

圧延機駆動用サイリスタ変換器の新冷却方式

New Cooling System of Thyristor Converters for Rolling Mill Drive

最近、圧延機駆動用サイリスタ変換器に使われている電力用サイリスタが大容量化され、素子当たりの熱損失が増大してきた。この熱を除去し、装置を小形化するためには、効率の良い冷却方式を開発する必要がある。一方、ユーザーから省エネルギー、省力化、低騒音化などの要請があり、これらのニーズに適合した新しい冷却方式を開発した。

本方式は、熱負荷の有無にかかわらず冷却容器の内圧を常時大気圧に保って沸騰冷却することが可能であり、冷却性能が高く、圧力容器が不要であるなどの特長がある。本方式をサイリスタレオナード用変換器に適用した結果、従来の風冷方式と比較して変換器の据付面積が約 $\frac{1}{3}$ に小形化され、冷却に必要な消費電力が約 $\frac{1}{10}$ に節約された。

岡田定五* *Sadayuki Okada*
松竹 貢** *Mitsugu Matsutake*
美濃知章** *Tomoaki Mino*
堀 孝正*** *Takamasa Hori*

1 緒 言

最近、圧延機駆動用サイリスタ変換器を構成している電力用サイリスタでは大容量の素子が開発され、これに伴って素子1個当たりの熱損失が増大してきた。この熱損失を効率良く除去し、かつ変換器を小形化するためには、高性能な冷却方式を開発する必要がある。また同時に、省力化、省エネルギー、低騒音化などの要請がある。

一般にサイリスタの冷却は、従来から用いられている風冷方式では冷却性能が低く、また、油冷却方式や水冷却方式では液体ポンプを必要とし、腐食や電気絶縁性の点で問題がある。このため、最近では、冷却性能が高く、腐食や電気絶縁性の面で優れているフロン冷媒を用いた沸騰冷却方式が開発され、装置の小形化と省力化が特に要求される鉄道車両関係のサイリスタ変換器に適用されている。

しかし、これらの沸騰冷却方式は、いずれも冷却容器(蒸発器と凝縮器から成る部分)を真空引きした後、蒸発器内に冷媒(フロン)を封入した、いわゆる密閉形沸騰冷却方式である。この密閉形では、冷却容器内の圧力が冷媒の飽和蒸気圧特性で変化するので、熱負荷の大小や外気温度の変化によって、その内圧が真空から3気圧程度まで変化する。万一、冷却容器内に少しでも空気が侵入すると、凝縮熱伝達が著しく低下するため所要の冷却性能が得られなくなる。このため従来の密閉形では、

- (1) 高い気密性の真空及び圧力容器が必要であること。
- (2) 内容積と使用最高圧力の積の値によって、法的な圧力容器の制約を受けること。

などに留意して、装置を設計、製作する必要がある。したがって、気密性の冷却容器の製作は複雑で工数がかかる。また、冷却容器内にサイリスタを密封した場合には、素子の交換や保守点検が不便であった。

そこで、熱負荷の有無にかかわらず常時冷却容器内の圧力をなんらかの方法で大気圧一定にできればよいことにヒントを得て、新しく定圧形沸騰冷却方式を考案した⁶⁾。この定圧形の原理は、熱負荷の有無によって生じる圧力変動を外部に設けた液だめで吸収することによって、常に内圧を大気圧に保持しながら沸騰冷却させる方式である。

ここでは、定圧形沸騰冷却方式の原理、構造及び特長について述べるとともに、圧延機駆動用サイリスタ変換器に適用した場合の構造、省エネルギー効果などについて説明する。

2 定圧形沸騰冷却方式の原理及び構造

2.1 密閉形と定圧形沸騰冷却方式の原理

図1に、従来の密閉形と定圧形沸騰冷却方式の原理を示す。従来の密閉形は同図(a)のように蒸発器と凝縮器から成る冷却容器で作られており、冷却容器内を高真空に引いたあと冷媒液(フロン、沸点47.6°C)が蒸発器内に封入されている。サイリスタから発生した熱により蒸発器内の冷媒が沸騰する。このとき生じた蒸気は凝縮器内に入る。外部は放熱フィンで冷やされているため、蒸気は凝縮器内壁で液化し、再び蒸発器に戻り循環される。そして、この密閉形では内圧がフロンの飽和蒸気圧特性に沿って変化するため、外気温度が0°C以下で無負荷のときには真空となる。逆に外気温度が40°Cで熱負荷が与えられたときには、内圧が約3気圧まで上昇する。特に、真空時に空気が少量でも侵入すると凝縮器内の凝縮熱伝達が著しく低下するため、この密閉形では溶接構造の完全な気密容器が必要であった。また、大形の冷却容器では圧力容器として法的な制約を受ける場合がある。

これに対し定圧形は、図1(b)に示すように冷却容器の外部に容積可変式の液だめを設けた構造である。この定圧形ではサイリスタから発熱のない場合には、冷却容器内に冷媒液が充満されている。このとき冷却容器内の内圧が大気圧に保持されている。次に、サイリスタから熱負荷が生じた場合には、蒸発器内で沸騰した冷媒蒸気が上昇し、凝縮器に入る。ここで冷やされた凝縮液は、再び蒸発器に戻り循環される。このとき、凝縮器内に入っていた冷媒液は自動的に連通管を經由して液だめにためられる。この状態でも内圧は大気圧である。次に、サイリスタの熱負荷がなくなると、凝縮器内の蒸気が消滅するため、代わって冷媒液が液だめから連通管を通過して凝縮器内に充満される。このように、本定圧形沸騰冷却方式では、熱負荷の有無にかかわらず、内圧が常に大気圧の状態を沸騰冷却できる。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立工場 *** 日立製作所日立研究所 工学博士

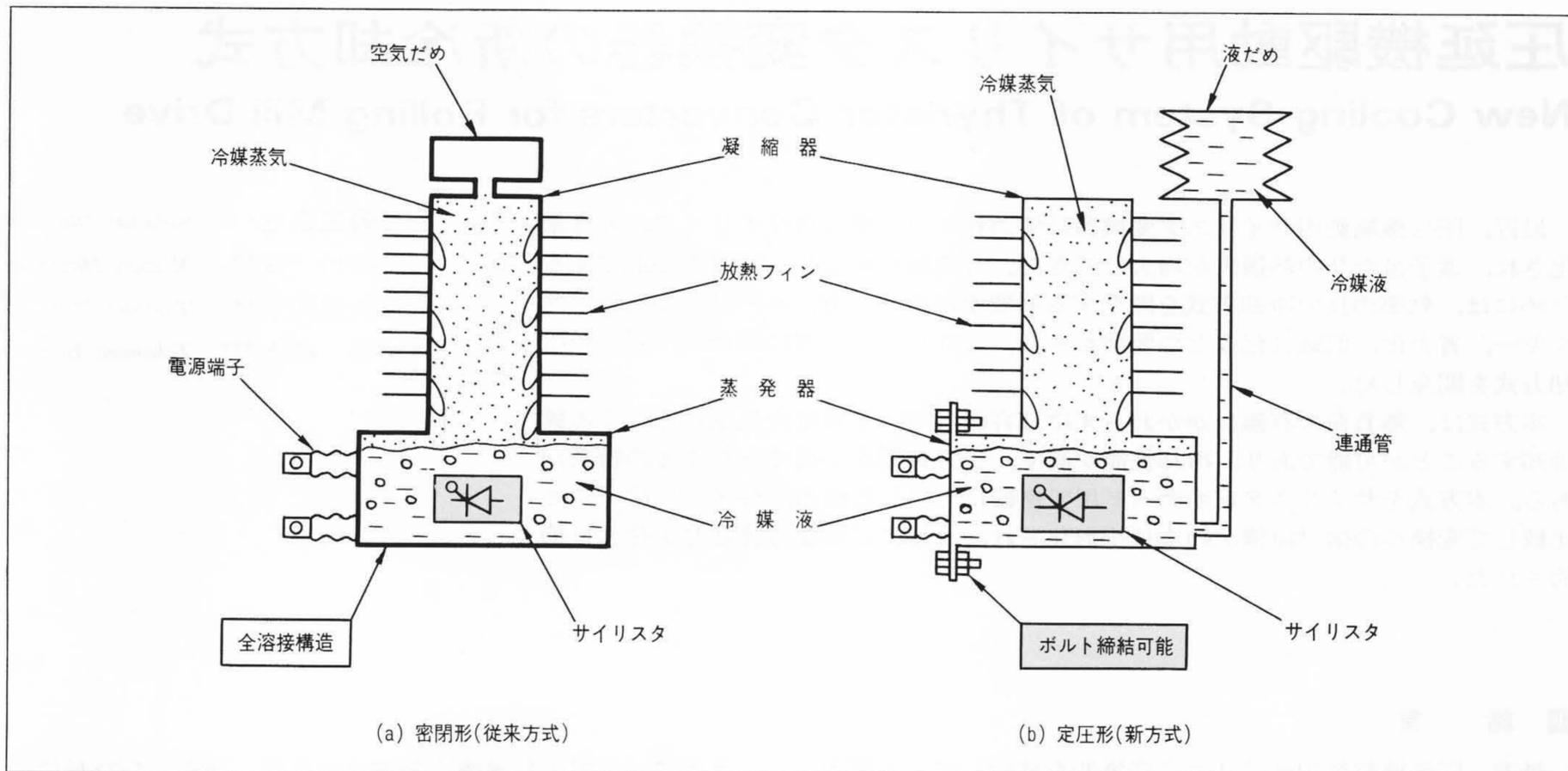


図1 沸騰冷却方式の原理(素子通電状態) 従来の密閉形では、溶接構造の気密容器が必要であるのに対し、定圧形では大気圧に保持されているため、圧力容器が不要である。

2.2 定圧形沸騰冷却方式の構造及び動作

図2は定圧形沸騰冷却装置の全体構造を示す。これはサイリスタを蒸発器の外側に接触させて冷却するタイプである。蒸発器は上下方向に複数個の孔状の沸騰部をもっている。凝縮器は放熱フィン付きの凝縮管を水平に配置した構造であり、凝縮器と蒸発器の間は絶縁継手を介して接続されている。液

だめは金属ベローズが使用されており、その内容積が自由に可変できるため、内圧は常に大気圧に保たれる。また、液だめは凝縮器の上部に設けられ、一つは連通管を経由して液戻り管と接続され、もう一つは脱気管と接続されている。脱気管は放熱フィン付きの凝縮管とオリフィスから成り、凝縮器頂部と液だめ底部の間にほぼ水平に配置されている。なお、

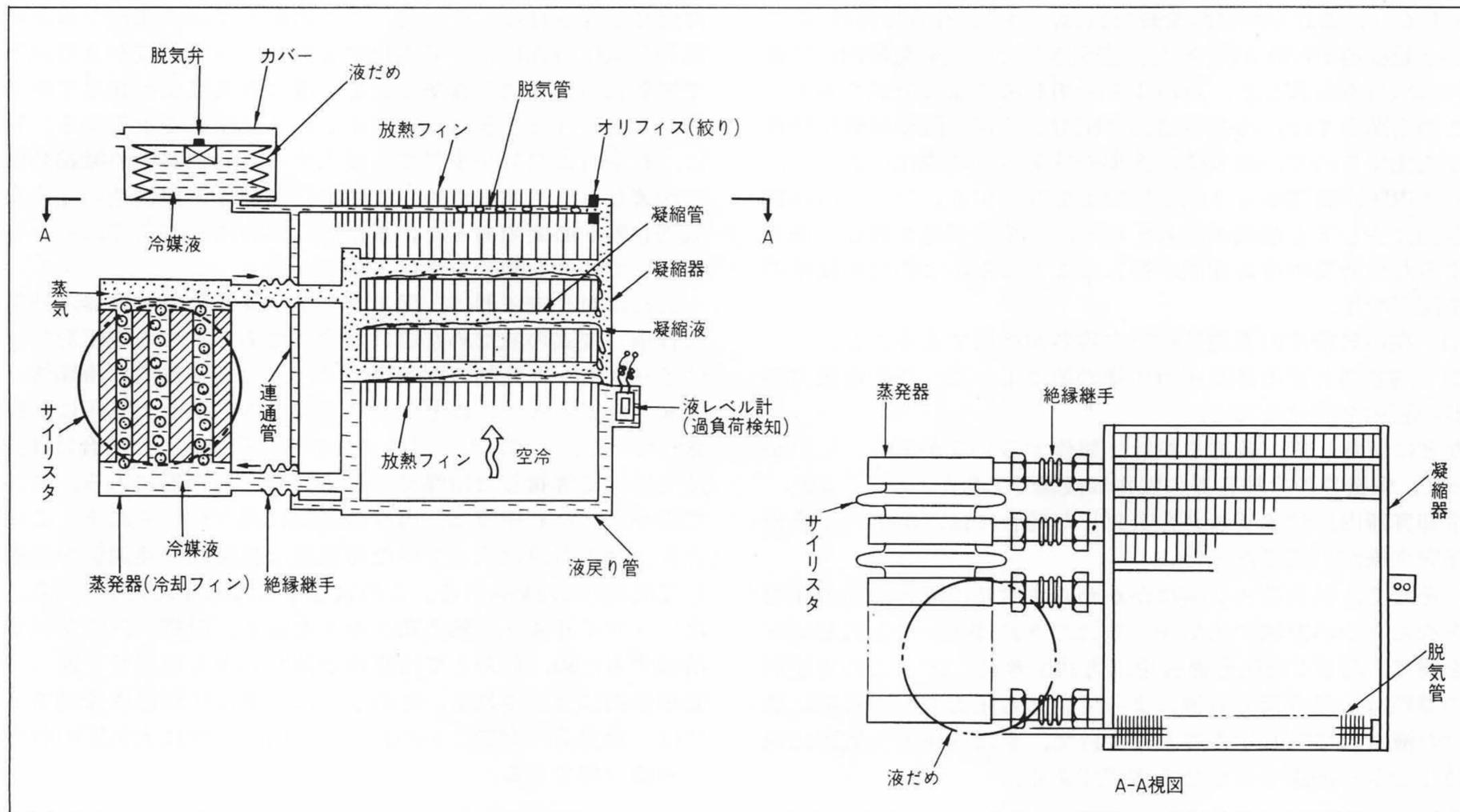


図2 定圧形沸騰冷却装置 この装置は、蒸発器、凝縮器及び液だめから構成されている。脱気管を設けることにより、空気などの不凝縮ガスを排除することができる。

液だめ内にたまった空気などの不凝縮ガスを外部に排出させるため、液だめ上部に脱気弁が設けられている。

次に、冷却動作を説明する。まずサイリスタに通電されないときには蒸気が発生しないため、蒸発器及び凝縮器の内部が冷媒液で充満され、かつ液だめも収縮した状態で内部が大気圧に保持されている。次に、サイリスタに通電され熱が発生すると、蒸発器内の冷媒温度が上昇する。そして冷媒が沸点に達すると、蒸発器内で沸騰する。発生した冷媒蒸気は蒸発器内を上昇し、絶縁継手を通して凝縮器内に入り、各凝縮管内で冷やされて凝縮液となる。凝縮液は液戻り管を通り再び蒸発器に戻る。このとき、凝縮器内に入っていた冷媒液は蒸気の侵入に伴い自動的に連通管を経由して液だめ内にたまるので、内圧が大気圧の状態に保たれる。

一方、冷媒中に空気が溶解していた場合には、空気は沸騰した冷媒蒸気中に混合ガスとなって凝縮器内に入る。この混合ガスが凝縮管を通る間に蒸気は液化されるため、空気だけ残留する。空気は冷媒蒸気より軽い(約 $\frac{1}{10}$)ので凝縮器の頂部に集まり、脱気管を通り更に冷却され、液だめ内上部にためられる。多量の空気がたまると、液だめ上部の脱気弁が上昇し、カバーに接触して自動的に弁を開き空気だけ外部に排出される。一方、空気の混入がないとき冷媒蒸気が脱気管内で冷やされて凝縮液となり、連通管を通して蒸発器へ戻る。こ

表1 密閉形と定圧形沸騰冷却方式の比較 密閉形では、真空から3気圧まで圧力変動が生じる。定圧形では大気圧で使用できるため、圧力容器の制約がなく、空気が混入した場合でも、冷却性能は低下しない。

項目	方式	密閉形	定圧形
1	動作圧力(kg/cm ² abs)	0.03~4.0(R 113)	大気圧(一定)
2	容器の気密(cc/s)	10 ⁻⁸	一般容器
3	装置の製作	難	容易
4	圧力容器の法的制限	あり	なし
5	空気が混入したときの冷却性能の低下	あり	なし
6	冷媒注入時の脱気	必要	不要
7	装置の取扱い	難	容易

のように、空気が混入した場合にも脱気できるため、凝縮器の冷却性能が低下しない。

表1には両方式の比較を示した。従来の密閉形沸騰冷却方式と比較して本定圧形沸騰冷却方式は、

- (1) 高度の気密容器が不要であるため、製作が単純化され、装置が作りやすい。また、冷媒注入などの取扱いも容易にできる。
- (2) 空気などの不凝縮ガスが混入しても、冷却性能が低下しないため信頼性が高い。
- (3) 真空にならないため、冷媒の電気絶縁耐力が大きい。
- (4) 冷却装置は、法的な圧力容器の制約を受けない。

このように、本定圧形沸騰冷却方式では、冷却容器内を常に大気圧一定に保ちながら沸騰冷却できることが最大の特徴である。

2.3 冷却装置の主要構成部品

定圧形沸騰冷却装置の主要な構成部品の構造及び諸元を次に示す。

2.3.1 蒸発器の構造

図3に蒸発器の構造を示す。蒸発器は沸騰板及びヘッドからできており、ヘッドには冷媒の出入口用のジョイントが設けられている。サイリスタ素子を沸騰板の両側面に接触させて冷却するため、その接触面(直径約65mm)は鏡面仕上げされている。沸騰板はアルミニウムの成形材(くし形溝)を二面突き合わせ中間板を介してろう付けしたものであり、沸騰する部分は長方形の貫通孔(図3、A-A断面)である。なお、蒸発器はサイリスタ素子の通電用電極も兼ねているため、沸騰板の端部に電源端子が設けられている。

2.3.2 凝縮器の構造

図4に凝縮器の構造を示す。凝縮器は両側のヘッドの間に並列に凝縮管を配列し、その凝縮管壁に放熱フィンをろう付けして作ったものである。冷却風は放熱フィン間を下から上へ通す。なお、凝縮管には同図のA-A断面に示すように表面積の大きな冷媒通路孔が設けられている。また、凝縮器のヘッドの下部には液戻り管が配管されている。

2.3.3 液だめと脱気管の仕様

液だめは図2に示したように、環状の円板を溶接したペローズからできており、内容積が自由に可変できる構造である。

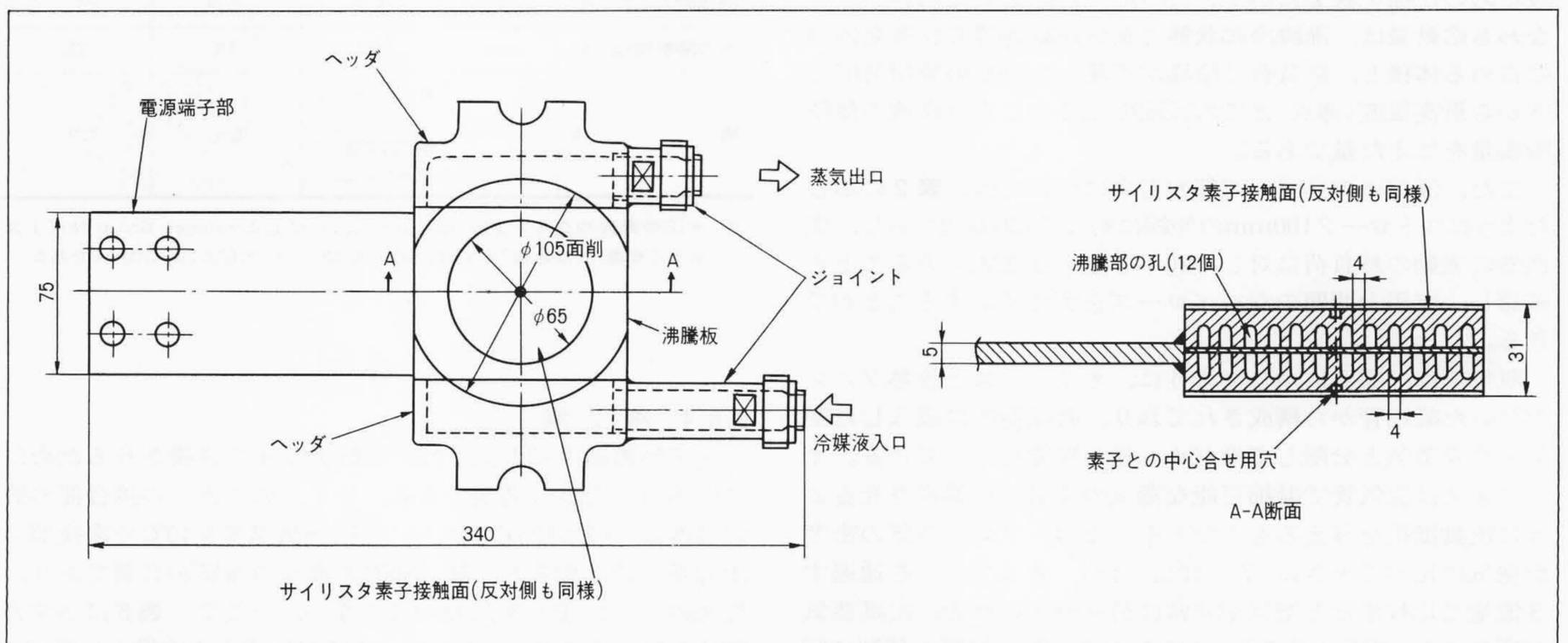


図3 蒸発器の構造 サイリスタ素子は、蒸発器の沸騰板の側面に接触させて冷却する。冷媒は沸騰部の孔の内周で沸騰する。

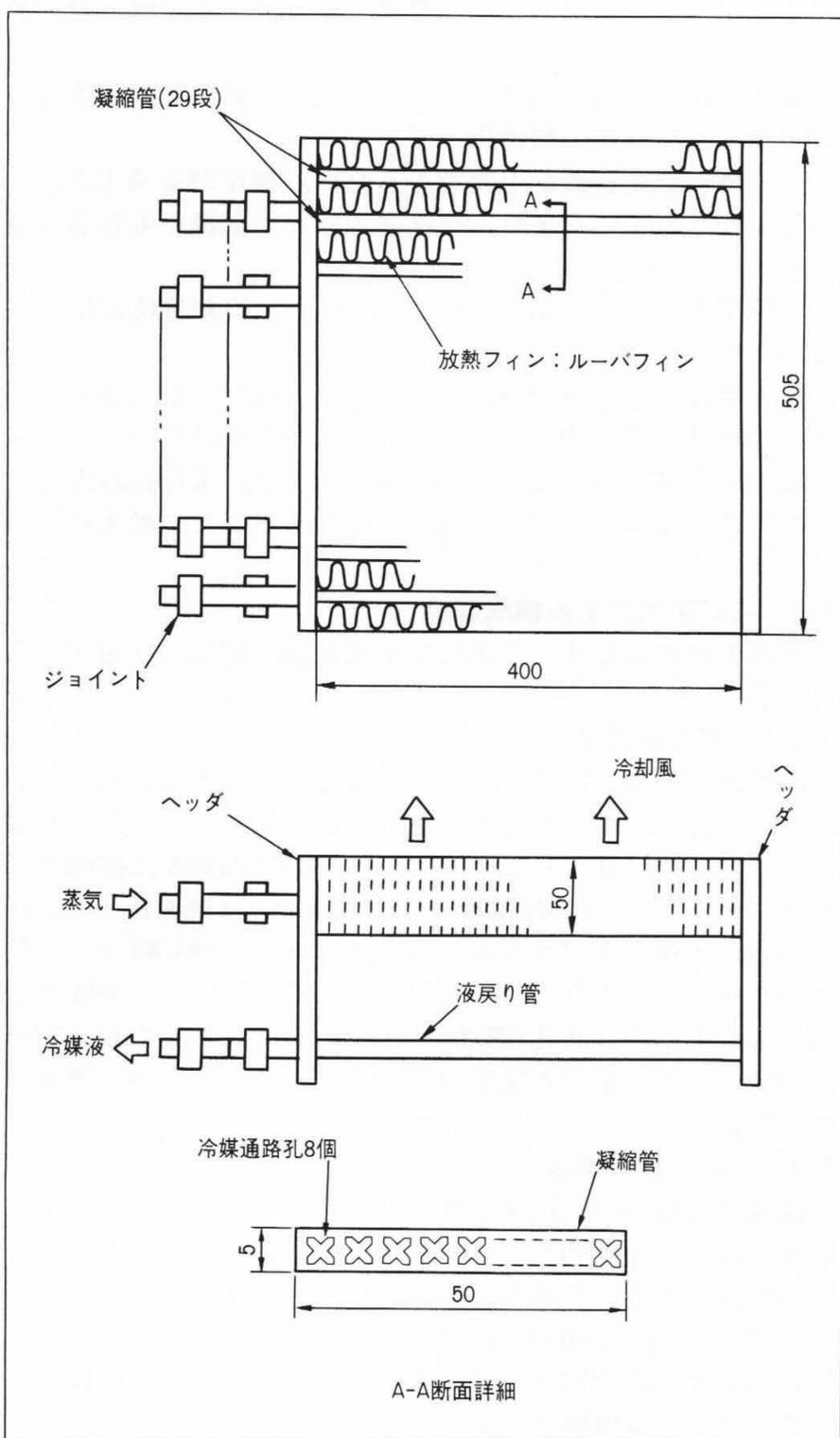


図4 凝縮器の構造 凝縮器は、放熱フィン付きの凝縮管とヘッドから構成されており、ヘッドの下部に液戻り管が設けられている。

液だめの仕様を表2に示す。この液だめに必要な内容積、すなわち応動量は、沸騰冷却状態で蒸気が凝縮器及び蒸発器内に占める体積と、無負荷で冷媒が不足しないため使用最低温度から最高温度(沸点)までの温度変化で生じる冷媒液の体積膨脹量を加えた量である。

また、液だめのベローズ部の寿命については、表2に示したようにストローク100mmの伸縮に対して150万回であり、変換器の実動の熱負荷に対して20年を超える性能のあることを確認し、実用上問題のないベローズをデザインすることができる。

脱気管は、図2に示したように、オリフィスと放熱フィンの付いた凝縮管から構成されており、凝縮器内に混入した空気を冷媒蒸気と分離して液だめへ送る機能をもっている。オリフィスは脱気管で凝縮可能な蒸気の流量だけ通過させるように流動抵抗を与えるものである。なお、フロン蒸気の密度が空気に比べて大きい(7~10倍)ため、オリフィスを通過する流量で比較すると空気が非常に通りやすい反面、冷媒蒸気が通りにくい性質がある⁷⁾。このために、脱気作用が順調に行なわれる。

表2 液だめの仕様 液だめはステンレス鋼を溶接したベローズ式である。

項目	仕様
ベローズサイズ	内径φ177×外径φ247×t0.3(mm)×20山
有効面積	353cm ²
応動量	3.5l
ストローク	軸方向 100mm
ばね定数	0.3kgf/mm
ベローズ材質	ステンレス鋼(SUS304)
寿命(回数)	1.52×10 ⁶ 回(フルストローク)

表3 冷媒の物性値 定圧形の冷媒は塩素を含まない化合物であり、絶縁耐力が優れており、水の溶解度及び毒性も少なく、化学的に安定な冷媒である。

項目	冷媒種類	冷媒種類			
		密閉形沸騰冷却用フロン(R113)	定圧形沸騰冷却用		
化合物名	—	トリクロロトリフルオロエタン	パーフルオロ2メチルペンタン	パーフルオロメチルシクロヘキサン	
化学構造	—	CCl ₂ FCCLF ₂	2-CF ₃ C ₅ F ₁₁	C ₆ F ₁₁ CF ₃	
沸点(1atm)	°C	47.6	57.7	76	
凝固点	°C	-35	-140	-50	
表面張力(25°C)	N/m	19.03×10 ⁻³	11.9×10 ⁻³	14.2×10 ⁻³	
膨脹係数	1/°C	1.28×10 ⁻³	1.62×10 ⁻³	1.65×10 ⁻³	
沸点の物性値	液密度	kg/m ³	1.51×10 ³	1.617×10 ³	1.642×10 ³
	蒸気密度	kg/m ³	7.0	12.46	12.21
	動粘度	m ² /s	0.335×10 ⁻⁶	0.30×10 ⁻⁶	0.380×10 ⁻⁶
	蒸発潜熱	kJ/kg	144.5	82.9	85.8
	比熱	kJ/(kgK)	0.940	1.105	1.225
熱伝導率	W/(mK)	0.0715	0.060	0.0590	
	プラントル数	無次元	6.65	8.84	12.95
電気抵抗(25°C)	Ω·cm	2×10 ¹⁵ 以上	1.7×10 ¹⁵	10 ¹⁵ 以上	
絶縁耐力(25°C液)	kV/mm	14.6	16.4	24.7	
水の溶解度(25°C)	ppm	110	19	25	
毒性	—	●グループ: 4~5* ●許容濃度: アセトンに同じ	なし	なし	

注: *印の毒性のグループNo.は、Underwriters' Laboratories Group No.(Iは著しく有毒, 6は無毒)例えば、SO₂: 1, NH₃: 2, CH₃Cl: 4, CO₂: 5である。

2.3.4 冷媒

定圧形沸騰冷却方式では、常時大気圧で沸騰させるために高い沸点の冷媒が必要である。サイリスタ素子の接合部の許容温度は一般に125°Cであり、周囲空気温度を40°Cで変換器の冷却系を設計すると、60~80°Cの沸点の冷媒が必要であり、従来のフロン(R113)は使用できない。そこで、表3に示す沸騰冷却用冷媒の物性表⁸⁾から、定圧形に適する冷媒としてパーフルオロカーボン系のものを使用している。この冷媒は冷却

性能及び電気絶縁特性がフロンと同等、又はそれ以上に優れており、水分の溶解度もフロンに比べて約 $\frac{1}{5}$ と小さい。また、化学的に安定で、かつ塩素原子を含まないため金属、その他の材料に対する腐食性も少ない。

3 定圧形沸騰冷却方式サイリスタ変換器

3.1 サイリスタ変換器の構造

図5は、定圧形沸騰冷却方式サイリスタ変換器の全体図を示したものである。サイリスタ変換器は主に、二つの冷却ユニットと冷却ファンから構成されている。通風経路では、キュービクルの背面下部から外気を吸い込み1段目と2段目の冷却ユニットに並列に通風した後、各冷却ユニットの排風が一緒になってキュービクル上部の冷却ファンから外部に排風される。なお、キュービクル内には仕切板を設け、サイリスタ素子をはじめリアクトルや抵抗器などの高電圧部に冷却風を通さない構造にすることにより防じん効果を高めた。このため多少じんあいの多い場所で使用されても絶縁低下の問題が起きない。

冷却ユニットは図5(b)に示すようにサイリスタスタック、凝縮器、液だめ及びヒューズなどの電気部品から構成されており、一つの箱に収納されている。万一、サイリスタ素子が故障した場合には、実装状態で素子単品の交換ができるよう

に配慮されている。

また、冷却ユニット1台には、サイリスタ素子を1直列・1並列・6アームの回路、すなわち6個の素子で三相ブリッジを構成している。したがって、この冷却ユニットを幾つか組み合わせることにより、1,000~6,000kW級のサイリスタ変換器を実現することができる。図6に、製品化された圧延機駆動用サイリスタ変換器の外観を示す。

3.2 冷却性能

図7は蒸発器の冷却性能の実測値を示した。サイリスタ素子の熱損失が大きいほど沸騰熱伝達率が增大するため、熱抵抗が小さくなる。素子の熱損失が1kW以上では蒸発器ベースと冷媒液間の熱抵抗として $0.01^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 以下の良好な冷却性能が得られている。

3.3 冷却方式による比較

表4に示すように、従来の風冷方式の同一容量のサイリスタ変換器と比較して、定圧形沸騰冷却方式は次のような多くのユーザーメリットがある。

- (1) 装置が小形化されるので、据付面積が風冷方式の約 $\frac{1}{3}$ に縮小される。
- (2) 冷却に必要な消費電力が約 $\frac{1}{10}$ に低減される。2,500kW級の変換器で年間当たり約 $2.4 \times 10^5 \text{kWh}$ の省エネルギーとなる。
- (3) 装置の部品数が半減されるので信頼性が向上する。

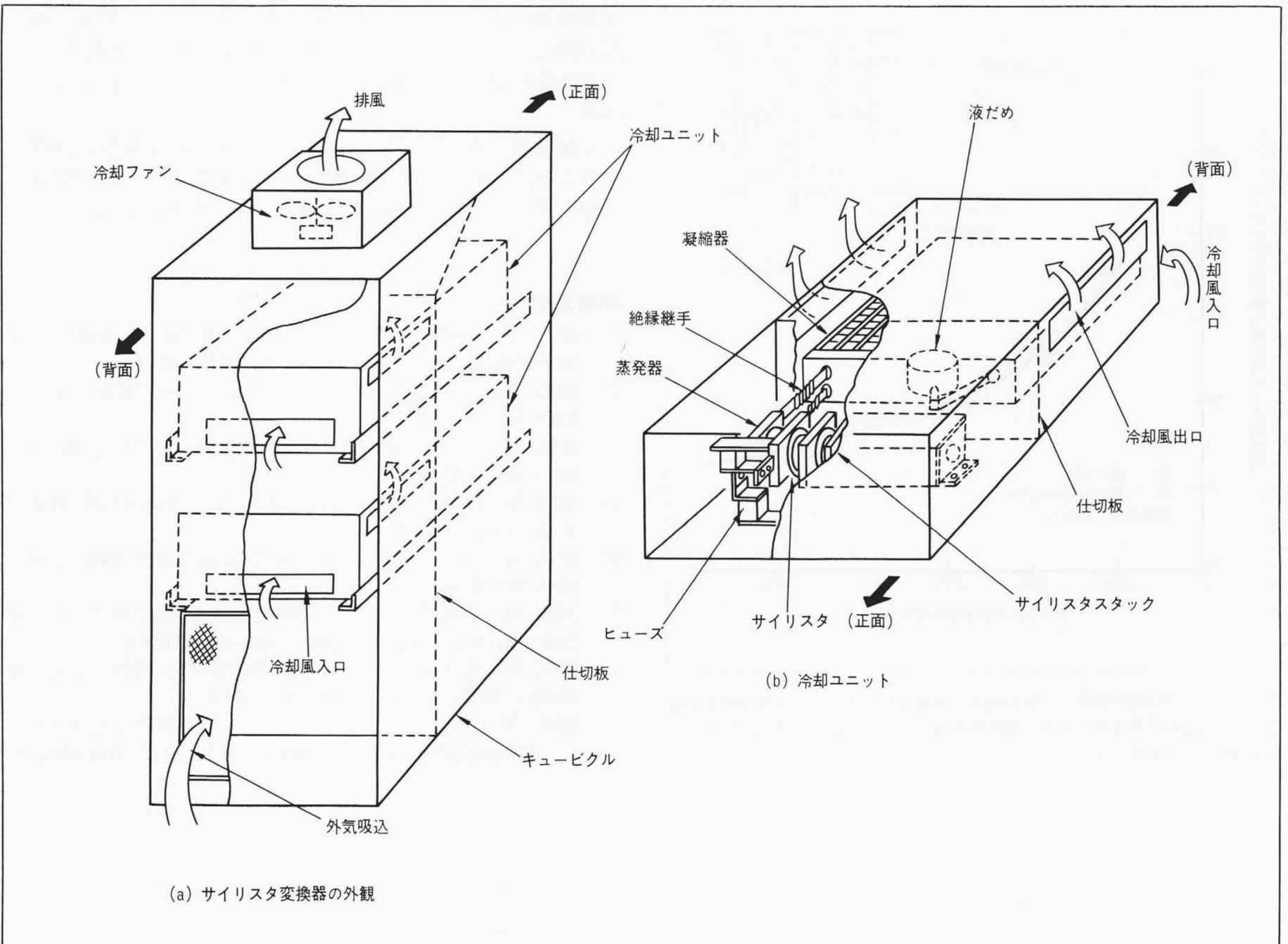


図5 サイリスタ変換器の構造 キュービクル内には2台の冷却ユニットが上下に設置され、天井の冷却ファンで並列に通風される。素子が万一故障した際、実装状態で交換できる。

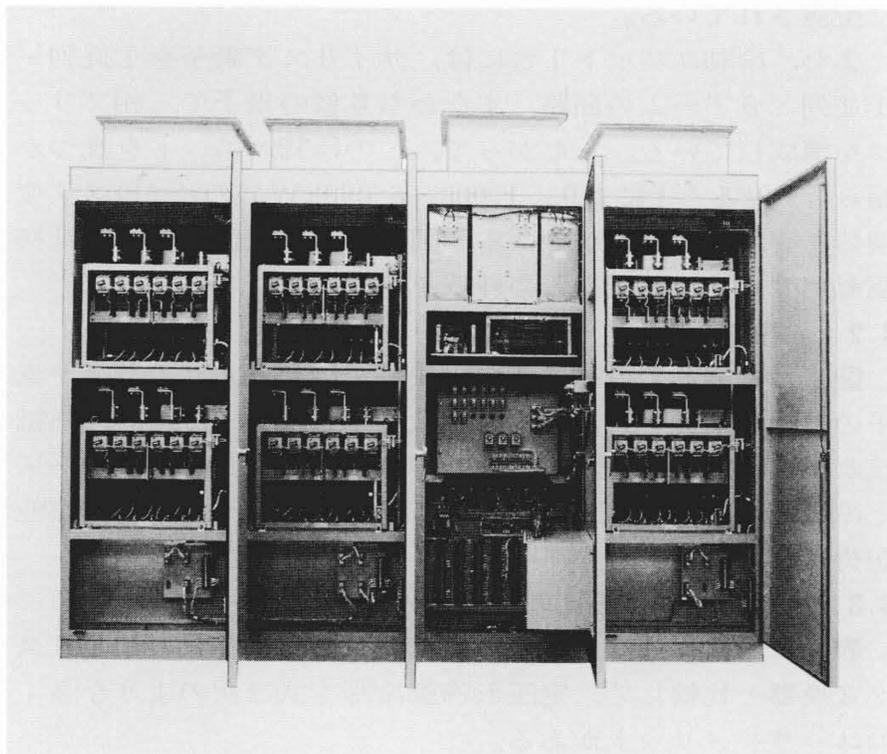


図6 3,000kW級定圧形沸騰冷却方式サイリスタ変換器 これは扉を開けた実装状態を示す。左側2台は順変換器、右側1台は逆変換器である。

表4 冷却方式によるサイリスタ変換器の比較(当社比率) 従来の風冷方式に比べて据付面積で $\frac{1}{3}$ に小形化され、冷却に必要な電力が約 $\frac{1}{10}$ に節約される。

冷却方式		風冷方式 (室内循環)	定圧形沸騰冷却方式 (室外)
項目			
容量		2,500kW, 750V	2,500kW, 750V
構成	サイリスタ素子	2,500V, 400A	2,500V, 1,000A
	順変換器	1S×9P×6A	1S×4P×6A
	逆変換器	1S×3P×6A	1S×1P×6A
据付面積 (装置寸法)		100% 幅7.2×奥行2×高さ3(m)	33% 幅3.6×奥行1.3×高さ2.3(m)
装置の熱損失		31kW	28kW
冷却に必要な電力 (クーラー, ファン)		32kW (28.4+3.6) クーラー ファン	2.65kW (2.65) ファンのみ
騒音		75dB	60dB
信頼性		部品数多い(100%)。	部品数半減(60%)

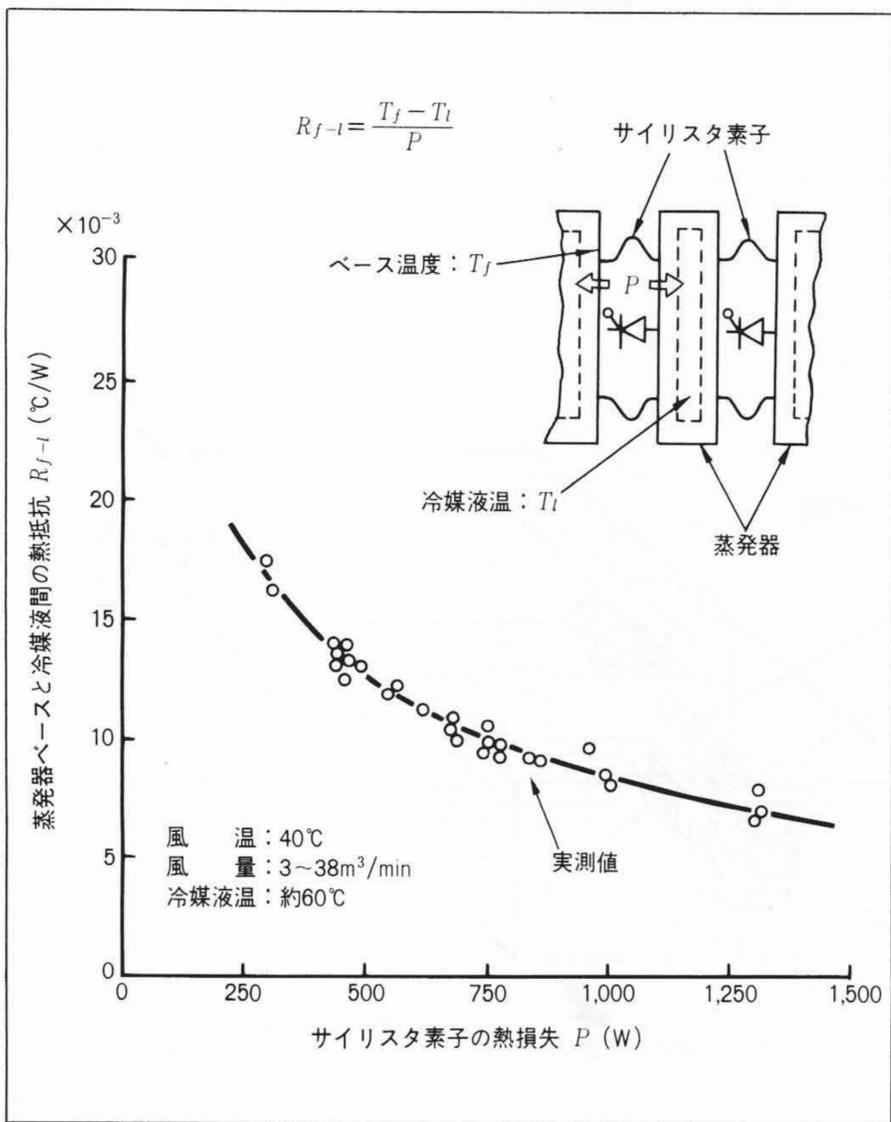


図7 蒸発器の熱抵抗 熱抵抗は、蒸発器の両側にサイリスタ素子を接触させた場合の冷却性能である。素子の熱損失が1kW以上では、0.01℃/W以下の熱抵抗が得られている。

4 結 言

圧延機駆動用サイリスタ変換器の冷却方式として、定圧形沸騰冷却方式を開発し、実用化した。本方式は、常時冷却容器の内圧を大気圧に保持して沸騰冷却することが可能であり、冷却性能が高く、圧力容器が不要となるなどの特長を持っている。

今後も本方式を新しい電力用サイリスタの冷却方式に適用することにより、更に高信頼性、省エネルギー、省力化などにマッチしたシステム製品を開発していく予定である。

参考文献

- 1) 寺戸：鉄道車両用大容量半導体整流装置における沸騰冷却，電気学会雑誌，95巻，6号，534~537(昭50-6)
- 2) 高丸，外：車両フロン整流器，東芝レビュー，32巻，6号，497~503(昭52-6)
- 3) 板鼻，外：フロン冷却式チョップ制御装置，日立評論，61，5，331~336(昭54-5)
- 4) 太田，外：自冷式沸騰冷却チョップ装置，三菱電機技報，52巻，7号，487~491(昭53-7)
- 5) 白井，外：車両用変換装置の冷却技術，富士時報，56巻，3号，208~212(昭58-3)
- 6) 岡田，外：冷媒を液体で封じた開放形沸騰冷却の研究，機械学会論文集(B編)，46巻，403号，510~519(昭55-3)
- 7) 岡田，外：定圧形沸騰冷却方式に関する研究，機械学会論文集(B編)，50巻，459号，2670~2677(昭59-11)
- 8) 岡田，外：サイリスタ変換装置用定圧形沸騰冷却方式について，電気学会論文誌(B編)，105巻，8号，637~644(昭60-8)