

Improvement of the cooling efficiency of the transformer-oil in the klystron power supply

Chikara Kondo¹, Takahiro Inagaki, Tsumoru Shintake

SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198 Japan

Abstract

XFEL project at SPring-8 requests extremely stable electron accelerator, in which the temperature control of RF acceleration system is one of the most important key for the stability. For example, temperature change in klystron tank varies cathode temperature in the klystron gun, which causes drifting the operational point of the klystron amplifier, resulting in power and phase changes. In order to efficiently remove inner heat dissipation from the klystron tank and modulator, and also reduce temperature fluctuation due to ambient air temperature change, we designed single tank housing for klystron modulator, which is equipped with water cooling panels^[1]. This paper describes experimental measurement of heat transfer efficiently from the insulation oil to cooling waver, for various panel designs.

クライストロン電源における絶縁油の冷却効率の向上

1. はじめに

XFEL/SPring-8では、C-bandクライストロン用高電圧電源として、絶縁油を満たした一つのタンク内に高電圧部品を収納する「一体型モジュレーター」を用いる予定である^[1]。このモジュレーターの放熱量は約2.7 kW^[2]にも上るため、冷却機構を備えて絶縁油の温度上昇を抑えることは、モジュレーター出力の安定化や絶縁油の劣化防止のため重要となる。

本モジュレーターでは、メンテナンス性やコンパクト性も求められるため、冷却機構に攪拌機などを用いずに自然対流のみによる効率的な冷却を目指している。このような自然対流による冷却効率は、機構の形状や周囲の対流などに影響され、計算から算出することは難しい。特に、絶縁油の場合は、動粘度が高く、対流しにくいために冷却効率も小さいことが予想されるが、これまでの測定データも少なく、冷却効率の見積もりも困難である。

そこで、実機のサイズに近い油タンクを製作し、それを用いて4種の冷却機構の冷却効率の測定を行い、実機に最適な冷却機構の選定と、内部の油温度の推定を行った。

2. 熱移動モデル

発熱体が流体内にあり、流体に対流が发生时、熱はその対流によって冷却部まで移動し、そこで外部へ放出される。これより、流体を効率的に冷却することは、発熱体から冷却部への流れ、また冷却部における外部への熱移動が効率的に行われることとなる。この後者の流体と冷却機構間での熱移動量 q は、冷却効率を表す熱伝達係数 h を用いて、

$$q = hA(T_h - T_c) \quad (1)$$

によって表される。ここで、 A は伝熱面積、 T_h は高温流体の温度、 T_c は冷却水などの冷却機構の温度である。これは、熱伝達係数さえわかれば、あとは面積や外部温度を与えることで、熱平衡状態の流体の温度が求められることを意味しており、熱伝達係数が大きいほど、流体の温度は低くなる。

この熱伝達係数は、流体(冷却機構)壁-冷却水または空気などの熱移動経路中の各熱伝達係数の合成から求まる。このとき、熱伝達係数には電気回路における伝導率との類似性があり、直列抵抗において抵抗の大きい部分(伝導率の小さい)が合成抵抗を決定するように、各経路中で熱伝達係数の小さい部分が、経路全体の熱伝達係数を決める。

冷却機構と流体の間の熱伝達係数は、機構表面付近の流れに依存するため、固体内の熱伝導を求める場合よりも複雑となる。特に自然対流の場合は、機構表面での流れが、温度変化によって生じる浮力に

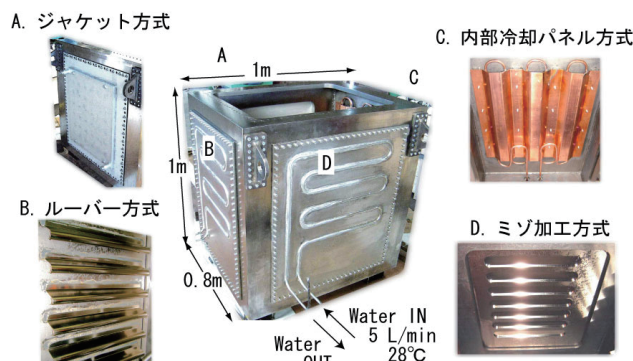


図1. 試験タンクの外観と、各側面に配した冷却機構。

¹ E-mail: ckondo@spring8.or.jp

よりできるため、熱伝達係数を解析的に求めることはより難しくなり、単純かつ理想的な条件下であっても、実験的な式が用いられている^[3]。そのため、現実的な条件において熱伝達係数を知るには、実験を行う必要がでてくる。

3. 実験：油温測定

冷却効率の測定実験について述べる。大きさが1m(D)×0.8m(W)×1m(H)の油タンクを相生市の寿鉄工所において製作した。側面には、図1に示すように、各面毎に4種の冷却機構を設けた。

- 水冷ジャケット方式：内部は平板で、外壁を水冷ジャケットにより水冷する。
- ルーバー方式：内部にルーバーをつけ、自然対流を効率的に行わせる^[4]。また外壁は、ロウ付けした冷却配管(内径φ10mm)により水冷する。
- 冷却パネル方式：油内部に、冷却配管をロウ付けした銅製のパネルを配置して水冷する。
- ミゾ方式：内壁に溝を作り、対流の効率化を図る。外壁に冷却配管をロウ付けし水冷する。

また、タンクの内部には電熱ヒーターを入れ、最大2kW程度の加熱を行った。ヒーターの配置は、図2に示すように、(a)底部に水平、(b)中央付近に垂直、(c)実機における発熱体の配置を似せて煙突内(900W:サイラトロンを想定)と垂直板(700W:EOL等を想定)に取り付けた場合の3種類でおこなった。

内部の絶縁油の温度は熱電対によって測定し、また各冷却機構に水量5L/minの冷却水を流し、行き

と還りの温度差を測定することで、内部から冷却水に移動した熱量を決定した。このようにして得られた熱移動量と、油温と水温の温度差から式(1)を用い各冷却機構の熱伝達係数を決定した。

4. 結果および考察

4.1 ヒーターの配置と冷却効率

図2に示した、(a)ヒーターを底部に水平に置いた場合と、(b)タンク中央付近に垂直に立てて置いた場合について、油の上部と下部の温度変化から、それぞれの温度分布について考える。ヒーターを底部に置いて加熱した場合は、上下の温度差が2℃程度で、油が全体的に温まっていることが分かる。一方、ヒーターを垂直に配置した場合では、上下の温度差が最大で20℃程度と大きくなり、油が局部的に温まっていることが分かる。

このようなヒーターの配置による温度分布の違いは次のように考えられる。絶縁油の熱移動は対流によるが、低温時では粘性が高いため、対流は粘性の小さい高温部のみで起こりやすくなる。タンク底部にヒーターを水平に配置した場合では、下部が全体的に暖められ、下部から上部へとタンク内部全体で対流がおこり全体が温まるが、ヒーターを垂直に配置した場合は、ヒーターの周辺とその上部のみでしか対流が起こらないため、熱源から離れたタンク側面の下部における油は温まらず、上部との間に温度差ができる。

このことから、自然対流による冷却では冷却機構の配置だけでなく、熱源の配置も重要であると言える。すなわち、熱源を底部に配置した場合は、

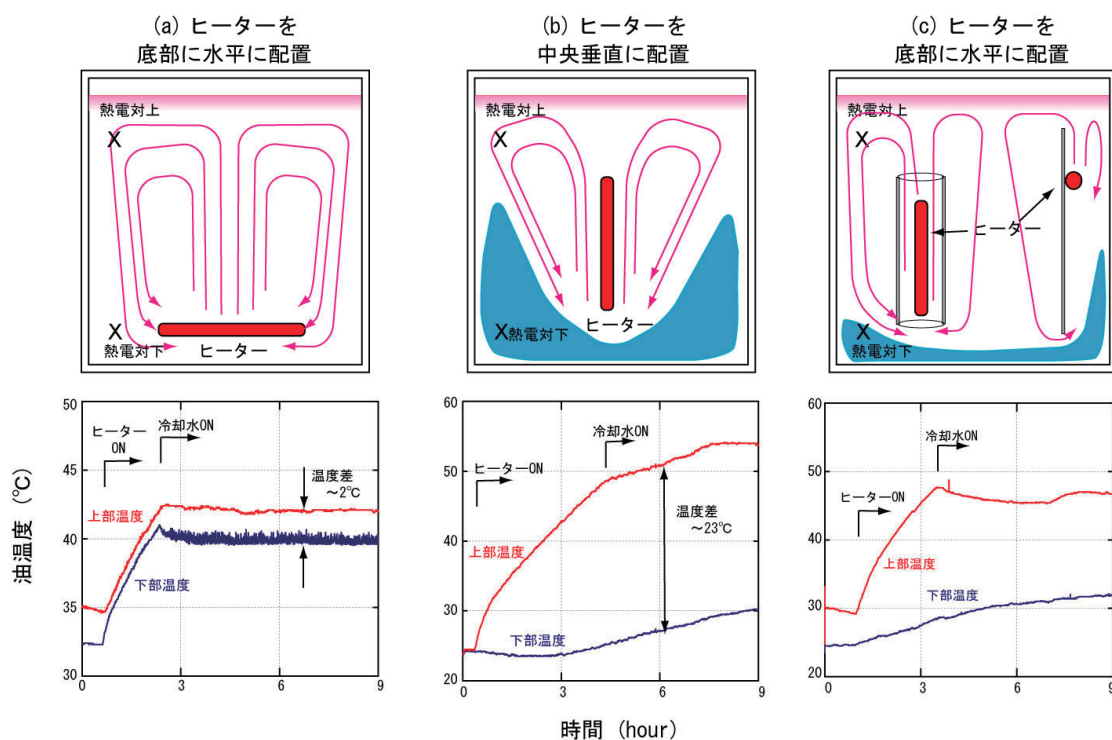


図2.行った実験におけるヒーターの配置と対流の概略図。および各実験における上部(赤)と下部(青)の温度変化。ヒーター配置は、(a)底部に水平に並べたとき、(b)中央付近に垂直に並べたとき、(c)実機に似せて煙突内や直立板に配置したとき。

タンク内に全体的な対流がおり、側面の冷却機構全体において熱移動が行われる。逆に熱源を上部に配置すると、上部のみしか対流がおこらず、側面の冷却機構における熱移動は小さくなってしまふ。このように、冷却効率の向上には、対流を全体的に起こすことが重要となり、熱源の配置を下部の広範囲に配置する必要がある。

4.2 各冷却機構の効率

油を全体的に温めた実験(a)の熱平衡状態時において、絶縁油の温度、各冷却機構への熱移動量から求めた各機構での熱伝達係数を表1に示す。伝熱面積は、ルーバー、ミゾでは冷却配管が囲む範囲とその周囲の面積、また冷却パネル、ジャケットではその機構面積を用いた。

得られた熱伝達係数は、壁外側から冷却配管を配したジャケット、ルーバー、ミゾ方式では、ほぼ同じ62-75 W/m²K程度であったのに対し、壁内側に配管を通した冷却パネル方式では約130 W/m²Kであった。また、ヒーターの発熱量2 kWから各機構への熱移動量を差し引いた残りは空気への自然放熱量となるため、これより、空気への熱伝達係数は4.5 W/m²Kと求まる。

ここで求めた熱伝達係数は、各冷却機構では①油-壁-冷却水という熱移動経路の総合的な熱伝達係数であり、空気の場合は②油-壁-空気という経路の総合的な熱伝達係数である。このとき壁-冷却水や壁内での熱伝達係数は1000 W/m²K以上と大きいため、①の場合は熱伝達の最も悪い油-壁における熱伝達係数が全体の熱伝達係数とみなせ、②では更に熱伝達の悪い、壁-空気の熱伝達係数が全体の熱伝達係数とみなせる。

以上から、冷却水を用いた冷却機構の効率は、自然放熱の10倍以上にもなり、特に内部に冷却配管を通した冷却パネル方式は、外壁から冷却する他の方式の2倍程度の効率を持つことが分かった。冷却パネル方式の熱伝達係数が大きいのは、冷却パネルの表裏で油と接触しているため、熱接触をする面積が機構面積よりも広くなるためと考えられる。

	伝熱面積 (m ²)	油との温度差 (°C)	移動熱量 (W)	熱伝達係数 (W/m ² K)
ジャケット	0.35	13.4	350	75±9
ルーバー	0.38	13.3	315	62±7
冷却パネル	0.42	12.2	665	130±10
ミゾ	0.42	13.3	385	69±8
空気	3.6	17.6	285	4.5±0.3

表1. 実験(a)より得られた各冷却機構への熱移動量、熱伝達係数。

4.3 実機の冷却能力の見積もり

実機の運転時における絶縁油の温度の推定を行う。一体型モジュレーター内では、発熱体の配置が必ずしもタンクの底部にあるわけでないため、実験(c)(図2c)のように、ヒーターを煙突内や垂直平板上に配置して、実機におけるサイラトロンやEOL抵抗体といった発熱体を想定した測定を行い、そこから求めた実効的な熱伝達係数を用いることとした。

さらに、実機ではサイラトロン近傍の側板と中間隔壁には冷却パネルを、EOL回路近傍の側板には水冷ジャケットを配置するため、それらの熱伝達係数を測定した。その結果、ジャケットで約43 W/m²K、冷却板で約91 W/m²Kと求まり、実験(a)のときの6-7割であった。これは、熱源が実験(a)よりも高い位置にあるため、油の対流が上部のみでおこりやすくなり、下部においては対流がおこらず、熱移動がおこる面積が減少するためである。

これらの実効的な熱伝達係数を用いて、発熱量2.7 kW、冷却水温28°C、周囲の気温26°C、ジャケット0.3 m²、冷却パネル1.7 m²として、熱平衡状態時の油の温度を計算すると約41°Cとなる。これより自然対流のみを用いた場合でも、絶縁油を41°C程度の実用的な温度に抑えられるものと見積もられる。

5. まとめ

約1 mサイズの油タンクを製作し、ジャケット、ルーバー、ミゾ加工、内部冷却パネルの4つの冷却機構により、絶縁油の冷却試験をおこなった。その結果、次のようなことがわかった。

1. 冷却機構は、空気への自然放熱よりも、冷却水による冷却方式のほうが、10倍以上の冷却効率があり、さらに冷却パネル方式では、他の冷却方式の2倍程度の冷却効率をもつ。
2. 冷却機構を油の温度が高い上部に配置するだけでなく、熱源を底に近づけて配置することで、タンク内部の全体で対流がおき、冷却効率が大きくなる。
3. 実機における発熱体の配置に合わせた測定から求めた実効的な熱伝達係数を用い、絶縁油の温度を見積もったところ、41°C程度となり自然対流のみでも冷却が可能である。

今後は各発熱体表面における温度測定も行い、高電圧電源の冷却について、より詳細な研究を行う予定である。

謝辞

本実験を行う上で、有益なアドバイスをいただいた、JASRIの高橋直氏に感謝いたします。また、実験をサポートして頂いた、JASRIの長谷川氏、田中信氏に感謝いたします。また、製作にあたり多くの議論をして頂いた寿鉄工の大田氏、竹谷氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Shintake, T. Inagaki, C. Kondo, K. Shirasawa and H. Takebe “Highly Stable RF Power Supply for XFEL/SPring-8”, this conference.
- [2] J. S. Oh, *Internal information*.
- [3] 日本機会学会編, “伝熱工学” 丸善出版社, 2005.
- [4] E2V report TR108, “The cooling of oil-filled electrical equipment, with special reference to high power line-type pulse generators,” presented at the International Pulsed Power Conference, Lubbock, Texas, November 9-11, 1976.