小型冷凍機の移動体通信への応用

伊東 正篤, 岡崎 三也, 上野 祥樹, 青木 賢之

無線移動体通信先端技術研究所 日進市米野木町南山 500 番地 1

(1996 年 10 月 11 日受理)

Application of Small Cryocooler for Mobile Telecommunication

Seitoku ITO, Mitsunari OKAZAKI, Yoshiki UENO and Masayuki AOKI

Advanced Mobile Telecommunication Technology Inc., 500-1 Minamiyama, Komenoki, Nisshin 470-01

(Received October 11, 1996)

Synopsis :

The recent development of high-temperature superconducting (HTS) filters for the receiver front-end of mobile telecommunication base stations and small cryocoolers is described in this paper. The merits of the HTS filters are small size, low noise and sharp skirt. One of these filters combined with a cryogenic low-noise amplifier contributes greater noise reduction to the receiver and improves the Carrier/Noise power ratio (C/N) of the transmission. The HTS filters, having high quality factors, are also effective for reducing out-of-band interference. On the other hand, cryogenic cooling is an essential and important technology for HTS filters. A reliable, low-cost, small cryocooler is required. In the USA, HTS filter systems have been field-tested using prototype equipment with small cryocoolers.

Keywords : HTS filter, mobile telecommunication, small cryocooler, low noise, high quality factor

1. はじめに

最近の移動体通信の普及は目覚ましく、移動電話の加入者数の増加は当初をはるかに上回り 96 年 4 月末現在で 1,300 万台と急速に増加している。またマルチメディア時代を迎えるに当たり、大量のデータを伝送する必要性から周波数利用効率がよく高品質な通信が行える高能率移動体システムの実現が急務となっており、このための様々な技術開発が各所で精力的に行われている。

一方、超伝導体が発見されて以来、電気抵抗がゼロという特性を用いて新規な応用分野が開かれると期待されてきた。特に液体窒素温度程度で動作する高温超伝導体(High Temperature Superconductor, 以下 HTS と略す)は実用化が身近なものと考えられている。その中でも高周波分野においては、マイクロ波帯での表面抵抗が常伝導金属に比べて 1 桁以上低いことを利用

して、アンテナ、フィルタ、ミキサなどへのデバイス応用が研究されており実用化も間近いと考えられている¹⁾。この中でフィルタについては、HTS を用いれば原理的に高無負荷 Q 化が可能であり、フィルタの低損失化、あるいは多段化によるシャープスカート化が期待されている。

本解説では小型冷凍機の応用の一つとして最近注目されるようになった、移動体通信基地局用高温超伝導フィルタシステムを取り上げ、その中でも受信用高温超伝導フィルタの開発動向とそのシステムアプリケーション、そして高温超伝導フィルタを冷却する冷凍機とについて述べる。

2. HTS の高周波特性

2.1 HTS 基板

従来技術によるフィルタの性能限界を打開して小型で高性能な平面型フィルタを実現するためには、金属

材料に変わる飛躍的に低損失な HTS 材料の成膜技術の開発を行うことが必要である。HTS 材料として代表的なものとしては、イットリウム系酸化物 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$)、タリウム系酸化物 ($\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ など)、ビスマス系酸化物 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ など) などが挙げられる。基板材料としては酸化マグネシウム (MgO)、ランタンアルミナ (LaAlO_3)、サファイア (Al_2O_3) が用いられる。

ところで移動体通信では現在 800 MHz~1.9 GHz の周波数が日本では使われている。また今後世界標準の移動体通信として注目されている FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunication System) を考えに入ると 1~3 GHz の準マイクロ波帯が移動体通信用として使われることになる。このことから移動体通信用平面フィルタとしては多段化を前提にすれば比較的大型になる。Zhang らは中心周波数 900 MHz で、9 段フィルタを $\phi 50$ mm の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{LaAlO}_3$ の HTS 両面基板を用いて実現している²⁾。このような大面積の両面成膜方法の主な方法としてスパッタ法と蒸着法がある。このうち蒸着法は最近 $\phi 9$ インチの成膜ができるようになりさらに大型の基板がフィルタ用に供給が可能になってきている³⁾。

2.2 HTS 膜の表面抵抗

超伝導状態とは直流の電気抵抗がゼロになる状態を意味している。したがって超伝導状態の物質に電流を流しても損失は発生しない。ところが、交流それも高周波と呼ばれる周波数帯域では超伝導状態においても電気抵抗は完全にゼロにはならない。これは超伝導状態において通常の電子と超伝導電子が併存している (2 流体モデルと呼ばれている) ためである。前記のスパッタ法で作製した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 膜の表面抵抗の例を Fig. 1 に示す。図中の各記号は 3 個のサンプルの値

Fig. 1 Temperature dependence of the surface resistance at 10 GHz.

を示している。70 K 以下の温度では 0.5 mΩ 以下の表面抵抗になっているが 70 K を越すと急激に表面抵抗は大きくなっている。液体窒素温度での使用を考えると更に高温での表面抵抗の低減が望まれる。

3. HTS 受信フィルタ

移動体通信における高周波フィルタの役割は、必要な信号と不要な信号を周波数分離して微弱な信号強度でも十分な通信品質が得られるようにすることである。しかしながら従来から使用されている空洞共振器や誘電体共振器を用いたフィルタでは、金属材料や誘電体材料が有する無負荷 Q 値の限界から、高い周波数分離特性を持つ多段でシャープスカートのフィルタを設計すると損失が増大して熱雑音の増加を招き、結果として微弱な信号は熱雑音に埋もれて通信品質を劣化させてしまうといった問題が存在する。フィルタの性能限界を決める主たる要因には金属材料の導体損、誘電体材料の誘電体損、フィルタの構造による放射損の三つがある。ここで金属材料の代わりに HTS を用いれば導体損を大幅に低減することができるため高い無負荷 Q 値を持ち低損失で多段のシャープスカートフィルタを実現することが可能になる。Fig. 2 に我々が開発したフィルタの外観写真と Fig. 3 に特性例を示す。25 mm×15 mm の大きさの LaAlO_3 基板上に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を成膜し、7 段チェビシェフフィルタを形成している。挿入損失は 0.3 dB 以下であり HTS の特徴を生かした小型、低損失でシャープカットなフィルタが実現している。

米国においては 1990 年頃より DARPA (Defence Advanced Research Project Agency; 現 ARPA) の

Fig. 2 Photograph of a 7-pole HTS filter.

Fig. 3 Frequency response of the HTS filter.

資金援助を得て、コンソーシアム (CSE: Consortium for Superconducting Electronics) をつくって超伝導のマイクロ波応用の研究開発を行ってきた。当初の参加企業・研究機関は IBM, AT&T, MIT, Lincoln Lab. (MIT) であったが、現在は Conductus, CTI が加わり、HTS フィルタの開発を精力的に行っている。これは元々軍事目的で始まった研究が、東西の緊張緩和、ソ連の崩壊などにより軍事研究成果を民生に転換しようとする動きの一環であると考えられる。現在、米国においては HTS フィルタを移動体通信に応用しようとする動きが具体的になってきている。先に述べた Conductus の他、STI (Superconducting Technologies Inc.), SCT (Superconducting Core Technologies), ISC (Illinois Superconductor Corp.) 等の会社が HTS フィルタの開発を進めている。基地局の受信用フィルタについてはセルラー電話や、PCS の基地局用に用いるべく現在フィールドテストが進められている。送信フィルタの方はまだ開発段階だが中心周波数 2 GHz、比帯域 1.2% の 5 段フィルタで 25 W の送信電力において挿入損失 0.25 dB のフィルタが動作温度 45 K で実現できている⁴⁾。

4. HTS 受信フィルタの移動体通信基地局における応用

受信用 HTS フィルタを移動体通信基地局に用いるメリットは、前述したように①小型、②低雑音、③シャープスカートである。

4.1 小型化

従来の基地局に用いられてきた空洞共振器フィルタ

は 1 個で数千 cc もあり、一つの基地局で 3 つのセルの通信をまかなうとして、さらにダイバーシティ方式を採用すると 6 本のアンテナが必要になり、合計 6 個のフィルタが必要となる。これを HTS フィルタに置き換えることができれば、HTS フィルタは数十 cc 程度であるため低温に冷却するための冷却器と組み合わせても十分に小型化が可能になる。STI では 850 MHz 帯のフィルタの場合で従来フィルタに比べ、冷却器を入れても大きさが 16% になると試算している⁵⁾。

4.2 低雑音化

HTS フィルタだけでなく低雑音増幅器も同時に冷却すれば熱雑音が低減し、雑音指数が向上して、基地局の感度が向上する。このことは特に郊外の平地での効果が大きく基地局のセル半径を増大させることが可能になり、結果として基地局設置数が削減でき通信事業者の初期設備投資が節約できることになる。レシーバの雑音指数は 70 K ないし 60 K で 1 dB 以下が実現されている。Table 1 に SCT が見積もった雑音指数の低減度を示す⁶⁾。これによればシステムの雑音指数は HTS フィルタを用いれば 4~6 dB 低減する。この結果基地局の受信機の感度が向上し、セルのカバレッジが 80% 向上するとしている。これは今後膨大な数のマイクロセル基地局を設置する上でコスト削減上大きな貢献をすると思なされている。

ここで衛星移動体通信システムの熱雑音の低減について検討してみる。通信ニーズは大量でかつ高速の伝送を必要としており、所要 E_b/N_0 (ビットあたりのエネルギー/周波数あたりの雑音電力) を効率よく確保するために受信系の低雑音化は重要な課題となっている。HTS フィルタおよび受信回路の一部を冷却することによる C/N (キャリア電力/雑音電力) 改善効果を検討し、また改善効果に影響するアンテナ雑音温度についても併せて検討してみる。今回対象とした受信システムのブロック図とそのパラメータを Fig. 4 に示す。受信システムの一部を 300 K から 77 K に冷却することによる主なパラメータの変化は、まず、受信フィルタについては HTS フィルタ適用により、フィルタの挿入損が 1.5 dB から 0.4 dB に改善され、同時に雑音指数を 1.5 dB から 0.25 dB に改善されると想定した。また、低雑音増幅器 (LNA) については 77 K に冷却することにより、雑音指数を 1.5 dB から 0.44 dB に改善できると想定した。以上の想定のもとに受信システムの雑音指数を計算したところ 3.43 dB から 1.17 dB に改善できることがわかった。

Table 1 NF calculations.⁶⁾

	Standard*	Low noise**	HTS filter
Filter loss	1.5 dB	1.5 dB	0.5 dB
Filter temperature	320.0 K	320.0 K	60.0 K
Coax and connector loss	2.0 dB	6.0 dB	6.0 dB
Coaxial temperature	320.0 K	320.0 K	320.0 K
Amplifier gain	20.5 dB	24.5 dB	23.5 dB
Amplifier NF	3.0 dB	3.0 dB	0.5 dB
Overall system gain	17.0 dB	17.0 dB	17.0 dB
Receiver noise figure	6.6 dB	4.6 dB	0.7 dB

* コンベンショナルなフィルタ, ** コンベンショナルなフィルタをアンテナ直下に取り付けた場合

Fig. 4 Block diagram of the front-end of a satellite mobile telecommunications system.

受信系の C/N 改善度合は、受信システムの低雑音化だけでなく、アンテナ雑音温度にも依存する。アンテナ雑音温度は人工雑音、熱雑音の分布とアンテナ指向性で決定される。想定した雑音の分布を Fig. 5 に示す。仰角 45 度以下では雑音温度 300 K (郊外での人工雑音温度)、仰角 45 度以上では雑音温度 30 K (宇宙雑音温度) と想定した。雑音温度はアジマス方向には依存しないと想定した。またアンテナ指向性について

Fig. 5 Supposed noise distribution and the directional distribution of two antennas.

では、ブロードな指向性を持つ平面アンテナと鋭い指向性を持つパラボラアンテナを想定し、東京での静止衛星仰角を参考として仰角 50 度とした。アンテナ雑音は (雑音温度 × アンテナ指向性) を全方向で積分して求められる。その結果、パラボラアンテナでは雑音温度 41 K、平面アンテナでは雑音温度 120 K になる。

以上、受信系雑音指数とアンテナ雑音温度の計算結果を用いて、受信システムの一部を 77 K に冷却することによるアンテナを含めた通信システムの C/N 改善効果 $(C/N)_{\text{improve}}$ を下式のように求めた。

$$(C/N)_{\text{improve}} = 10 \times \log((T_a + T_s \times (F_c - 1)) / (T_a + T_s \times (F_1 - 1)))$$

T_a : アンテナ雑音温度

T_s : システム温度

F_c : 従来システムの雑音指数

F_1 : 低雑音システムの雑音指数

この式から小型地球局 (パラボラアンテナ) の場合で $(C/N)_{\text{improve}} = 4.6 \text{ dB}$ 、移動局 (平面アンテナ) の場合で $(C/N)_{\text{improve}} = 3.5 \text{ dB}$ となる (Fig. 6)。

Fig. 6 Results of C/N improvement.

また $E_b/N_o = C/(R_b \cdot N_o)$ (R_b はデータ伝送速度) であるので C/N を 3 dB 改善できれば, 原理的にはデータ伝送速度を 2 倍にしても E_b/N_o は変わらないということになり, 通信システムの能率は 2 倍に向上するといえる。

4.3 シャープスカート化

電波需要の急増, 種々の通信システムの実用化により, 移動体通信システムにおける他システムからの妨害が問題となりつつある。その対策として, アンテナの向き, IF フィルタシャープスカート化の他に, それぞれの利用周波数の間にガードバンドを設けることにより対応している。この問題を RF 受信フィルタシャープスカート化により解決できないか検討してみる。

想定した, ブロック図, フィルタ特性, LNA 特性はそれぞれ, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 の通りである。ある通信システムに他の強力な電波が入力されこの結果

Fig. 7 Planned system block diagram.

Fig. 8 Frequency response of HTS filters.

Fig. 9 Low-noise amplifier characteristics.

Fig. 10 Low-noise amplifier output spectrum.

Fig. 11 Relationship between unloaded Q and insertion loss.

受信部の LNA が飽和し, LNA の非線形性が原因で発生する 3 次相互変調歪みが高レベルで受信帯域に落ち込む。そこで RF 受信フィルタをシャープスカート化する事により受信帯域に落ち込む 3 次相互変調波を排除できるかどうか検討してみる。4 段フィルタでは 3 次相互変調成分は希望波以上のレベルであるのに対

し、7段フィルタでは希望波信号レベル以下、10段フィルタにするとノイズフロア以下にすることができる (Fig. 10)。受信フィルタの挿入損を 0.2 dB とすると、フィルタにおける共振器の無負荷 Q は 10 段フィルタでは 50,000 以上が必要であり、HTS 材料のみがこのような高 Q を達成できる (Fig. 11)。このように、RF 受信フィルタのシャープスカート化により、ガードバンド縮小、あるいは、通信不能だった場所での通信が可能となれば、占有帯域、場所の両面からの周波数利用効率が向上することになる。

以上述べたように、HTS フィルタを移動体通信に用いれば小型化、低雑音化、シャープスカート化が図られ、通信の C/N の改善や他の帯域の妨害波を排除することができるために、通信の高能率化に大きく貢献できると考えられる。

5. 小型冷凍機

Fig. 12 に我々が研究用に開発した受信用 HTS フィルタシステムの外観を示す。冷凍機はインテグラル型スターリング冷凍機であり、HTS フィルタ 1 個を 60 K 程度まで冷却する事ができる。ハンドリングを重視し冷凍機の大きさはおおよそ 400 cc である。短期間の研究用ではなく実際のシステムに組み込む場合、冷凍機にいかなる特性が求められるかを次に述べる。

5.1 小型冷凍機に求められる特性

Table 2 に移動体通信用小型冷凍機に求められるパラメータおよび要求値を挙げる。ただし、この中に記した数字は現在想定できる基地局システムに用いた場

Fig. 12 Photograph of an HTS filter system.

Table 2 Parameter and requirement.

Parameter	Requirement
Load temperature	60–77 K
Cooling capacity	~6 W
Life	>MTBF 5 year
Residual vibration	—
Temperature stability	$\pm 0.5 - \pm 1.0$ K
Cooldown time	Δ
Input power	Δ
Volume	Δ
Weight	Δ
Ambient temperature	-40 – +60°C
Ambient relative humidity	0 – 100%
Cost	(\$ 1,000 or 10% of the total system)

合のものである。また、 Δ をつけたパラメータは条件によって考慮を要するものである。以下、各パラメータについて説明を加える。

(1) 冷却温度

前述したように冷却温度がある値以下にならないと HTS 膜の表面抵抗が下がらずフィルタ設計値を満たさないことになる。また、HTS フィルタを送信用に用いた場合には膜の表面電流密度が増加し、表面抵抗値を要求された値以下に抑えるために冷却温度をさらに低くする必要が生じてくる。ここでは詳しい説明は割愛するが受信用では 77 K から 70 K、送信用ではおおよそ 60 K の冷却温度が必要となると考えられる。

(2) 冷凍負荷

システムにより必要とされる HTS フィルタの数はかなりばらつくが、ここでは一つの冷凍機に搭載される数を最大 6 個と考えることにする。また送信ではフィルタからの発熱、受信ではフィルタではなく LNA からの発熱が主な冷凍負荷になる。そこで送信用 HTS フィルタの出力を 1 個あたり 10 W として挿入損失を 0.4 dB 程度に見積もり、LNA の損失を 1 個あたり 1 W 程度に見積もると、送受信ともに最大冷凍負荷は 6 W 程度となる。

(3) 信頼性

現在使われている空洞共振器フィルタや誘電体フィルタはその構造から考えて明らかに MTBF 10 年以上であると思われる。また、HTS フィルタシステムは損失低減のため高所に設置されたアンテナ直下に置かれる可能性が高く冷凍機も同じ場所に置かれるとする

とそのメンテナンス頻度はなるべく低いことが望まれることになる。以上のことから冷凍機に要求される信頼性は最低でも MTBF 5 年は必要と思われる。また、冷凍機高温部の冷却方法についてはなるべく自然空冷法が望ましい。それは市販のファンでは MTBF 5 年以上を保証するのがなかなか難しいからである。

(4) 振動レベル

冷凍機の振動が高周波の入出力信号に本質的に影響を与えることはない、コールドヘッドの振動レベルを厳しく規定する必要はない。しかしながら、HTS 薄膜と常伝導金属との接続部やフィルタに信号を入出力するためのケーブルの接続不良等の問題を生じさせないためにはある程度最高振動レベルを定めておく必要がある。

(5) 温度制御性

HTS 膜には冷却温度により抵抗だけでなく表面リアクタンスも変化する。そこでフィルタは基本的には LC 共振器であるため冷却温度の変化に従って中心周波数がシフトすることになる。どのような帯域、比帯域で用いるかによるがおよそ $\pm 0.5 \text{ K} \sim \pm 1 \text{ K}$ の温度制御性が必要と思われる。

(6) クールダウン時間、インプットパワー

これらのパラメータが重要な意味をもつのは、Fig. 13⁷⁾ に示すようなポータブル型基地局への搭載を考えた場合である。この基地局は現在は災害が起こった時などに利用されているが今後衛星を利用した通信が盛んに行われるようになるとこのような基地局は平常時にでも各地で利用される可能性が増してくる。その場合アンテナなどをセットしている時間程度でクールダウンが行われる必要が生じてくる。またバッテリーで駆動されるとなると通信時間は冷凍機のインプットパワーに依存してくる。現状のバッテリーを用いるならば 30 W 程度以下のインプットパワーが求められるであ

Fig. 13 Portable INMARSAT base station.⁷⁾

ろう。

(7) 体積、重量

基地局設置を考えると、圧縮機部分をどこに置くかがこれらのパラメータを考える場合重要なポイントとなる。圧縮機がコールドヘッドと共にアンテナ直下に置かれる場合は冷凍機の大きさと重さは一人で据えつけ可能なものが要求されると思われる。今後基地局の数が急増しかつ圧縮機を置くスペースを確保しにくい状況になると冷凍機の小型軽量化は俄然重要な要求仕様となる。当然のことながらポータブル型基地局への搭載を考えた場合も重要なパラメータとなる。

(8) 設置環境

屋外設置、自然空調が基本となると思われるため外気温 $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $0 \sim 100\%$ の環境に置かれた状態で要求仕様を満足することが必要と思われる。

(9) コスト

基地局全体にかけられるコストは年々減少していくと思われる。そこで冷凍機に要求される値はかなり厳しいものになる。しかし、現時点ではいくら以下であるべきか述べるにいくためここでは米国の NRL (Naval Research Laboratory) と DARPA が最近目標として定めたものを参考として挙げておく⁸⁾。これによると 1 年に 10,000 ユニットの需要があった場合 1 ユニットあたり \$1,000、また高価なシステムの場合システム全体の 10% 以下というものである。電気的な制御装置を含むものであるからかなり高い目標値であると思われる。

5.2 小型冷凍機の周辺機器に求められる特性

重要な小型冷凍機の周辺機器としてここでは、バキュームデュワーと HTS フィルタに信号を入出力するためのインターフェースケーブルについて簡単に説明する。

バキュームデュワーはフィルタを真空断熱するために重要な機器であるが、真空を保つためメカニカルな真空ポンプを持ったシステムではシステムの持つ付加価値が大幅に低下する。要求としては 5 年以上の信頼性確保があげられるが、技術的にはバキュームデュワー材料の選定と小型のゲッターポンプを内蔵するだけで真空が保てるかが焦点となる。組み付け後の高温度でのベーキングが難しいことや、LNA 等からのガス放出について不明点が多いことが問題となる。

インターフェースケーブルについては比較的大型なシステムにおいては、従来通りの同軸ケーブルを用いれば十分であるが、電気的挿入損失を極力抑えようと

Fig. 14 Thin outer conductor coaxial cable.

すると、インターフェースケーブルからは1本あたり1.5 W 程度の熱が侵入する。フィルタとLNAをそれぞれ1個ずつ使うような小さなシステムでは、冷凍機のインプットパワー、大きさ、重量が問題にされることが多いため電氣的挿入損失が極力小さくかつ熱侵入も小さいインターフェースケーブルが必要となる。Fig. 12に示したシステムでは我々が開発した2.5 GHzにおいてケーブル長100 mmにおいて電氣的挿入損失0.15 dB 熱侵入0.15 W 程度のインターフェースケーブルを用いている。Fig. 14に外観を示すが従来のセミリジッド同軸ケーブルの外導体部分を厚さ数 μm 程度の銅メッキで置き換えた構造となっている。

5.3 米国における移動体通信用冷凍機の例

前述したSTI, Conductus, SCT, ISCの各社について以下簡単に各社の冷凍機について説明を加える。

(1) STI

STIでは冷凍機にフリーピストン型小型スターリング冷凍機を用いて一つのケース内に圧縮機も含めて収納している。Fig. 15⁵⁾に冷凍機を含むシステムの全体を示す。効率が高く小型で静かであり高信頼性が望めるということが小型スターリング冷凍機を選定理由となっている。バキュームデュワーと冷凍機の断面図をFig. 16⁹⁾に載せる。高信頼性を確保するため第1に摺動部の潤滑にガスベアリングを用いている。高圧ガス源として冷凍機の圧縮機からのヘリウムガスを利用し

Fig. 15 HTS filter assembly (STI).⁵⁾

Fig. 16 Cross section of a dewar/cooler assembly (STI).⁹⁾

Fig. 17 HTS filter assembly (Conductus).¹⁰⁾

ている。第2にリニアモータコイルの絶縁用樹脂からのガス汚染を防ぐために、リニアモータのコイルを圧縮されたガスから引き離すレイアウトをとっている。

(2) Conductus

ConductusではCTIの小型GM冷凍機を採用し、圧縮機も含めて一つのケース内に収納している。ラックの大きさは $8.75'' \times 19'' \times 17''$ 、重さ56ポンド、インプットパワー350 W以下である。Fig. 17¹⁰⁾にラック内にマウントされたプロトタイプシステムを示す。

Fig. 18 HTS receiver system (SCT).¹¹⁾ Fig. 19 Cryoelectronic RF module (SCT).¹⁹⁾

GM 冷凍機の採用の理由は、この冷凍機が多くの半導体製造装置に真空ポンプとして用いられ高くその信頼性を評価されているからである。

(3) SCT

SCT では前 2 社とは異なり、圧縮機をシステムの外に置く GM 冷凍機を採用している。GM 冷凍機採用の理由は Conductus と同様で、高い信頼性にある。Fig. 18¹¹⁾に圧縮機を別置きにするシステム全体図および Fig. 19¹⁹⁾にコールドヘッドとフィルタを含む円筒状ケースの外観を示す。円筒状ケースの大きさは直径 10" 長さ 20" であり、重さは 30 ポンドである。圧縮機の大きさは 20"×17"×16"、入力パワー 680 W である。圧縮機とコールドヘッドが 100 m 離れていても使用することが可能であるとしている。

(4) ISC

ISC も Fig. 20¹²⁾に示すように圧縮機をシステムの

Fig. 20 HTS filter assembly (ISC).¹²⁾

外に置くタイプである。冷凍機は APD (APD Cryogenics, Inc.) のスロットルサイクル冷凍機を採用している。圧縮機の大きさは 16"×14"×12" 重さは 60 ポンド以下で入力パワー 800 W 以下である。環境汚染につながらない混合ガスを使い、安価で信頼性の高い冷凍機であるということを採用の理由にしている。

6. おわりに

以上、移動体通信に HTS フィルタを適用するシステムおよびこれに使用される小型冷凍機について概説した。解説としては多少一般性を欠く所があると思われるが、日タイインターネット上の情報も変化している分野でもあり、筆者らの情報収集不足ということでご容赦いただきたい。

ともあれ、今世紀末から来世紀に向けマルチメディア時代を迎えることはほぼ確実と思われる。そこで、現在多くの研究開発が実用化を目指して行われているが、移動体通信用に HTS フィルタを用いるシステムは米国では実用化が近いといわれている。HTS デバイス、小型冷凍機が民生用として流布する大きなチャンスであると考えている。このシステムが実用化され HTS デバイスを冷却する小型冷凍機の信頼性が実証されていけばこれまで以上にこれらに対する期待が増し、より具体的な要求が新たに出され、それに伴う研究開発も進み尚一層のレベルアップにつながっていくものと思われる。

参考文献

- 1) 鈴木克己: 応用物理 64 (1995) 335
- 2) D. Zhang, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 5 (1995) 2656
- 3) R. Semerad, et al.: 1996 ASC Pro. (1996) 258

- 4) G. C. Liang, et al.: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **43** (1995) 3020
- 5) J. M. Madden: The magic of superconducting filters, Cellular Business, Sept. (1995)
- 6) A receiver front end for wireless base stations, Microwave J. April (1996) 137
- 7) KDD INMARSAT 技術資料 (1994)
- 8) M. Nisenoff, et al.: ...And What about Cryogenic Refrigeration? 9th ICC (1996)
- 9) K. F. Raihn, et al.: IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **44** (1996) 1379
- 10) Conductus 技術資料 (1996)
- 11) SCT 技術資料, REACH™ Receiver Front End Performance & Configuration (1996)
- 12) ISC 技術資料, Spectrum Master™ Ultra-High Performance Preselector Filters (1996)