「冷 却 シ ス テ ム」

米 満 博 夫

東芝総合研究所 神奈川県川崎市幸区小向東芝町 1

(1972年 6 月 15 日 受理)

Cooling System

by Hiroo YONEMITSU

Toshiba Research and Development Center Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd.

1 Komukai Toshiba-cho, Saiwai-ku Kawasaki-shi

(Received June 15, 1972)

Synopsis :

In the rapidly growing superconducting engineering including superconducting levitation magnets for superhigh speed trains, cooling problem is one of the most important subject. This also applies to the development of cryogenic transmission cables. However, up to the present time no systematic discussion both from engineering and economic stand-point have been made in this field.

This article describes cooling system problems in connection with the widely located superconducting magnet systems in the field of high energy physics and with the forthcoming cryogenic cable systems.

1. ま え が き

最近の超電導工学の発展はまことにめざましいものがある。なかでも超高速列車磁気浮上に超電導マグネットが採用されたとすると、はたしてその冷却方式をどうするかが問題になってきている。

さらに極低温送電ケーブルについても、ケーブルそのものの研究開発より、その冷却システムの検討の方が先行すべきであるが、残念ながら系統的に、十分なハードウェアをふまえての技術的、経済的評価がこれまでにあまりなされていない。

そこで今回のシンポジウムの 1 題目として冷却システムがとりあげられた。

このような問題は本来ならばシステム工学の大家が人と時間と費用をふんだんにつかって、いわゆるシンクタンク（頭脳集団）の好個の調査材料であると思われるが、ここでは高エネルギー物理分野で広域に分布している超電導マグネット系と、長尺冷却としての極

低温送電ケーブルの場合を例にとりて冷却システムを論じてみよう。

2. 広域に分布している超電導マグネット系の冷却システム

超電導マグネットが広域にわたって分布している場合の冷却システムの一例として、NAL (National Accelerator Laboratory) の 200 BeV 加速器* の Target station に配列された Focusing magnet や Bending magnet に対する冷却システムの提案¹⁾があげられる。

これは 200m 幅、1,600m 長さの広域に Focusing や Bending の作用をする 252 個の超電導マグネットが配列されていて、このマグネットは長さ約

* NAL の加速器の水素泡箱は現在建設中であるが、Focusing magnet や Bending magnet の冷却システムについては目下計画中といわれている。

1. 75m, Dipole 磁場が 35~40 kG である。マグネットを収めるクライオスタットは、常温磁場空間が直径 10~20 cm, 外径が 80 cm, 長さ 2 m である。マグネットの蓄積エネルギーは $3 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$ ジュールで、4.2°K に冷却すべき被冷却体の重量は 250~500 kg, 常温から 4.2°K まで Cool-down するに要する熱量は 4×10^7 ジュールである。電流リードはガス冷却で熱流入を減少させる構造になっていて、断熱は多層断熱を用いている。

冷却システムを考える場合、先づ第 1 に 1 個のクライオスタットへの熱流入の試算が必要になる。この場合には大ざっぱにいて

$$\text{熱流入は} \begin{cases} (1) \text{ 支持体より} \dots\dots\dots 1 \text{ W} \\ (2) \text{ 多層断熱より} \dots\dots\dots 2 \sim 3 \text{ W} \\ (3) \text{ ガス冷却電流リードより} \dots\dots 1 \sim 2 \text{ W} \end{cases}$$

(現在技術で製作しうるク
ライオスタットとして)

合計 4~6W
平均 (5W)

となる。

次に 200 BeV の Target station の超電導マグネットに対する 4.2°K でのいくつかの可能な冷却システムについて考察してみる。

Table 1 は技術的に可能な 5 方式についての概要を示したもので、それぞれの特徴としては、

(Case 1)……1 台の大型 He 液化機を設置、可搬式 LHe デュワーで 252 個のクライオに LHe を分配供給する。蒸発ガスは常温戻り配管で圧縮機の吸引側に戻す。

(Case 2)……少数の集中 He 冷凍機を設置、供給と戻りの配管には極低温の断熱配管を用いて冷却ガスを循環さす。

(Case 3~Case 5)……多数の小型 He 冷凍機と、少数の大型圧縮機ステーションの組合わせで、冷凍機と圧縮機間の供給と戻りのガスの配管は常温で行なう。

2.1 Case 1 (Fig. 1)

この場合クライオの 4.2°K での負荷をさきの熱流入の 5W であるとする、移送時の LHe の損失を考慮に入れて、8l/hr の LHe の補給があればよい。クライオは 252 個であるから、1 台の大型 He 液化機としては 2,200l/hr の液化率のものが要になる。現在、アメリカの Texas の He プラントに建設されようとしている最大の He 液化機が 1,500l/hr といわれていることから、現在技術で 2,200l/hr のものは技術的には可能である。

Table 1 A comparison of various 4.2°K refrigeration systems for the 200-BeV experimental areas.

Case	System description	Location of refrigerator	Refrigerator or liquefier size	Number of refrigerators	Number of compressor stations
1	Central liquefier, portable Dewar, liquid distribution and warm gas return	A location accessible to all three target areas	2,200 liters/hr	1	1
2	Central refrigerators with cold gas supply and return	Four locations near the three target areas	800W, 1,800W, 2,100W and 2,300W	4	4
3 a	One refrigerator per magnet Dewar, central compressor station, warm gas supply and return	On top of the magnet Dewar inside shielding	10W	252	4
3 b		Near the magnet outside the shielding	10W	252	4
4 a	Two magnet Dewars per refrigerator when possible, central compressor station, warm gas supply and return	Near the magnet pair inside the shielding	20W	140	4
4 b		Near the magnet pair outside the shielding	20W	140	4
5	Mixed 80-W and 20-W refrigerators, central compressor station, warm gas supply and return	Near the magnets outside the shielding	20W and 80W	7-80W 115-20W	4

各クライオの貯液量は 24hr 毎に補給すると、200l 必要となる。可搬式 LHe デュワーは補給量と運搬の容易さを考慮すると、2,000l デュワーが適当であり、1 クライオの LHe 補給時間を 1 hr とすると、10 台のデュワーで、10人の作業員がシフト勤務体制を組めばよい。その他に大型 He 液化プラントの作業員としては 5 人のシフト勤務が必要となる。

Case 1 の長所は、(1) 液化機が化学工業プラントのスケールであるから信頼度効率が低い (例えばアメリカ Kansas の Otis. He プラントは建設以降ずっと He の液化を続けている)。(2) 2,000l のデュワーは、使い易く、標準品で廉価で長寿命である。(3) クライオの故障時には、予備と容易におきかえが可能である。一方短所としては、(1) 1 台の液化機だと故障したら、大きい回収タンクがないと He ガスを空中に逃がしてしまうことになる。(2) 2,000l デュワーでの LHe の分配供給に広い通路面積が必要、(3) 後述するように LHe の分配供給の労務費が高つく。

Table 2 は、Case 1 の冷却システムの経費の内訳である。

2.2 Case 2 (Fig. 2)

冷却負荷は Case 1 と同じく 5W とする。この場合は循環式 He 冷凍機で、クライオ内には J-T 弁をとりつけ、供給された高圧冷却ガスをここで液化する。冷凍機とクライオの供給と戻り配管は極低温断熱配置

Table 2 Case 1

Central liquefier with transport of liquid once Daily
(costs in thousands of dollars)

One central liquefier 2,200 liters/hour, including purifier system, dewar and gas storage	\$2,200
Portable 2,000-liter dewars (20)	400
Return piping	130
Transfer lines to magnets (252)	250
Total Capital Cost	\$ 2,980
Power for 10 years (6,600 kW)	\$4,630
Helium make-up for 10 years	390
Labor for 10 years (15 men/shift)	8,385
Total operating cost for 10 years	\$13,405
Total System Cost	\$16,385

Fig. 1 Case 1-Central liquefier with transport of liquid in portable dewars.

Fig. 2 Case 2-Four central refrigerators with continuous transfer of cold Gas.

を使っている。この配管長は片側が4,400mで両側で8,800m、標準の断熱配管の熱損失は現在技術で約0.5 W/mと推定されるので、4,400Wの冷却容量が必要で、全体の冷却容量は $4,400 + 5 \times 252 = 5,650\text{W}$ (at 4.2°K) になる。電流リードの冷却ガスは常温の戻り配管で圧縮機の吸引側に導かれる。各クライオの貯液量は前の場合と同じと仮定する。この方式だと6人の作業員でシフトを組めばよい。

Case 2の長所は(1) 大きい冷凍機は液化機や小さい冷凍機より効率が高く、運転動力コストが安くつく。(2) 作業員の労務費が安くつく。(3) デューワーの運搬をしないので通路面積を要しない。一方短所としては、(1) 長尺の極低温断熱配管の技術は未解決である。(2) 加速器からのビームの位置変更の場合、長尺極低温断熱配管はフレキシブルでないので位置の変更が困難である。(3) 冷凍機が故障すると、バックアップのために常に多量のLHeを外部より購入準備の必要が生じる。また大きい回収装置がないとHeガスを空气中に逃がしてしまうことになる。

Table 3はCase 2の冷却システムの経費の内訳である。

2.3 Case 3 (Fig. 3)

冷却負荷はCase 1と同じく5 Wとする。この場

Table 3 Case No. 2

Central refrigerator with continuous cold-Gas supply and return
(costs in thousands of dollars)

Refrigerator Area A—800 watts	\$ 430
Refrigerator Area B—1,800 watts	695
Refrigerator Area C1—2,100 watts	755
Refrigerator Area C2—2,300 watts	775
Liquid-helium storage	90
Cold transfer lines—supply and return (8,800m)	1,450
Warm return line	130
Refrigeration lines to magnets with JT valves (252)	505
Liquid storage—portable dewars (6)	120
Liquid lines for magnets (252)	250
Total Capital Cost	\$ 5,200
Power for 10 years (4,200 kw)	2,950
Helium makeup 10 years	280
Labor for 10 years (6 men/shift)	3,360
Total operating cost for 10 years	\$ 6,590
Total System Cost	\$11,790

合は各クライオに1個ずつ小型He冷凍機を備え付ける方式で、マグネットを室温から予冷し、貯液し、蒸発Heガスを再液化するには、4.2°Kで10Wの冷凍容量の冷凍機が必要となる。蒸発Heガスの1部は電流リードをガス冷却し、常温の戻り配管で圧縮機の吸引側に導かれる。

各クライオの貯液量は系の部品の交換時間(約6hr以内)を考慮して70l(8hr持続)あればよい。この方式だと4人の作業員でシフトを組んで、He冷凍機の保守と、事故対策にかかればよい。

Case 3の長所は(1) 系の配管はフレキシブルで作ることができ、常温パイプラインは移動可能で、信頼性が高い。(2) 同型の小型冷凍機を多量に作るため、大量生産が可能で廉価としうる。(3) 作業員の労務費がさらに安くつく。一方短所としては、(1) 小型冷凍機が252個もつくので、システム全体の信頼性はおちる。…(対策、規則正しい保守点検をすればよくなる。)(2) 冷凍効率はサイズが小さいほど悪くなる。つまり

Fig. 3 Case 3b—individual refrigerator for each magnet. The refrigerator is located outside of the shielding

同一冷凍容量を得るのに小さい冷凍機を使うほど入力電力が沢山いる。

Table 4 は Case 3 の冷却システムの内訳である。

Table 5 は Case 1 より Case 5 までの経費の比較をしたものである。これを見ると、経費面からは Case 3~4 が全体経費で 29~26 億円で最も廉価につく。冷却システムにどの方式を採用するかは単に経費が一番安くつくばかりでなく、技術的な問題点としての、冷凍機、液化機の機種、付属機器類、これらの設置条件、技術的信頼性、保守点検の容易さ、機器の安全性、冷凍効率の高低、機器から発生する振動、騒音などを充分考慮した上で判断を下す必要がある。

3. 極低温送電ケーブルの冷却システム

極低温送電ケーブルの冷却問題はシステムとしてとりあげて論じるのに最適のものである。しかし、これまで冷却システムからみた報告はあまり沢山ない。

Table 4 Case 3

Small refrigerator for each magnet—
inside beam shielding
(costs in thousands of dollars)

Central compressor station	\$1,230
Refrigerators (252)	3,780
Liquid-transfer lines (252)	250
Portable dewars (8)	80
Hoses and connections	60
Total capital equipment cost	\$5,400
Power for 10 years (2,520 kw)	\$1,770
Helium makeup for 10 years	80
Labor for 10 years (4 men/shift)	2,240
Total operating costs for 10 years	\$4,090
Total System Cost	\$9,490

Table 5

Refrigeration system cost summary
(costs in thousands of dollars)

	Capital Cost	10-Year Operating Cost	Total System Cost
Case 1	2,980	13,405	16,385
Case 2	5,200	6,590	11,790
Case 3a	5,400	4,090	9,490
Case 3b	5,575	4,090	9,665
Case 4a	5,015	3,890	8,905
Case 4b	4,835	3,890	8,725
Case 5	5,125	3,885	9,010

ここでは K. J. R. Wilkinson²⁾ の取扱いについて紹介してみよう。

Wilkinson の提案は Fig. 4 に示したような半円環断面* の冷却ダクトをもつ超電導送電ケーブルで、LHe, LH₂, LN₂ の 3 冷媒液体を使用する Case 1 と、LHe, LN₂ の 2 冷媒液体を使用する Case 2 の場合について技術的ならびに経済的評価を行なっている。

Fig. 4 Superconducting thin-walled niobium core cooled internally by liquid He and protected externally by liquid H₂ and liquid N₂

Table 6 は Case 1 の経済的評価を行なった例で、Table 7 は運転コストを支配する動力費の試算である。コスト計算に必要な式は

$$hr = 1.44 \times 10^{-8} dT^4 \quad (1)$$

$$C = Co (H/Ho)^n \quad (2)$$

$$H = ml' (h_t + h_r) \quad (3)$$

$$h_t = h_o + h_r \quad (4)$$

$$H = \mu \sigma \theta v / 2 \quad (5)$$

$$h_r = fuv^3 \quad (6)$$

ここで

Ho : 冷凍機の冷凍容量, W

Co : Ho の冷凍容量の冷凍機の価格, £

H : ケーブル全体の冷凍すべき熱損失, W

l' : 冷凍機間のケーブルの長さ, km

h_o : ケーブル導体の電気損失, W/km

h_r : 輻射熱流, W/km

h_t : 流体の摩擦損失, W/km

の 6 つの関係式である。

* 行きと戻りの冷却パイプを形成している。

Optimization の条件としては、1 km のケーブル当りの冷凍機のコストを最少にすることで、上記の 6 式から、 v_m , l'_m , $\bar{C}_m$ が

$$v_m = (h_t/uf) \{ (1-n)/(2+n) \}^{1/3}$$

$$l'_m = (2+n)^{2/3} (1-n)^{1/3} u^{2/3} \sigma \theta / 6 h_t^{2/3} f^{1/3}$$

$$\bar{C}_m = \frac{3C_0}{H_0^n} \left(\frac{h_t}{2+n} \right)^{\frac{2+n}{3}} \left(\frac{f}{1-n} \right)^{\frac{1-n}{3}} \left(\frac{2}{mu^{2/3} \sigma \theta} \right)^{1-n}$$

で計算される。ここに v_m : Optimum fluid velocity, cm/s. l'_m : l' の optimum 値, $\bar{C}_m$: Optimize された 1 km のケーブル当りの冷凍機のコスト, £/km である。

Table 8, Table 9 は同様の試算を Case 2 について行なった場合の結果である。

Table 6 Optimum costs per km and refrigerator-unit spacing calculated for a Nb cable conductor that is cooled with stages of He, H₂, and N₂

Parameter		Units	He	H ₂	N ₂
u	section of a refrigerant channel	cm ²	2.5	3	3.5
f	factor defining fluid loss		1.9×10^{-4}	1.35×10^{-4}	1.0×10^{-3}
d	outer diameter of a cylinder	cm	10.4	11.6	12.2
T	temperature of a radiating surface	°K	20	77	300
σ	specific heat	J/cm ³ °C	0.355	0.424	1.76
θ	allowable excursion in refrigerant temp.	°C	2	3	8
C ₀		£ × 10 ³	50	300	16
H ₀		W	100	60,000	10,000
n			0.4	0.4	0.76
h _t		W/km	0.024	5.85	1,490
v_m	optimum fluid velocity	cm/s	2.32	14.4	33.2
l'_m	optimum value for l'_n	km	69.7	4.00	0.540
$\bar{C}_m$	cost of refrigerating plant per km of cable when optimized	£/km	53.0	1,200	3,060
Total					4,313 £/km

Table 7 Minimum plant and drive-power costs

Core metal	Refrigerant	Losses					Pump drive power		Costs		
		l'_m	h_r	h_e	$h_r + h_e \equiv h_t$	$h_t + h_r$	factor (future)	no load	no load at £220/kw	C_m	Total cost
Nb	He	km 69.7	W/km 0.024	—	W/km 0.024	W/km 0.030	300	kW/km 0.009	£/km 2	£/km 53	£/km 55
	H ₂	4.0	5.85	—	5.85	7.31	39	0.285	62	1,200	1,262
	N ₂	0.540	1,490	—	1,490	1,630	7.4	12.00	2,640	3,060	5,700
Total											7,017

Wilkinson の評価には冷凍機の個品としての価格がコストの主要な部分を占めているといった前提のもとに、その設置費等は除外しているし、またケーブルの材料費、建設費、冷媒液体の費用等も無視しているので不満足な点は多いが、冷却システムを考える上での第一歩を印したのとして評価に値する。

4. む す び

冷却システムについて 2 つの例について述べてきた。今後超電導応用機器がスケールアップするにつれて、その冷却システムを充分検討してから、おのおのの個品についての研究開発を進めて行かないと、全体システムとして実現不可能の事態におちいる危険が多々あることに充分注意する必要がある。

Table 8 Optimum costs per km and refrigerator-unit spacing calculated for a Nb cable conductor that is cooled with stages of He and N₂

Parameter		Units	He	N ₂
u	section of a refrigerant channel	cm ²	2.5	3
f	factor defining fluid loss		1.10×10^{-4}	1.10×10^{-3}
d	outer diameter of a cylinder	cm	10.4	11.6
T	temperature of a radiating surface	°K	77	300
h _t		W/km	5.23	1,350
v _m	optimum fluid velocity	cm/s	16.8	33.0
l' _m	optimum value for l'	km	2.34	0.524
C _m	cost of refrigerating plant per km of cable when optimized	£/km	3,470	2,900
Total				6,370 £/km

Table 9 Minimum plant and drive-power costs

Core metal	Refrigerant	Losses					Pump drive power		Costs		
		l' _m	h _r	h _e	$h_r + h_e \equiv h_t$	h _t + h _f	factor (future)	no load	no load at £220/kw	C _m	Total cost
Nb	He	km 2.34	W/km 5.23	—	W/km 5.23	W/km 6.54	300	kw/km 1.97	£/km 433	£/km 3,470	£/hm 3,903
	N ₂	0.524	1,355	—	1,355	1,470	7.4	10.9	2,400	2,940	5,300
Total											9,230

参 考 文 献

- 1) M. A. Green, G. P. Coombs and J. L. Perry, [Refrigeration for Superconducting Magnets in the 200 BeV Accelerator Weston Illinois] June 1, (1968)
M. A. Green, G. P. Coombs and J. L. Perry, [An Examination of a Liquid Helium Refr-

- 2) K. J. R. Wilkinson; Proc. I. E. E. **113** (1966), 1509. [Prospect of Employing Conductors at Low Temperature in Powes Cables and in Power Transformers]