

フロン冷却式チョッパ制御装置

Flon Evaporation Cooling System for Chopper Controller

近年、大容量半導体素子を対象にした自冷式フロン冷却方式の適用が進められている。

この方式は、従来の強制風冷方式で課題となっていた送風機騒音の防止、送風機・エアフィルタの点検及び露出絶縁部の塵埃、汚損などに対する保守の簡易化を目的としている。

自冷式のフロン冷却方式は、沸騰したフロン蒸気を媒体として素子の発熱を凝縮管のすみずみに伝達し、広い表面積をもつ放熱器で冷却できるため送風機を必要としない。

この方式は、高性能伝熱面「サーモエクセル」(日立製作所製品名)を採用した小形な沸騰冷却フィンや、空気混入対策を施した対向式冷却系などにより、小形化と信頼性の向上を図っており、各所で実用に供されている。

板鼻 博* Itahana Hiroshi

山田行雄* Yamada Yukio

斉藤秀治* Saitō Shūji

岡田定五** Okada Sadayuki

1 緒言

フロンを用いた沸騰冷却方式は、電鉄変電所用整流器をはじめ日本国有鉄道向け交流・交直流電車用整流器でも実用化が進められている。一方、主回路構成や素子の制御モードの複雑な直流電車用チョッパ装置への適用も活発で、日立製作所では同装置を帝都高速度交通営団、札幌市交通局、名古屋市交通局及び大阪市交通局へ納入しており、順次営業運転が開始されている。

この冷却方式は放熱器の配置や大きさに自由度があるため、従来の強制空冷(以下、風冷という)方式を自然空冷(以下、自冷という)方式とすることができ、送風機やエアフィルタの定期的保守、送風機騒音の排除ができる。また半導体素子を密閉容器内に収納するため、雨雪、塵埃などによる汚損、絶縁劣化を防ぎ信頼性を高めている。

沸騰式のフロン冷却方式は以上述べたような特長をもっているが、この方式をチョッパ装置に適用するに当たり次の検討を加えた。

- (1) 使用する上で圧力容器としての規制を受けない小形な冷却ユニットとする。
- (2) 空気混入による冷却性能の低下を抑制する。
- (3) 放熱器の形状と配置を検討し、走行風を冷却に利用する。
- (4) 電磁的ノイズの抑制を図る。
- (5) 高周波電流によるうず電流損を把握し放熱する。
- (6) 従来、風冷であった付属機器の自冷化を行なう。
- (7) 信頼性を確認する。

沸騰式のフロン冷却方式を採用した電車用チョッパ装置は、現在、各所で稼働実績を挙げつつあるが、ここではフロン冷却の特性、ハードウェア、保護方式などについて述べるとともに、実用に供しているチョッパ装置を紹介する。

2 冷却系の動作

チョッパ装置用に実用しているフロン冷却系の一例を、図1に示す。冷却系はサイリスタ、ダイオード素子などを収納した蒸発器と凝縮管をもつ放熱器などから成っており、容器内を真空にした後、フロン113の液を封入している。

素子が通電によって発熱すると、発生した熱は素子に接触した沸騰冷却フィン(以下、フィンという)を介してフロン液へ伝達される。フィンに接するフロン液は熱流束の増加に伴って沸騰し、蒸発器内の圧力を上昇させるため、蒸気は圧力の低い凝縮管内に移動する。この管壁は放熱器によって冷却されており、蒸発時に得た潜熱を管壁に放出して凝縮・液化し、更に、重力によって下降し蒸発器内に還流する。

このように、素子の発生熱はフロン蒸気を媒体として凝縮管のすみずみにまで迅速、かつほとんど同一温度で伝達できることから、放熱器の配置、大きさなどの設計に自由度があり、自冷化が可能となる。

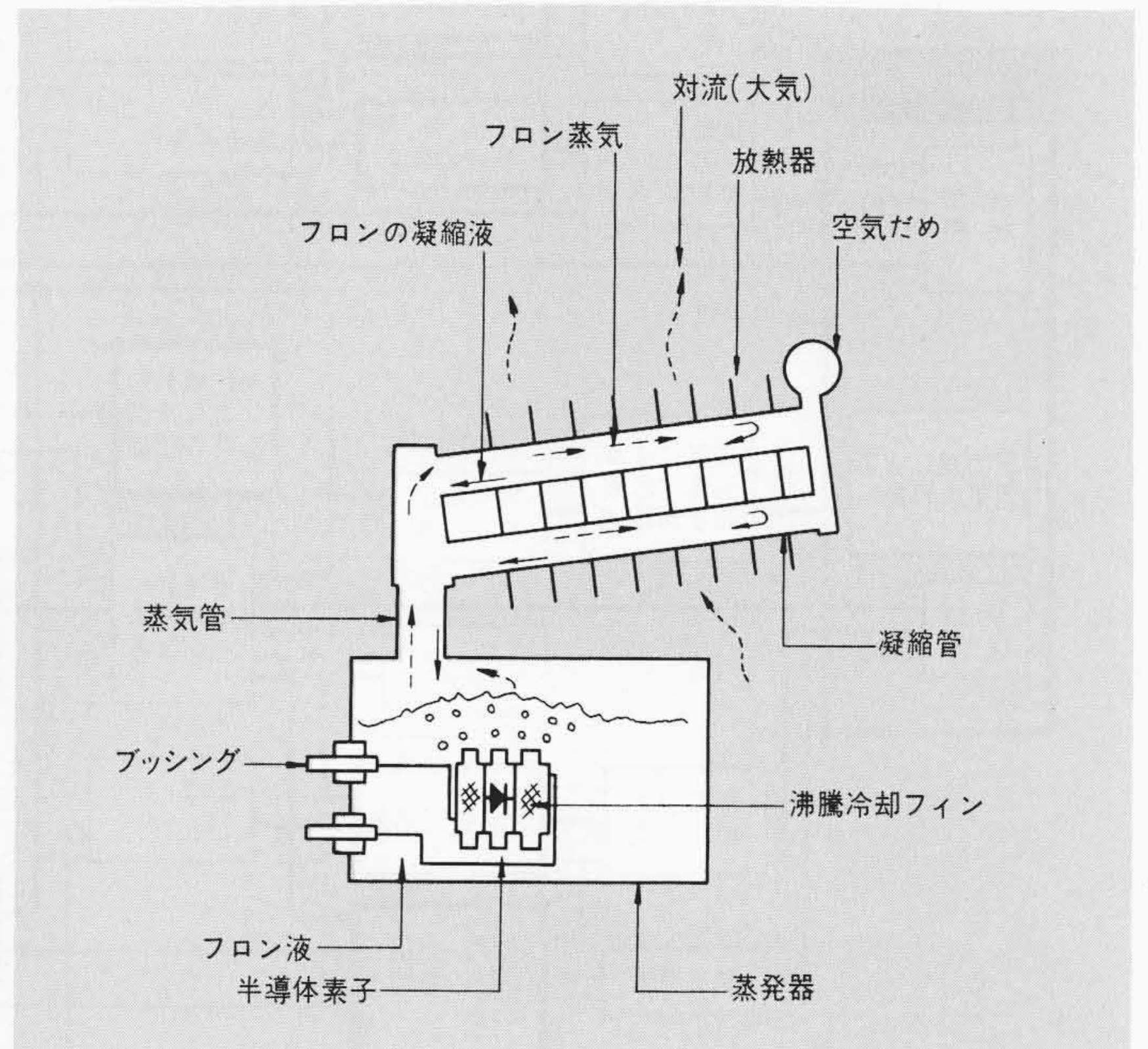


図1 実用しているフロン冷却系 蒸発器のフロン液中に半導体素子を浸せし、フロン液を蒸発・凝縮させ冷却する。

* 日立製作所水戸工場 ** 日立製作所日立研究所

3 フロン冷却式チョッパ装置の特長

フロン冷却方式は、フロンの沸騰、凝縮と蒸気による熱輸送を利用したもので、特長として保守の簡易化、低騒音化及び高信頼度化を挙げることができるが、これらの因果関係を取りまとめ図2に示す。

次に、この装置の主な特長について述べる。

3.1 冷却ユニットの小形化による保守の簡易化

この冷却ユニットは密封構造であるため、フロンの温度上昇とともに内圧が上がり一種の压力容器となる。压力容器に関する法令には「労働安全衛生法」、「压力容器構造規格」などがあり、図3に示すように、压力容器の規模に応じて「第1種压力容器」、「小型压力容器」、「容器」及び「法令外」に分類される。チョッパ用の冷却ユニットは、素子収納容器(蒸発器)の小形化や、素子のジャンクション温度の限界と全体の温度配分にマッチしたフロン温度の設定などにより、使用上、法令による規制を受けない「容器」扱いとしている。

3.2 「サーモエクセル^{1)~3)}」加工によるフィンの小形化

沸騰伝熱を促進するには、伝熱面から多くの気泡を発生させ、伝熱面周辺のフロン液を激しく攪乱させることが望ましい。気泡の発生は、平滑面上でも微細な傷などから発生する確率が高く、沸騰伝熱面を粗面化すると効果が大きい。図4は細孔とトンネルから成る高伝熱面「サーモエクセル」を示しており、同じ温度差の平滑面に対し約10倍の沸騰熱伝達率を得ている。図5に「サーモエクセル」加工を施したフィンの熱抵抗を示す。主サイリスタの実用範囲(約900W)での熱抵抗は、厚さ16mmのフィンで0.009°C/Wであり、従来の方式では得られなかった良好な冷却性能を得ている。このフィン

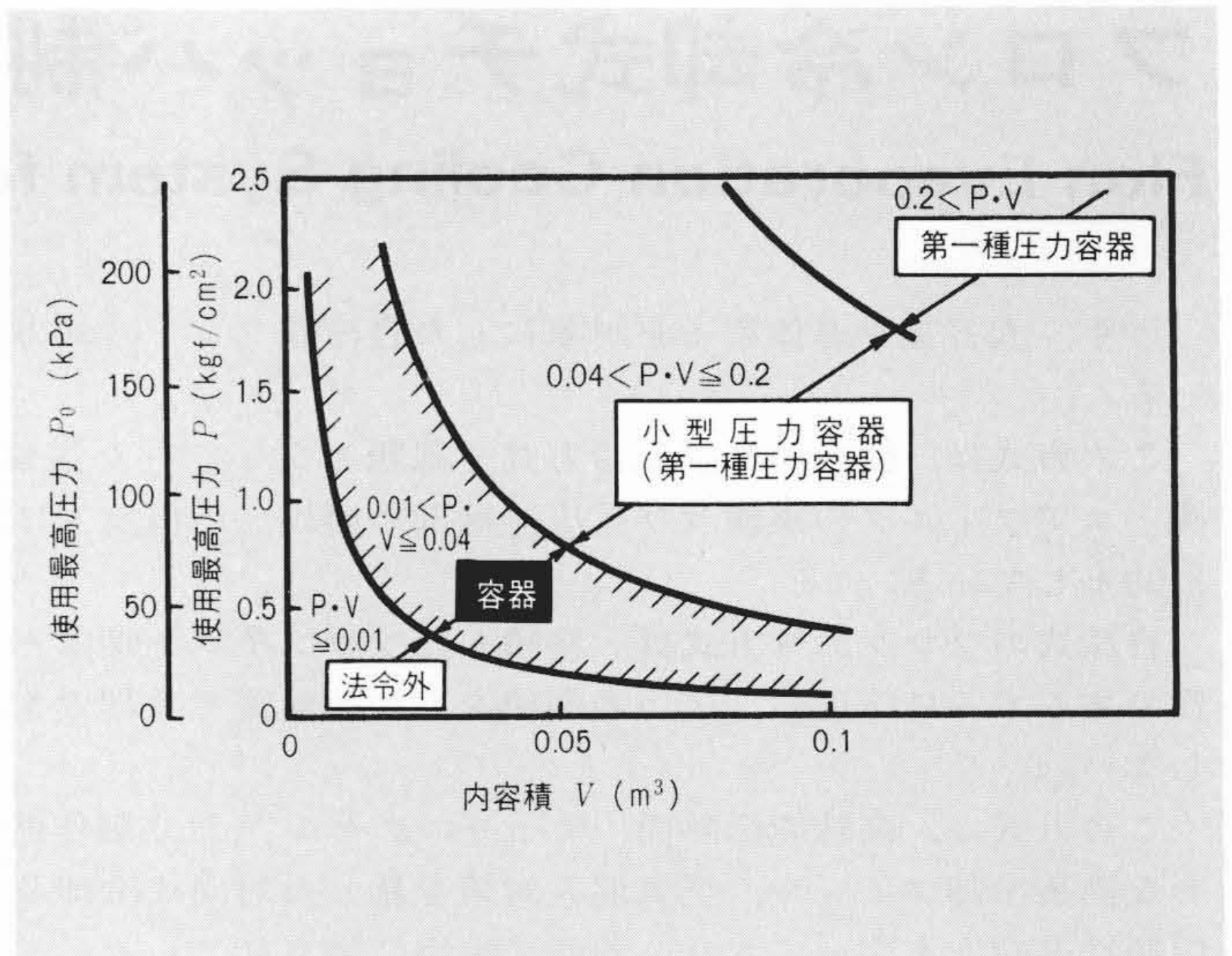


図3 法令による压力容器の分類 チョッパ用冷却ユニットは、压力容器としての規制が少ない小形な装置(「容器」)である。

が小形であるため従来の風冷方式で3~5スタックであったチョッパ回路一相分の素子を1スタックに集約し、更に、蒸発器の小形化を図ることができた。

3.3 余裕のある放熱能力

素子の発生熱量は放熱器を通じ外気へ伝えられるが、通風条件の変化により放熱能力が不足すると、素子の過熱や容器内の異常な圧力上昇を招くので、余裕のある設計が必要となる。一方、放熱器は床下の限られたスペースに収納されるこ

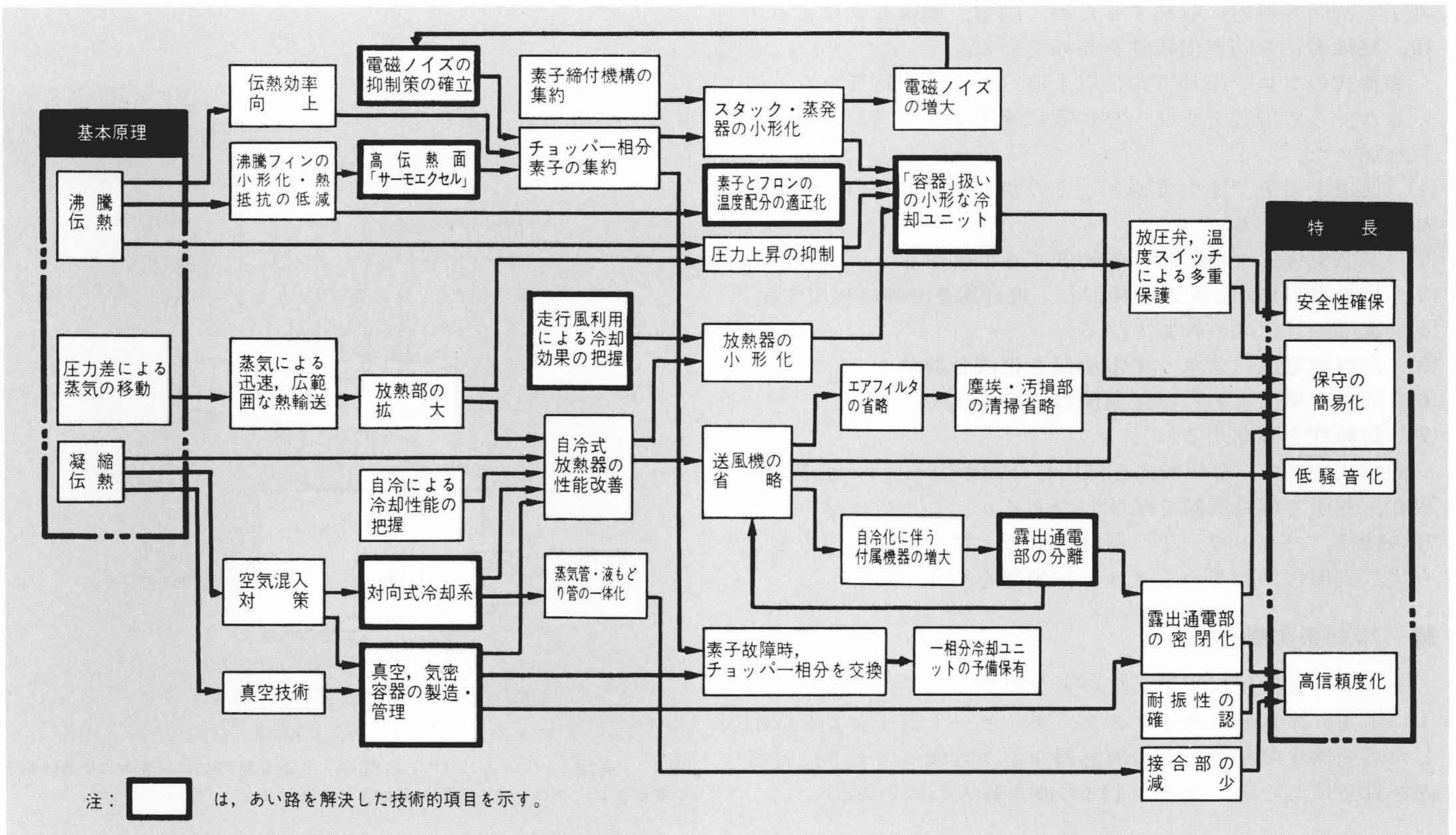


図2 フロン冷却式チョッパの特性関連図 フロン冷却の特長として、保守の簡易化、低騒音化及び高信頼度化が挙げられる。

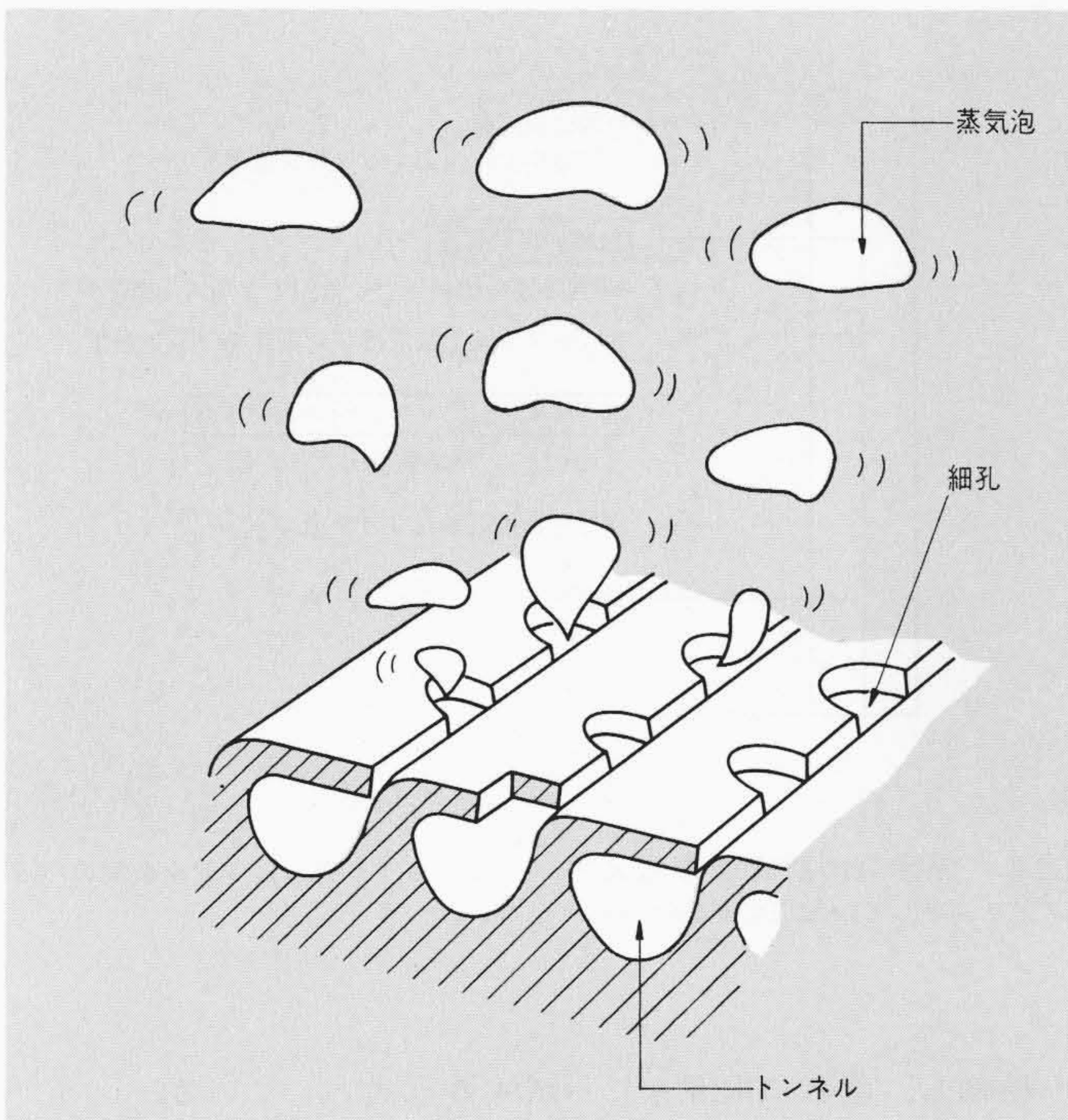


図4 「サーモエクセル」加工を施した高性能伝熱面 日立製作所と日立電線株式会社の共同開発による高性能伝熱面で、熱抵抗0.009℃/Wを実現した。

と、圧力容器として内容積に制約があることなどから小形化が要求される。このため、列車が走行するときには得られる走行風を利用することとし、走行風速や風取入れのガイドの形状、走行する路線の周囲条件、放熱器の配置などが通風に及ぼす影響を測定し、走行風が冷却に寄与する程度を調査した。この結果、放熱器は上下方向と車両の進向方向の双方に通風可能なフィン配列とし、放熱器を外部に突出させて積極的に走行風を利用する構造とした。しかし、放熱器の置かれる周囲の機器配置や路線の周囲条件が一定せず、冷却効果の変動的であることから、静止自冷で熱放散をし、余裕をもたせるために走行風も利用した設計としている。

3.4 空気混入時に生ずる冷却性能低下の抑制

凝縮管内に空気(不凝縮性)が混入すると、管内の壁面に熱伝導性の悪い空気が滞留し、フロン蒸気が凝縮管に放熱できず冷却性能を低下させる。これを防止するため、冷却系を気密容器とし、内部を脱気してフロンの封入を行なっている。しかし、長期間使用した場合の気密性の低下や、残留空気、吸蔵ガスの放出についてもあらかじめ考えておく必要がある。

これらに対処するため、冷却系は凝縮管内でフロン蒸気と凝縮液の流れを対向させた「対向式冷却系」を採用している。この冷却系は凝縮管内に空気が混入しても、蒸発器から送り込まれたフロン蒸気により空気を奥のほう(図1の右方)に押しやり、空気自身の浮力の助けも借りて上部の空気だめへ捕集し、少量の空気混入に対しては性能低下を抑えることができる構造としている。

4 冷却ユニット用部品

冷却ユニットを構成する部品は、いずれもフロンに腐食されない材料で構成する必要がある。ステンレス鋼、アルミニウム、セラミックなど厳選した材料を使用している。また、容器は完全気密を必要とするので、ろう付け、溶接などの気密接合部はすべてヘリウムリーク試験器により作業ステップ

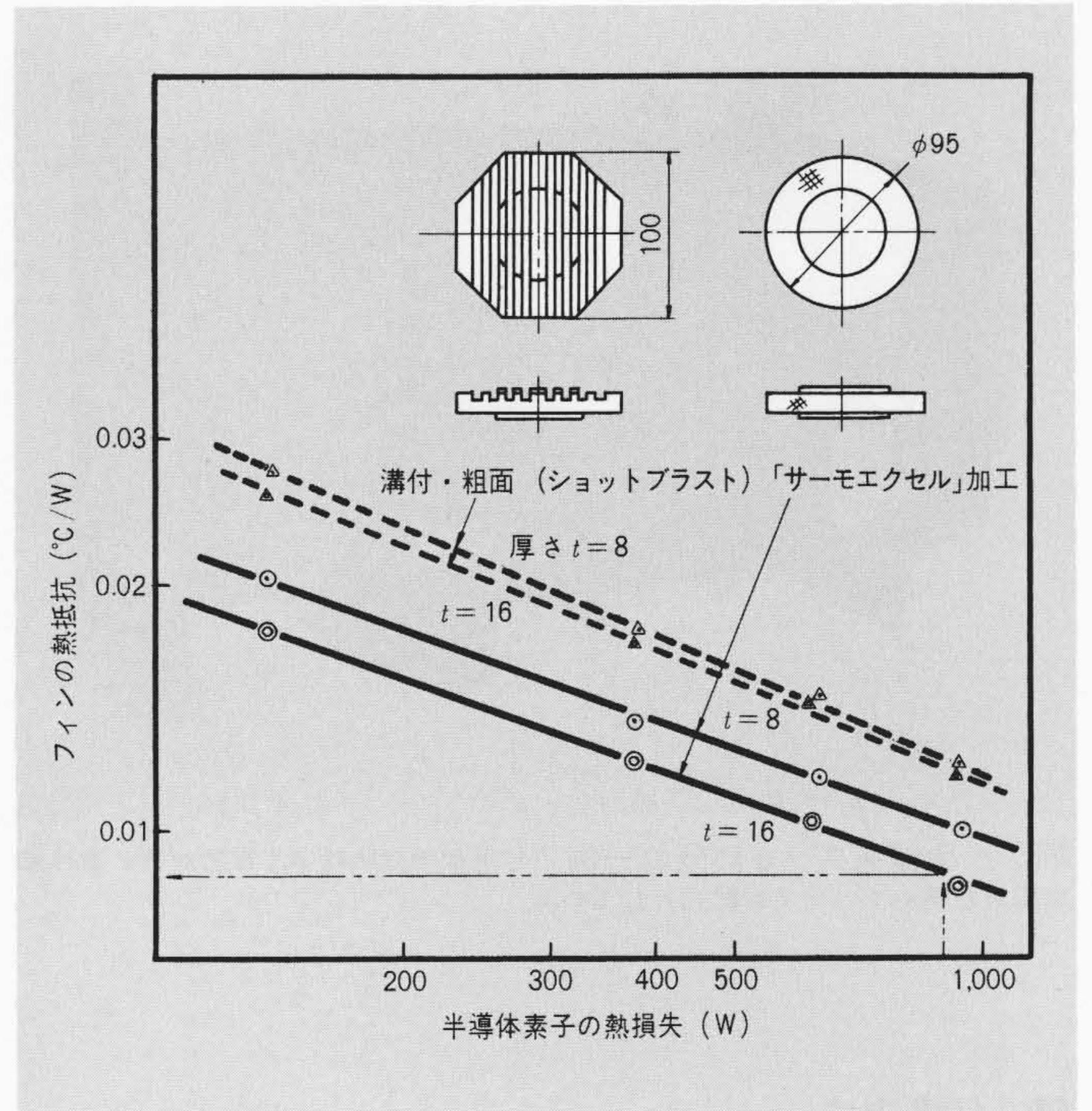


図5 沸騰冷却フィンの熱抵抗 「サーモエクセル」加工を施したフィンの熱抵抗が溝付・粗面のフィンに対し70~80%と低いことが分かる。

ごとに十分な気密確認を行なっている。

図6に、冷却ユニットに使用したサイリスタ、沸騰冷却フィン、ブッシングを示す。沸騰冷却フィンは表面に「サーモエクセル」加工を行なっており、サイリスタの約 $\frac{1}{2}$ の厚さである。またブッシングは、フロンで中心導体を冷却する構造をとり、小形化に寄与している。

図7は冷却ユニット部分の一例を示すもので、下部の蒸発器はステンレス鋼製、上部の放熱器は軽量化のためアルミニウムを用いている。これら材質の異なる上下をつなぐ接続管にはアルミニウム-ステンレス鋼の摩擦溶接継手を用いている。放熱器は自然対流と走行風の双方が得られるフィン配列としている。

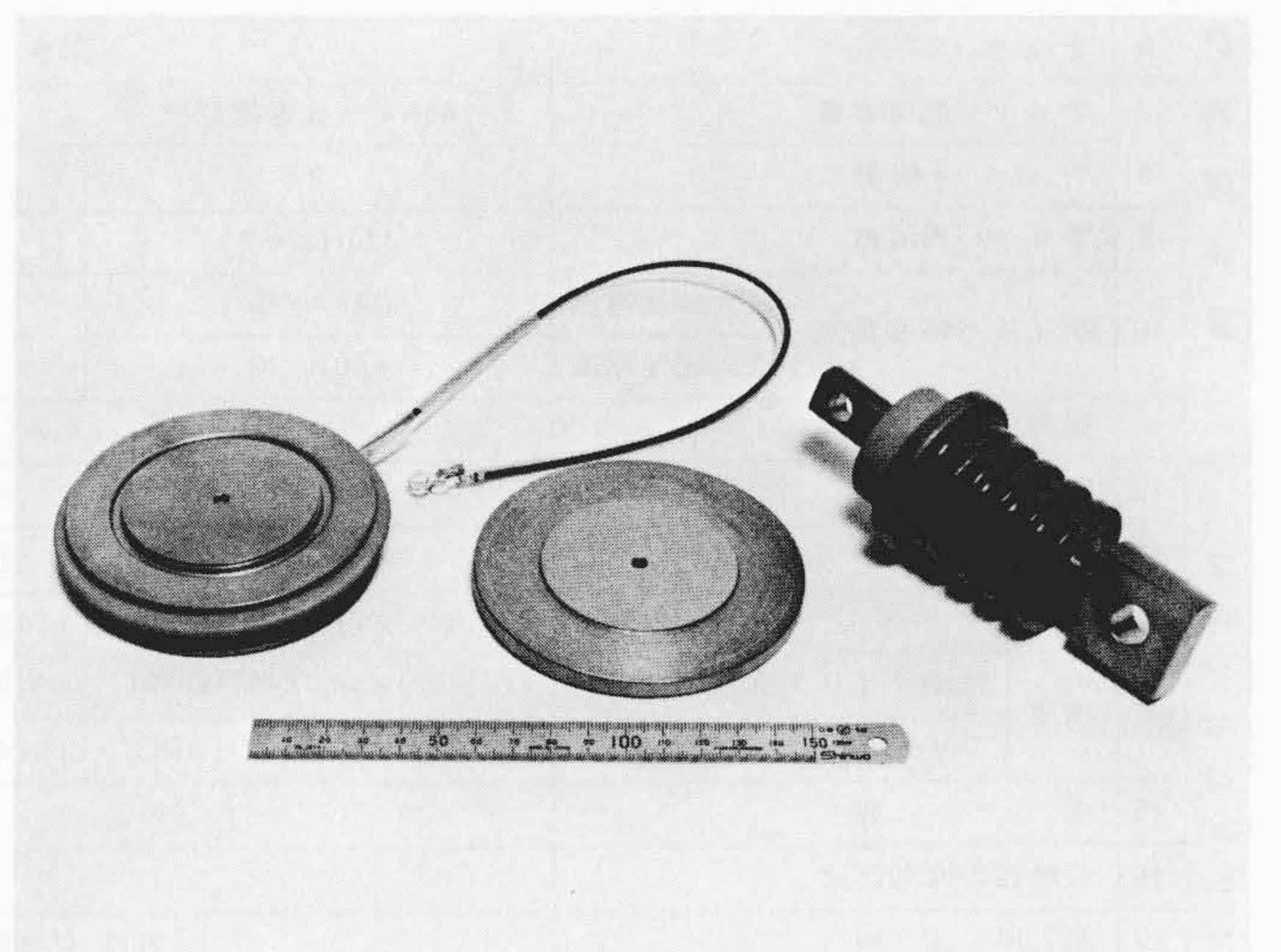


図6 フロン冷却に使用するサイリスタ(左)と沸騰冷却フィン(中央)及びブッシング(右) 「サーモエクセル」加工を施した沸騰冷却フィンの厚さはサイリスタの約 $\frac{1}{2}$ である。

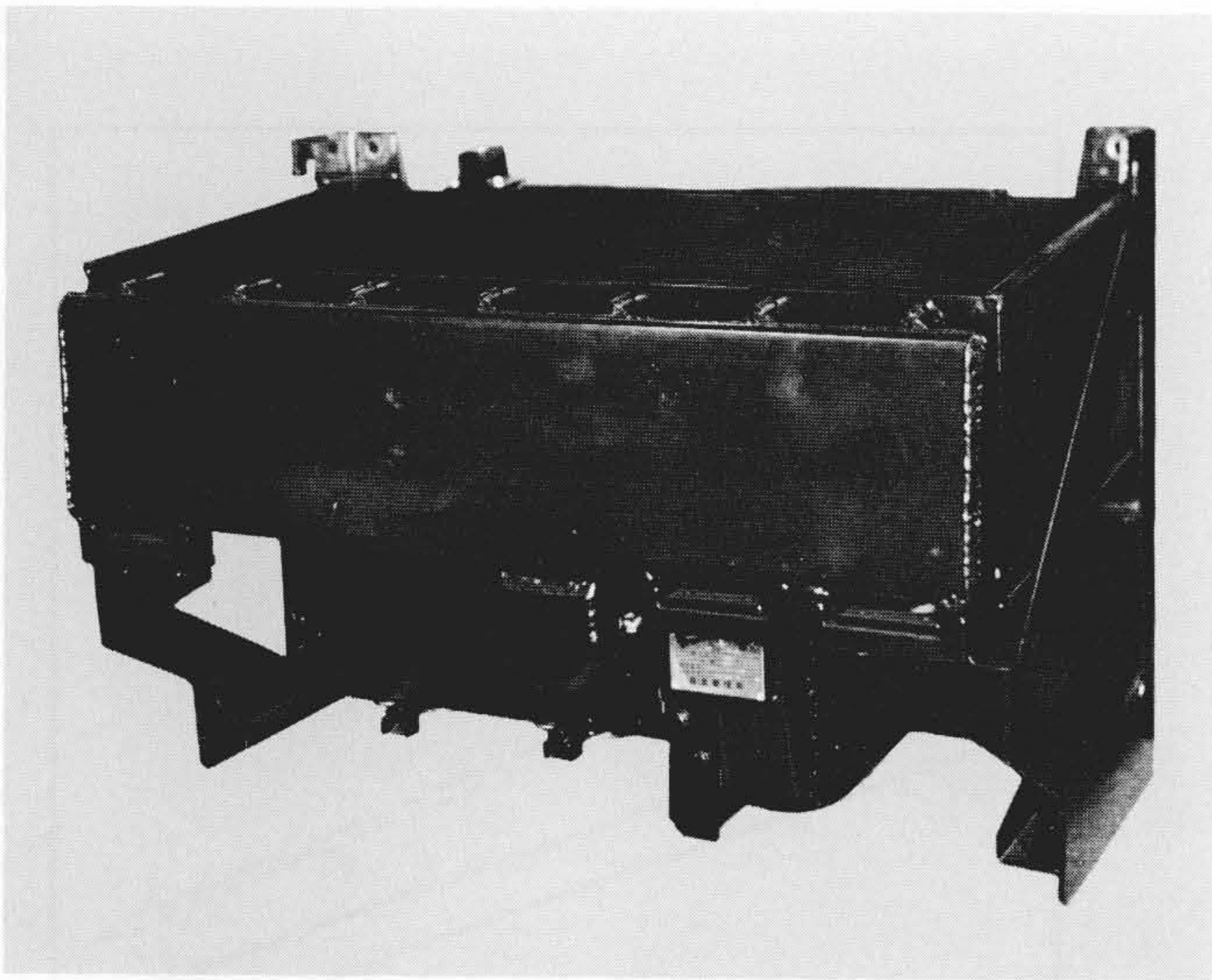


図7 冷却ユニット部分の一例 上部の放熱器は、自然対流と走行風の双方が得やすいフィン配列としている。

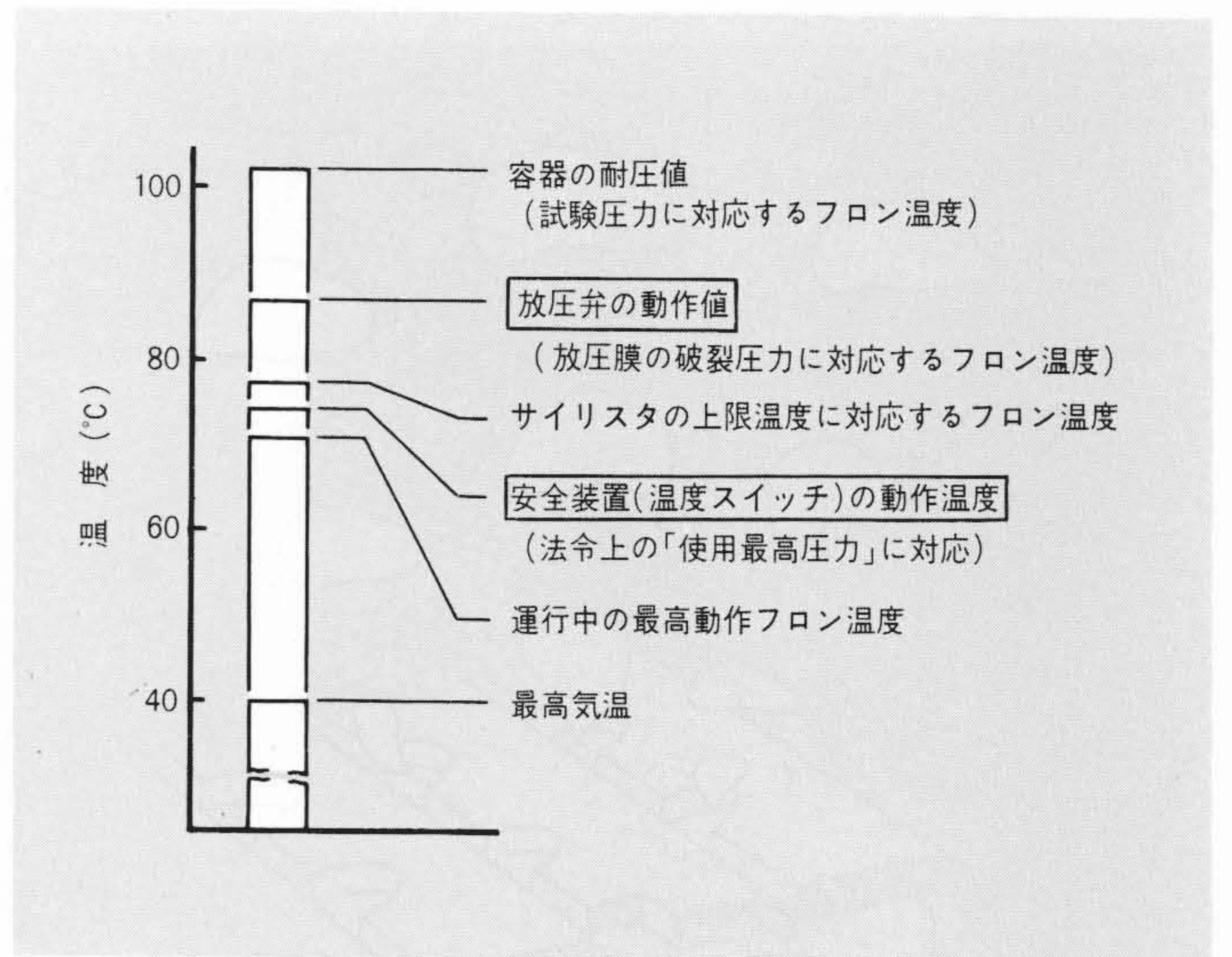


図8 保護系の設定値の考え方 温度スイッチによる安全装置のバックアップとして、放圧弁が設けられている。

5 保護方式

フロン冷却ユニットは、温度上昇による素子の保護以外に圧力上昇に対する保護も考慮する必要がある。通常フロンの動作温度は70~80°Cで、容器の内圧も100~200kPa(1~2ゲージ圧力 kgf/cm²)であるが、放熱器の目詰まり、空気侵入による伝熱不良など不測の事態をも考慮しておく必要があり、図8に示す保護系を設定している。法令上の安全装置としては、使用最高圧力に対応するフロン温度を温度スイッチによ

り検知し、直ちに電源をしゃ断する方式としている。

また、上記温度スイッチのバックアップとして容器の耐圧値以下で動作する放圧弁を備え、容器の破裂による危険を防止してある。この放圧弁は容器の完全気密を保つため、溶接構造の「反転式破裂板」を採用している。

6 フロン冷却チョッパ装置の実用化

表1に営業運転に投入されているフロン冷却チョッパ装置の主要諸元を示す。これらチョッパは110~145kW×8台の主

表1 フロン冷却式チョッパ制御装置の主要諸元 各路線で順調に稼働中である。

区分	No.	項目	納入先				
			帝都高速度交通営団 (千代田線)	札幌市交通局 (南北線)	名古屋市交通局 (鶴舞線)	大阪市交通局 (御堂筋線)	
電車 及 び 制 御 装 置	1	電車線電圧	1,500V	750V(第3軌条)	1,500V	750V(第3軌条)	
	2	列車編成	6M4T	8M	4M(6M2T)	6M2T	
	3	加 速 度	3.3km/h・s	4.0km/h・s	3.0km/h・s	3.0km/h・s	
	4	減 速 度	3.7km/h・s	4.0km/h・s	3.5km/h・s	3.5km/h・s	
	5	主電動機制御方式	チョッパによる電機子電圧連続制御(一定弱界磁)		同左(連続弱界磁)	同左(一定弱界磁)	
	6	チョッパ方式	回生ブレーキ付、電機子チョッパ直列消弧形反発パルス方式				
	7	チョッパ制御容量	145kW×8台電動機	110kW×8台電動機	135kW×8台電動機	130kW×8台電動機	
	8	チョッパ相数	2	2	2	2	
	9	チョッパ周波数	330Hz×2	200Hz×2	243Hz×2	200Hz×2	
	10	チョッパ制御電流	最大加速電流 745A/相 最大減速電流 640A/相	1,080A/相 1,020A/相	640A/相 570A/相	1,040A/相 960A/相	
	11	列車運転方式	ATC(自動列車制御装置)バックアップによる手動運転				
フ ロ ン 冷 却 ユ ニ ツ ト	12	冷却方式	沸騰式フロン、自冷				
	13	冷却ユニットの構成	2ユニット/相×2相	1ユニット/相×2相	1ユニット/相×2相	1ユニット/相×2相	
	14	素子 構成	主サイリスタ	2S(直列)×2P(並列)(CF01)*	1S(直列)×3P(並列)(CF01)*	2S(直列)×1P(並列)(CC01)*	1S(直列)×2P(並列)(CC01)*
			補助サイリスタ	2S(直列)×1P(並列)(CF01)*	1S(直列)×2P(並列)(CF01)*	2S(直列)×1P(並列)(CF01)*	1S(直列)×1P(並列)(CF01)*
			フリーホイリングダイオード	2S(直列)×1P(並列)(A01)*	1S(直列)×1P(並列)(A01)*	2S(直列)×1P(並列)(A01)*	1S(直列)×1P(並列)(A01)*
	15	冷 媒	フロン113(CCl ₂ F-CClF ₂)				
	16	放熱器の冷却方式	自 冷				
	17	適用法規	「容器」(「労働安全衛生法施行令第13条37号」, 「簡易ボイラ等構造規格」)				
18	営業運転開始時期	昭和53年9月	昭和53年11月	昭和54年2月	昭和54年5月		

注：* CF01：2,500V 400A, CC01：2,500V 600A, A01：2,500V 1,600A

電動機を制御する。フロン冷却ユニットはいずれも「容器」扱いとし、保守の簡素化を図っている。

図9に札幌市交通局納めのフロン冷却チョッパ装置を示す。冷却ユニットは車両の進行方向に対し間隔を置き、放熱部を車側がわに突出させて配置し、走行風を受けやすいように考慮している。図10はこのフロン冷却チョッパ装置を用いた力行、回生ブレーキ特性のオシログラムを示すもので、起動・停止がスムーズに行なわれていることを表わしている。

図11は帝都高速度交通営団納めのチョッパ装置で、チョッ

パー相分を二つの冷却ユニットに分割し、それぞれを「容器」扱いとしている。このチョッパ装置の営業線での温度上昇を図12に示すが、温度上昇は許容値に対し十分な余裕がある。

図13に示した名古屋市交通局納めのチョッパ装置には、ユニットごとに圧力計が設けてあり、内圧を知ることができる。この圧力計は気密容器に接続するため、表示精度の確認は困難であるが、圧力の急変、2ユニット間の圧力比較などにより異常を早期に発見できる長所がある。

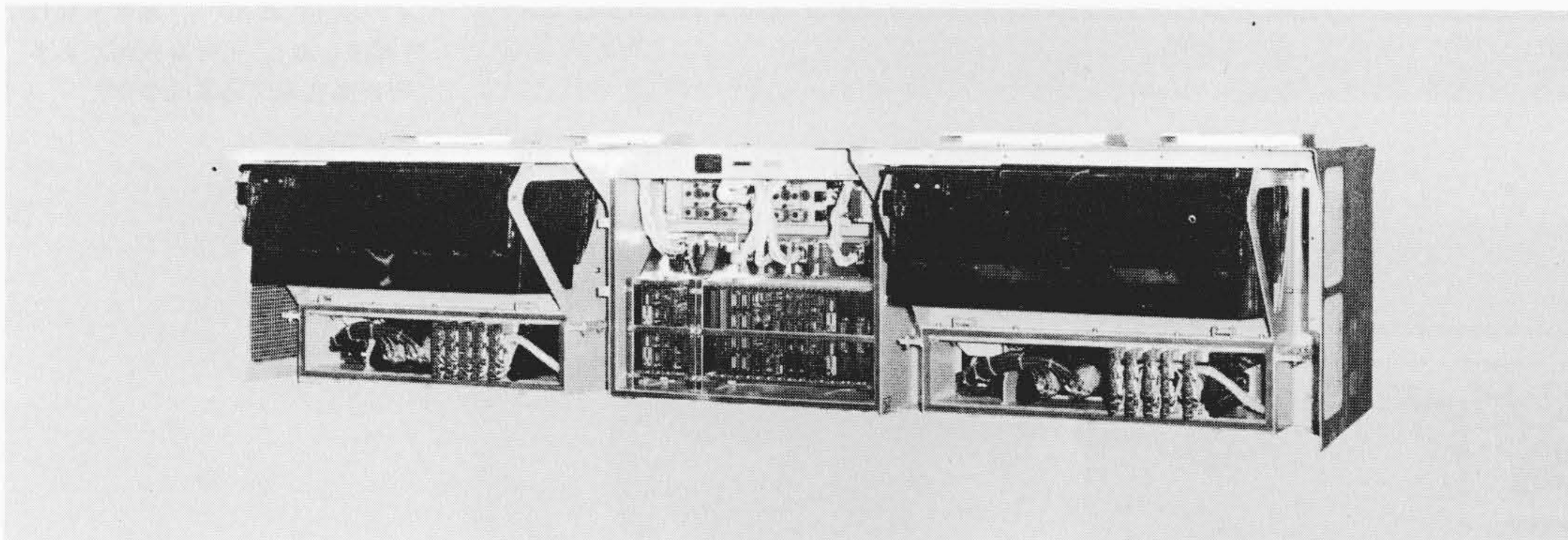


図9 札幌市交通局納めフロン冷却式チョッパ装置
前面のカバーを外した状態を示している。冷却ユニットは、走行風による冷却効果を得やすくするため左右に配置してある。

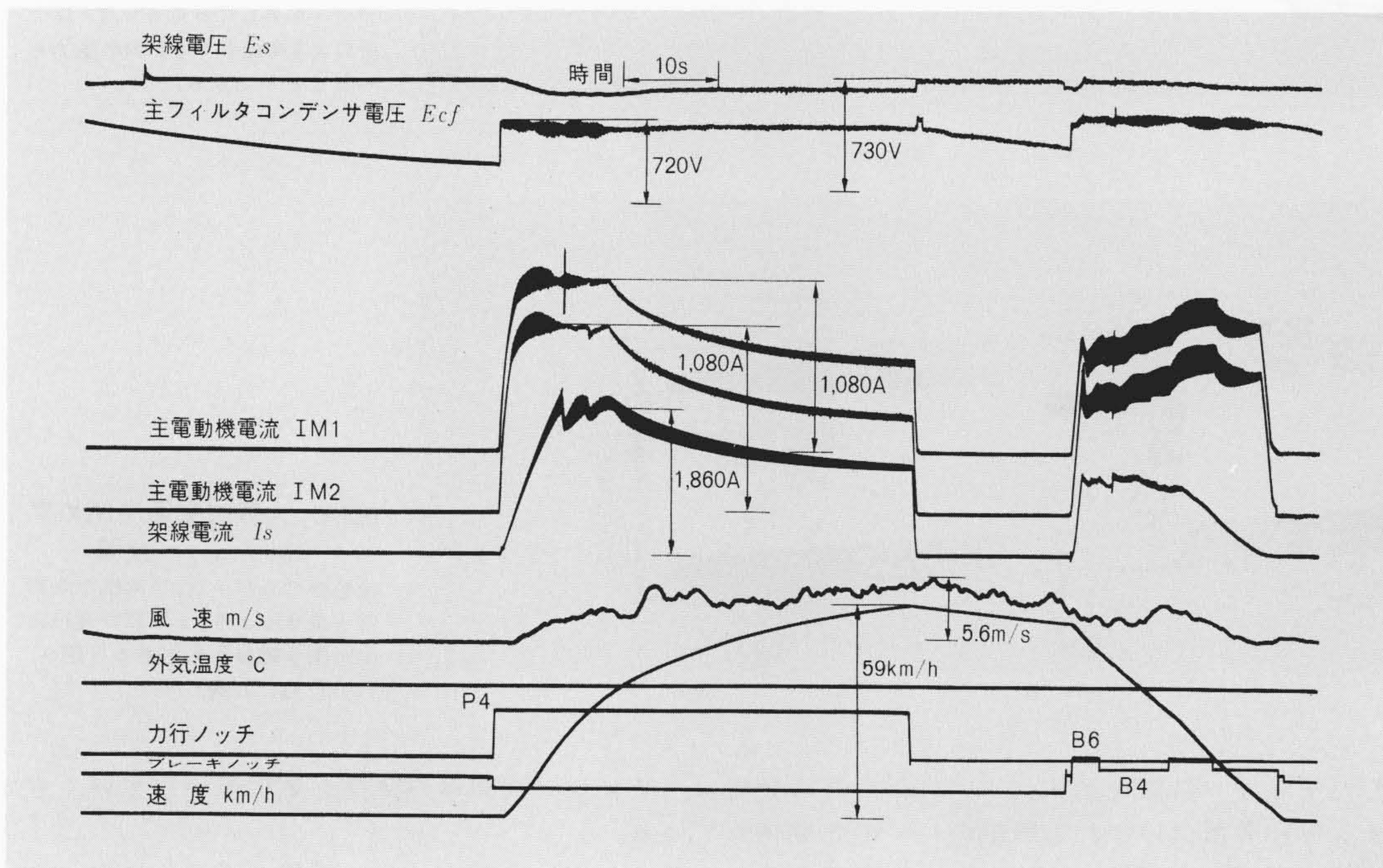


図10 フロン冷却式チョッパ装置を用いた力行、回生ブレーキ特性オシログラム
起動、停止がスムーズに行なわれている(札幌市交通局の例)。

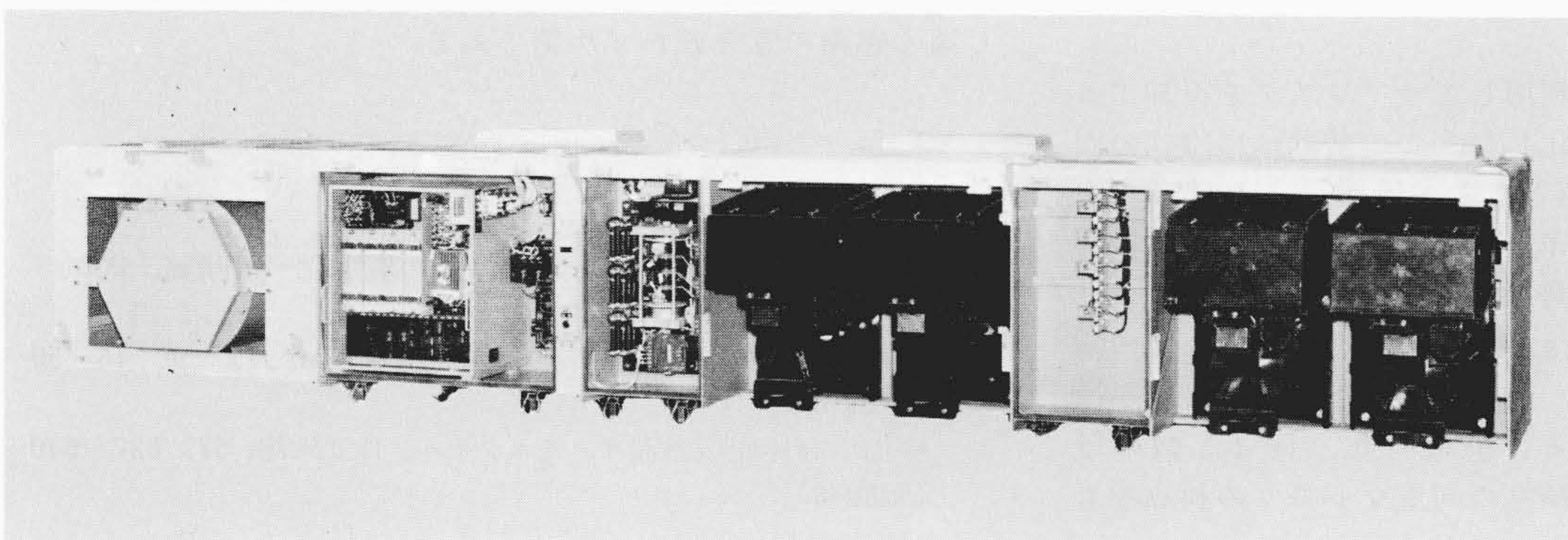


図11 帝都高速度交通営団納めフロン冷却式チョッパ装置
チョッパ一相分を二つの冷却ユニットで構成し、「容器」扱いにしている。重量も70kg弱と軽量化されている。

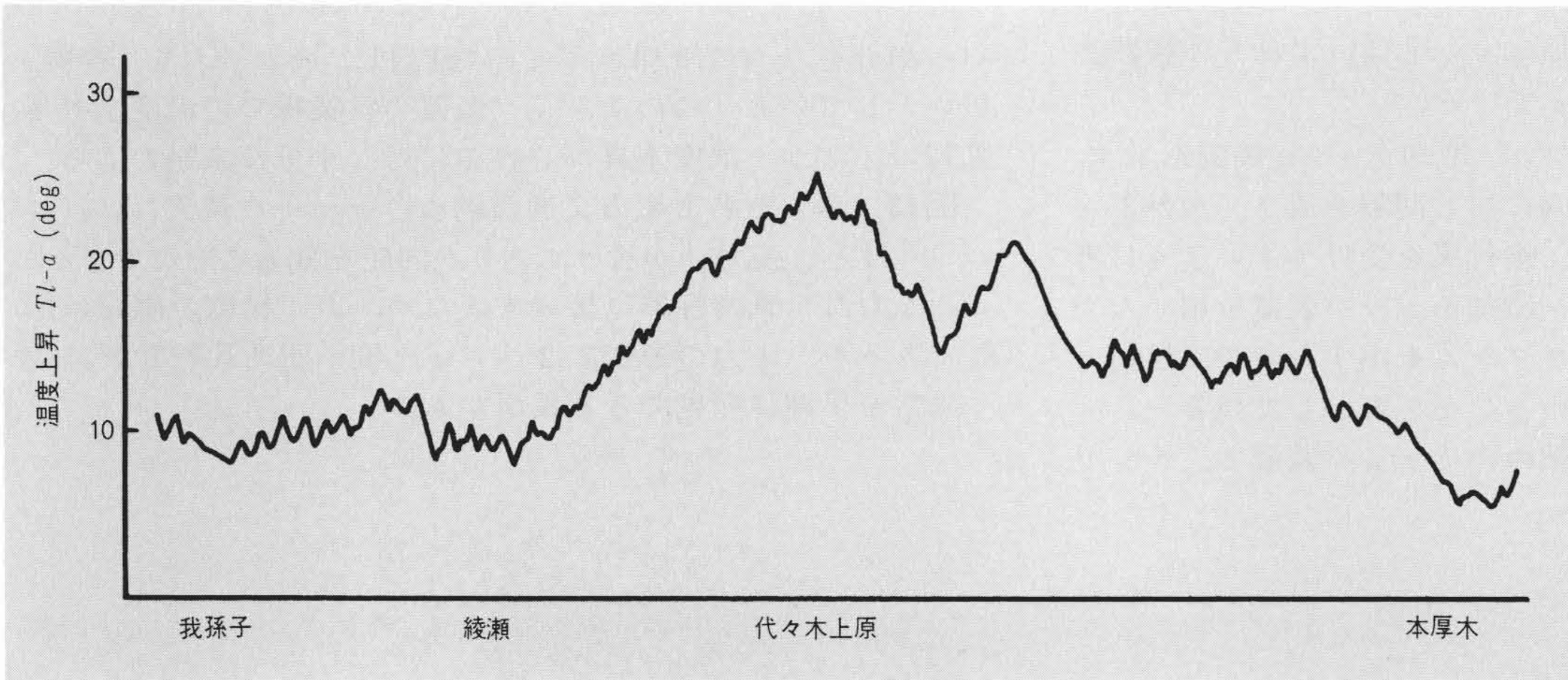


図12 営業線におけるフロンの温度上昇 温度上昇は許容値に対し、十分な余裕がある(帝都高速度交通営団の例)。

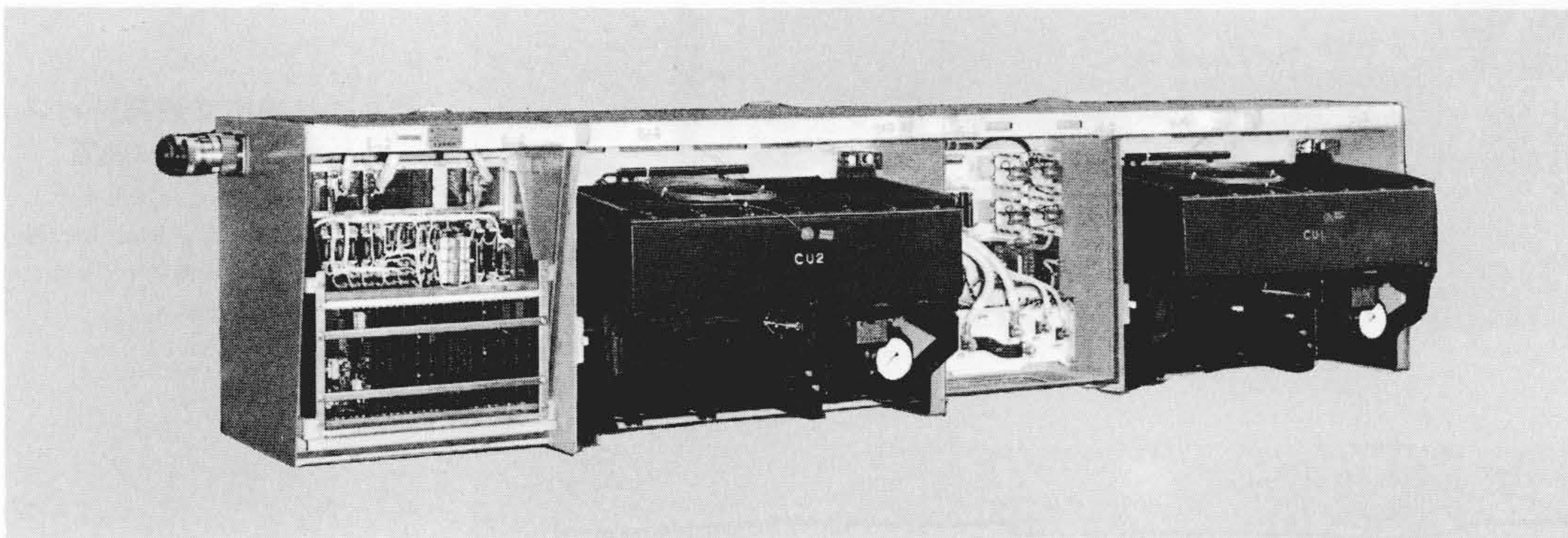


図13 名古屋市交通局納めフロン冷却チョッパ装置カバーを外した状態を示す。圧力計により冷却ユニット内の圧力をみる事ができる。

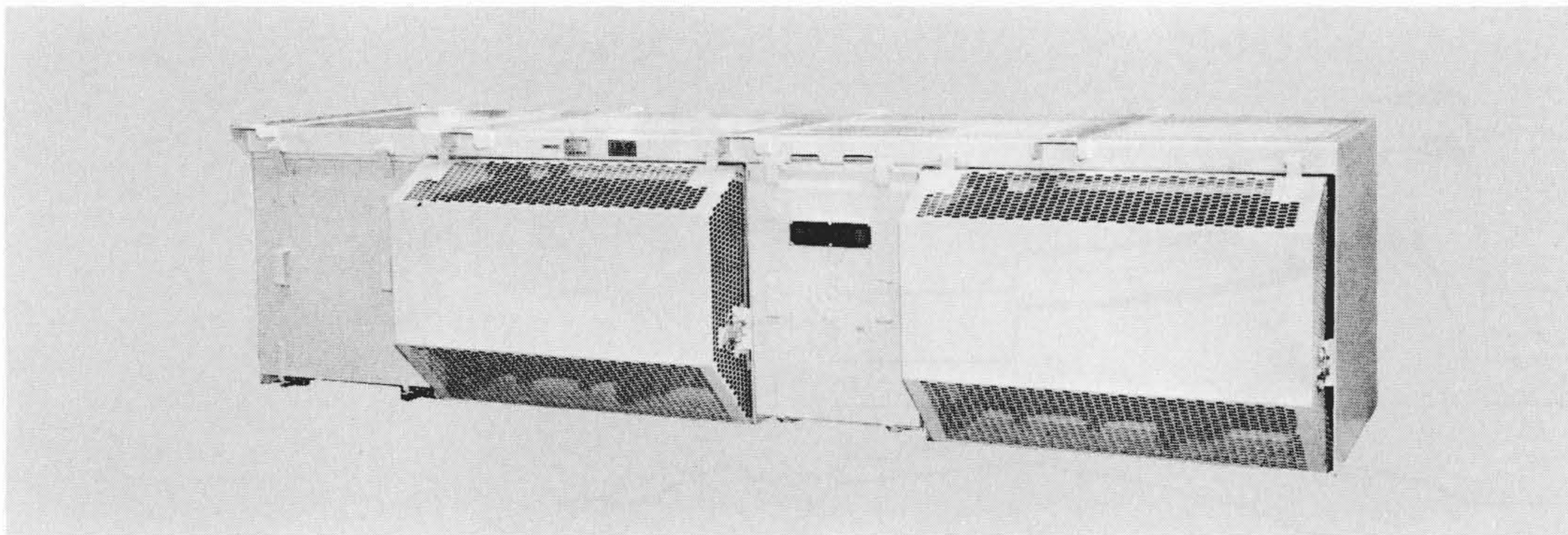


図14 大阪市交通局納めフロン冷却チョッパ装置放熱器のカバーは、自冷風と走行風を通せるよう、上下及び進行方向の面を網目にしてある(図9, 11及び13に共通)。

図14に大阪市交通局へ納入したチョッパ装置を示す。

なお、これらのフロン冷却チョッパ装置はいずれも既納の強制風冷形チョッパ装置と互換性を考慮した構造・寸法としている。

7 結 言

フロンの沸騰、凝縮作用を利用してサイリスタを冷却する自冷式のチョッパ装置を実用化した。この装置は自冷式のため、都市近郊電車として問題となる送風機による騒音がなく、従来の強制風冷方式で保守上負担となっていた気吹き、清掃、エアフィルタの交換作業を省略できた。また、サイリスタを収納した冷却ユニットは、使用上圧力容器としての規制のない小形、軽量なもので、装置の寸法も従来の強制風冷方式と同等で互換も可能である。低騒音化、保守工数の低減、保守作業環境の改善、信頼性の向上など多くの利点をも

つこの装置は、チョッパ制御車の特長を更に生かしていくものと期待している。

終わりに、このフロン冷却チョッパ装置の実用化に当たり種々御指導、御助言をいただいた帝都高速度交通営団、札幌市交通局、名古屋市交通局及び大阪市交通局の関係各位に対し深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 鈴木、ほか3名：フロン沸騰冷却の実用化への問題、電気学会全国大会S8-5
- 2) 田村：冷却技術と保護方式の進歩、OHM、65、9、46~50(昭53-8)
- 3) 中山：高性能伝熱面サーモエクセル、日立評論、57、637~640(昭50-8)