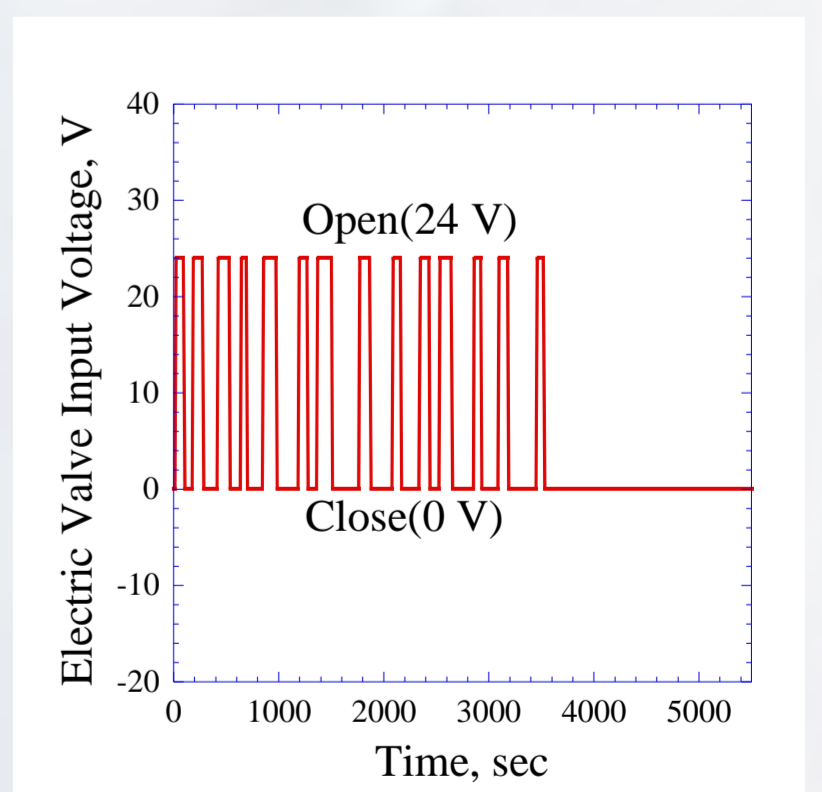


Fig.14 バイパスバルブの制御。

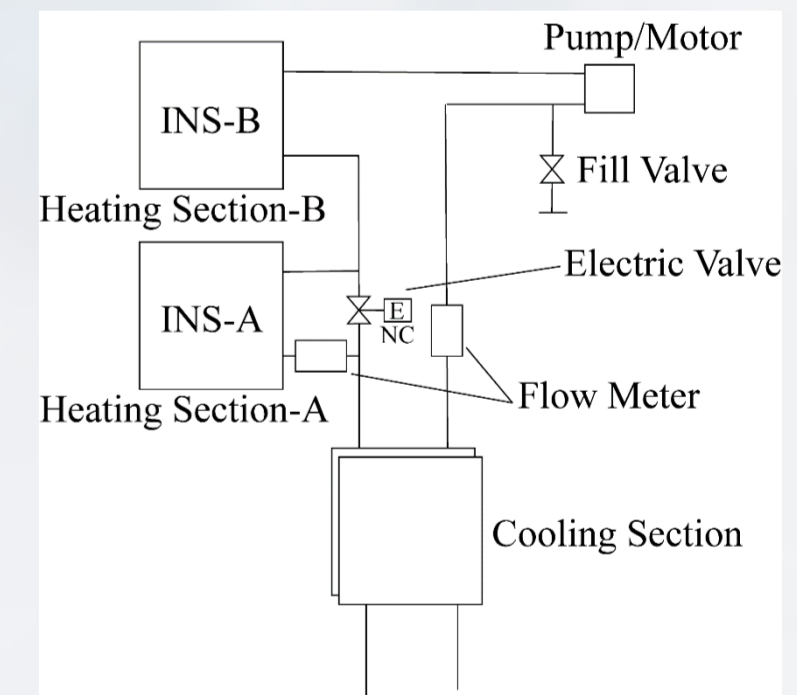


Fig.11 TMS(機器2つ)。

・Fig.9より、機器が1つの場合は十分に温度制御が達成されている。
・Fig.12, 13より、機器が2つの場合にも十分に温度制御が達成されている。このとき、INS-AとINS-Bで温度分布が類似した傾向を示しているのは、バイパス弁を開いてもINS-Bへ流体を完全に止めることができないからである。機器同士を独立に指定した制御温度範囲内に保つには、バイパス弁に3方弁を用いる必要がある。

今後の課題

- ・Pumpの選定: 搭載機器の温度制御を達成するのに十分な、必要最小限の流量を吐出することができるポンプの選定をする必要がある。このとき、ポンプは磨耗が比較的少なく長寿命である遠心ポンプであることが望ましい。
- ・Valveの選定: 搭載機器の温度制御を独立に行うために、バイパス弁として3方弁を使用する。さらに開閉制御に電力を使わず、開閉制御に対する寿命が比較的長期であるThermal Valveをシステムに取り入れる。
- ・Radiatorの開発: システム全体の温度制御を達成するために最も重要なラジエータ出口での流体温度を一定に保つように、サーマルルーバもしくはSRDの使用、または、Heat Switch Radiatorを開発する。
- ・Coldplateの開発: 搭載機器を冷却する際にコールドプレートを用いるが、これはシステム内の重量比で大きな割合を占めるので、軽量化を図る必要がある。