

回転機用空気冷却器

Air Coolers for Rotating Machine

太田 秀治*
Hideharu Ohta

I. ま え が き

回転電機に使用される空気冷却器は、全閉内冷形と呼ばれる保護形式の電機において、機内冷却用空気を冷却するために用いられる。近年新聞紙上を賑わしているように、工業地域における外気汚染はいちじるしく、これは電機にとっても無関係ではない。開放形の電機は、機外より直接冷却空気をとり入れる方式を採っているの、大気中の微細なほこり、油霧など機内の絶縁にとって有害な浮遊物質を機内に蓄積することになって、必然的に点検清掃の間隔を短縮せざるを得ない。

しかるに、機内空気を自己ファンによって循環し、機内外の空気をシャ断する形となる全閉内冷形機は、近年の経済規模の拡大に伴う人手不足から、できるだけ保守に要する時間が少なく、平易なものにしたいと希望する需要者の意向に一致して、次第に全閉内冷形の機種を採用する例が増加している。また、内部空気は外部とシャ断しているの、低騒音機種として、適した性格も有している。

本稿は、全閉内冷機の主要部の一つである空気冷却器について、当社の長年の実績と研究を背景とした、最近の問題点を考慮して、主にその特性、保守上のポイントについて述べる。

II. 空気冷却器の性能と構造

1. 空気冷却器の性能

性能、コスト、保守上の優劣など空気冷却器の具備すべき条件は広規にわたるが、本節では性能について述べる。

1) 熱交換特性

空気冷却器は、冷却管の外側に冷却されるべき加熱空気を流通させ、管の内側には水を流して熱交換を行ない、間接冷媒として使用した水によって交換熱量を外部に廃棄する。この際の熱交換量は、つぎの式のようになる。

$$Q = k \cdot L \cdot \delta_m \text{ (kcal/h)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 k : 熱通過率 (kcal/mh $^{\circ}$ C)

L : 冷却管の有効長さ (m)

δ_m : 空気と水の平均温度差 ($^{\circ}$ C)

したがって、式(1)の k , L , δ_m の大小が直接的に交換熱量に影響するので、電機の限られた条件内で、おのの数值の最大値を目指した研究が重要になってくる。

このうち、熱通過率 k は、冷却管外面の熱伝達率が大きな要素であり、種々のフィンを設けた試みが数多く発表されているが、当社においては、西独GEA社の考案による、いわゆるGEA形のフィンチューブを採用して、 k 値の向上に努めている。また、冷却管の長さ L については、 L の増大はほかならぬ大形の冷却器を意味することになり、限られた空間に収容するための適正な L 値がおのずから与えられる。ただし、その都度最適の L 値を特性面からのみ決定することは、短納期化対策に得策でなく、当社では、2種の L 値を標準として採用している。

流体の平均温度差 δ_m については、両流体の相対的な流通方式を最も有利な方式となるよう考慮するが、電機に使用する冷却器は、その構造上、交差方向流動方式（または直交流方式）といわれる方式を採用するのが普通である。このときの、各流体の平均温度差 δ_m は、対数平均温度差として求めると式(2)のようになる。

$$\delta_m = \frac{\delta_0 - \delta_t}{\log e \frac{\delta_0}{\delta_t}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで

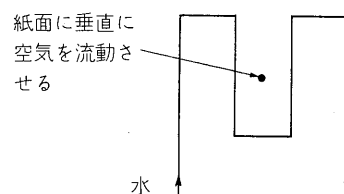
$$\delta_0 = T_{A0} - T_{w0}$$

$$\delta_t = T_{A0} - T_{wi}$$

T_{A0} , T_{A0} : 空気の入口および出口温度

T_{wi} , T_{w0} : 冷却水の入口および出口温度

電機の空気出口温度は、基準周囲温度として規定されるので、冷却水入口温度の δ_m への影響は大きく、通常使用される30 $^{\circ}$ Cより低い場合には、それだけ δ_m は大きくとり得ることになり、交換熱量 Q は、 δ_m に比例し

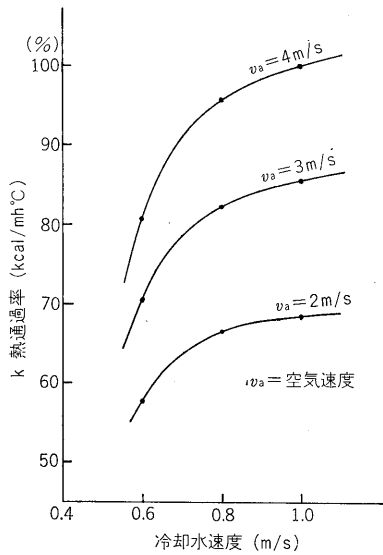


第1図 交差方向流動
Fig. 1. Cross flow

* 川崎工場回転機部

て大きくなる。ちなみに30℃と25℃の場合について比較すると、その比は1:1.30となる。

つぎに管内流速について述べると、流速の増大は第2図に示すように、 k 値の向上に寄与するが、冷却水量は、できるだけ少ないことが望ましい。水量の過多は、気泡や砂のような懸濁物質が、管内壁に衝突することによって起こる Impingement attack と呼ばれる腐食が問題となるが、 k 値の向上も 1 m/s 以上の流速領域では大きな効果をもたらさない。流速の小さい領域では、石炭粉や炭化物などの電導体や、木片、貝類などの非電導体の付着する機会が高まり電池作用による Deposit attack による腐食、ならびに黄銅系合金管に特有に、合金層から亜鉛だけが溶出し粗雑な金属銅だけが残留し、その多孔性ゆえに水は容易に滲出する、いわゆる脱亜鉛現象が起きることがある。また k 値も不経済な値となることから、管内流速は、管材そのほかの条件によって異なるが、ほぼ 0.6~1.2 m/s にとるようにしている。



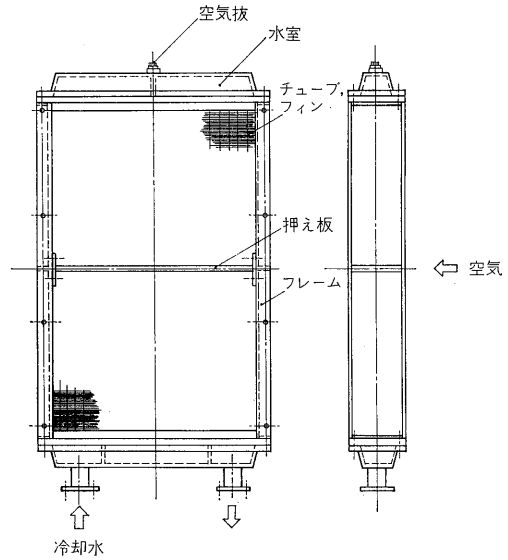
第2図 熱通過率曲線
Fig. 2. Coefficient of heat transfer

2) 空気抵抗

冷却器を通過する空気の流通抵抗は、小さいことが望ましいが、一般には k 値の向上とは相反する特性を持つ、つまり、空気抵抗は風速の自乗に比例するので、抵抗を小さくすれば k 値は小さくなり、冷却器特性に決定的な影響を与える。通常、高速機では大きな値の有利な条件で選定できるが、低速の多極機では、電機のファン効果の期待が小さく、抵抗値の選定には非常な制限をうけ、また、重要な問題となる。一般に、空気抵抗は 7~25 mmAq に選定し、そのときの風速は 2~5 m/s の範囲になる。

2. 空気冷却機の構造

1) 冷却器の構造



第3図 空気冷却器の構造
Fig. 3. Construction of air cooler

構造概略は、第3図に示すが、フィン付冷却管は管板に強固に拡管され、管板にはパッキンを介して水室がボルト締めされている。水室には、冷却水の流通路を仕切る仕切りが設けられている。また、冷却管の補強と冷却器の取付けのため、これらは鋼板製の枠に取り付けられている。冷却水の空気抜きは、上部水室の最上部にプラグが設けられていて、必要に応じて空気抜きコックや空気抜配管に接続ができる。

2) 冷却管

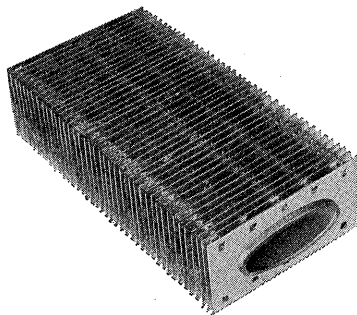
良質な冷却水を求めることは、昨今非常に困難になってきていることから、冷却管をはじめとして、管板、水室の内面塗装材料の選択は、冷却器計画上の要点となってきた。特に冷却管材は、個々の水質に最適な選択をするべく、厳密な水質分析の結果を重要視している。しかし、實際上その都度調査を行なうことはむずかしい場合が多いので、特に指定のない限り当社では、第1表のようにしている。

第1表 標準的な材質選定基準

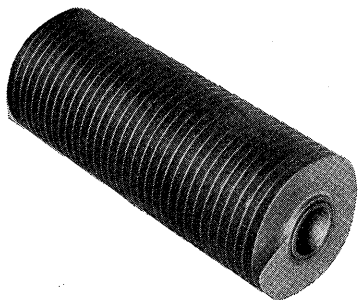
Table 1. Standard materials of cooling system

	河川水または工業用水	海水
冷却管	リン脱酸銅継目無管 (一種) (JISH 3603)	復水器用黄銅継目無管 (四種) (JISH 3632)
管板	黄銅板 (三種) (JISH 3201)	ネーバル黄銅板 (一種) (JISH 3203)
水室	鋳鉄または鋼板	
水室内面塗装	サンドブラストの後、タールエポキシ塗料 3回塗り	

また、冷却管には、前述のように、熱交換効率を上げるため、さまざまな試みがされているが、当社では第4図に示すGEA形フィンチューブを採用している。これはエロフィン管の一種で、矩形のはんだめつき銅製フ



第 4 図
GEA形フィンチューブ
Fig. 4.
GEA type fin tube



第 5 図
フィン付二重管
Fig. 5.
Double tube with fins

ィンをスペーサを介して層状に積み重ねたもので、スペーサは、冷却空気の乱流発生機能も合わせ持つものである。

このチューブの特長は、冷却管がだ円形であることで、少ないスペースで大きな効果を期待できるものである。

需要者によっては、管を二重にした、いわゆる二重管を要求されることがある。これは、第 5 図に示すように内管と外管の間に小さな空間を数箇所設けて、内管の破損による洩水を、その空間に導き検出しようとするもので、銅製の外管には、フィンが転造加工により設けられている。

III. 空気冷却器の運転と保守

1. 冷却器の空気抜き

冷却水は、冷却器の上部、たとえば上部水室に停滞しがちな空気を伴い、冷却水の流通を阻害することがあるので、水室の最上部の空気抜き配管を時折開放して空気抜きを行なう必要がある。したがって、空気抜き用コックは、常時簡単に取扱える箇所に設置するのが良い。

2. 冷却水量のチェック

冷却水量は、予定の熱交換特性を発揮させるのに重要であるのみならず、冷却管の腐食、機械的強度上の問題にとっても重要な要素であることは、すでに II-1 項でも述べた。したがって、通常の運転において、冷却水量の指定値をできるだけ守るために必要な監視装置を設けることが望ましい。当社では、要求によっては、差圧検出機構を備えたオリフィスを供給し、流量を常に掌握できるようにしている。

3. 運転休止状態での問題点

滞留した冷却水は、冷却管、水室など冷却器内部の腐食を促進させるので、運転休止中は、冷却水を冷却器最下部のドレンより排出することが望ましい。特に海水を使用する場合には、長期の滞留状態では腐食の大幅な促進や、異物の付着などが生じ、冷却管に異常を起こすことがあるので、必ず排水する必要がある。

4. 冷却器の清掃

冷却器内部は、冷却水中に含まれる微粒物質などが堆積し、腐食を促進させ、また伝熱効果も悪化する傾向になるので、適当な間隔で内部清掃を行なう必要がある。その清掃間隔は、冷却水質によって異なり、定言はできないが、出力一定の条件で、空気冷却器出口の空気温度と冷却水入口温度との差を記録しておき、その変化の割合がある一定値を越えたら、清掃を行なうようにするのも一方法である。一般には、冷却器の計画時には、熱通過率に15%の余裕をとってあるので、若干の余裕を見込んで、温度差変化の割合を20%程度に決める。とくに汚水地域では、6~12か月間隔で行なうことを推奨する。

清掃を行なうには、水室内部と冷却管内部を重点とし、管内は管形状と同一のブラシで、清水をかけながら清掃する。スケールが付着しているときは、多くは、化学洗浄を行なうが、この洗浄液は、5~10%の希塩酸に腐食抑制剤を添加したものが一般的で、10%希塩酸+0.5%スメリK(栗田工業製)+2~3%イピット #1 L(住友化学製)を薦める。ただし、抑制剤は、塩酸を加える前に、まず水に投入して充分攪拌し混合せねばならない。また、希塩酸は、冷却管外部に触れないように注意する。その後、清水で充分冷却管内部を清掃する。空気側フィンの汚れは圧縮空気除去する。

海水を使用する空気冷却器では、水室内部に電気化学的腐食を避けるため、防蝕用亜鉛板を設置してあるので、その損耗状態も同時に点検し、必要に応じて交換する。

使用開始当初は、比較的短い間隔で清掃を行ない、充分汚損状況、腐食状況を点検して、その後の清掃間隔を決定する資料にすると良い。

5. 冷却水質の冷却管に及ぼす問題点

冷却水質が、冷却器の計画上要点になってきていることは、前述した。冷却水中の不純物は、第 2 表に代表されるが、その与える影響については、濃度およびほかの不純物との相対関係により変わるので、一概にはいえない。第 2 表は、ごく定性的に記したものである。

水質に対する標準的な材質選定は、第 1 表に示したが、特に、最近の問題としては、淡水で一過式でない循環式が、多々用いられることである。いわゆる冷却塔水などがこれに含まれるが、循環式用水では添加分質の影

第2表 主な不純物の種類と障害

Table 2. Impurities in cooling water and troubles

成分	障害
濁度	水にごりのことで、淡水では大部分土砂である。器機内に沈積する。
溶解固形物	電導度で代用される場合もある。自然水ではこれが大きいと腐食性が強い。
溶存酸素 (O ₂)	多くの場合腐食を促進する。不動態化剤として働く場合は腐食を抑制する。
溶存炭酸ガス (CO ₂)	腐食を促進するけれども、重炭酸イオンとの平衡関係で間接的にカルシウムのスケール析出を防止する時もある。重炭酸カルシウムの平衡を維持するのに必要な量以外の炭酸を腐食性炭酸とよぶことがある。
シリカ (SiO ₂)	溶けているものは、非加熱系では問題にならないが、硬質スケールになる時がある。
硬度 (Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺)	カルシウムイオンは水中の平衡関係においてpH, M アルカリ度, 溶解固形物などと関連してスケールを析出する。
鉄イオン (Fe ⁺⁺ , Fe ⁺⁺⁺)	管内に鉄化合物を沈着する。鉄バクテリアの作用と関連する時がある。第二鉄イオンは酸化作用があるので銅の腐食をます。
マンガン (Mn ⁺⁺ , Mn ⁺⁺⁺)	鉄に同じ。マンガンバクテリアの作用と関連する時がある。
銅イオン (Cu ⁺⁺)	鉄, アルミニウムなどの腐食を促進する。
塩素イオン (Cl ⁻)	鉄の酸化物被膜を破壊することで知られているように、腐食性が強く一般的腐食性の目安となる。
硫酸イオン (SO ₄ ⁻)	腐食性をます。またカルシウムイオンと化合して硫酸カルシウムのスケールをつくることがある。
硫酸イオン (S ⁻)	腐食性をます。硫酸塩還元バクテリアの存在と関係する時がある。
アンモニウムイオン (NH ₄ ⁺)	銅および銅合金の腐食を促進する。
化学的酸素消費量 (O)	飲料水関係では、過マンガン酸カリ消費量で表わされることが多い。有機物を中心に、第一鉄イオンなどの被酸化性無機物の量がこれで表されるが、そのような無機物が少くないときは、有機物の量を付表することになるので、これが多いと有機物で汚染されていると考えてよい。有機物は微生物類の栄養源となる。あるいは溶存酸素の低下を招く。
微生物	細菌, 藻類, かび, 原生虫などでスライムをつくり、時には硫酸塩還元バクテリアのように、腐食反応にあずかることもある。

響および各種不純物が、徐々に濃縮されてくることを考慮すると、りん脱酸銅管が、不適當になるケースが多い。

水質分析は、冷却管選定に大きな指針を与えるが、不純物濃度は、季節、時刻および採取場所によっても、大きく変動するので注意が必要である。参考として、りん脱酸銅管使用のときの水質基準を、第3表に記す。

第3表の項目のほかに、導電率、MおよびPアルカリ度、全硬度、全蒸発残留物、溶解性蒸発残留物、銅イオン、マンガンイオン、全鉄などの分析値が与えられれば、より適正な管材選択ができる。

そのほか、アンモニアふんい気において、銅合金管に特異な現象として、アンモニアを腐食媒とする応力腐食

第3表 脱酸銅管使用のときの水質基準

Table 3. Water quality tolerances for deoxidized copper tube

項目	通常値	最大値	備考
pH	5.8~8.6	—	最大値も通常値を越えないこと
色度	50°以下	100°以下	最大値は夏期に限る
濁度	SiO ₂ として100 ppm以下	—	最大値も通常値を越えないこと
生物化学的酸素要求量 B.O.D	20℃ 5日間 5 ppm以下	—	
溶存酸素	5 ppm以上	—	
大腸菌群	1ccにつき 250以下	—	最大値は夏・冬期のみ適用
硬度	ドイツ硬度10° dH以下 (CaCO ₃ として178.5 ppm)	ドイツ硬度15° dH以下 (CaCO ₃ として270 ppm以下)	
NH ₄ ⁺	0.5 ppm以下	10 ppm以下	通常値を越え最大値以下の時間は1か月20時間を越えないこと
H ₂ S	0.3 ppm以下	10 ppm以下	
SO ₄ ⁻	100 ppm以下	—	
Cl ⁻	50 ppm以下	200 ppm以下	最大値適用は1日4時間以内

がある。これはあるレベル以上の静的引張応力 (3 kg/mm² 以上との説もある) の存在下で起きる現象で、淡水使用時におけるアルミニウム黄銅管 (BsTF₄ など) の腐食として、当社においては、早くから問題視し、材質選択に万全を期している。

IV. む す び

空気冷却器について、最近の問題点を含めて総括してみたが、需要家各位の電機用空気冷却器に対する理解に一助あれば幸いである。

最後に、西独GEA社の日本ライセンシである川崎重工工業・GEA部技術陣の多大の援助に謝意を表す。

参考文献

- (1) 川越：回転電機の空気冷却器 富士時報 36 No.8 (昭38)
- (2) 小林：水冷機器の冷却水による諸問題 富士時報 35 No.6 (昭37)
- (3) 小林：銅および黄銅の水による腐食 富士時報 40 No.2 (昭38)
- (4) 小林：冷却器用銅合金管の応力腐食割れ 富士時報 40 No.7 (昭38)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。