低 温 と 真 空

中 川 洋

日本酸素株式会社開発本部 東京都港区西新橋 1-16-7

(1975年12月8日受理)

Topics, Concerning Both Cryogenic and Vacuum Engineerings

Hiroshi NAKAGAWA

R & D, Nippon Sanso K.K.

1-16-7 Nishi-Shimbashi, Minato-ku, Tokyo.

(Received Dec. 8, 1975)

1. はじめに

1971年の当協会サマースクールで「低温と真空」という題目で、低温技術と真空技術とがからみあった分野のトピックスのいくつかを御紹介した。この時点から4カ年が経過したが、この間には、理論的というか学術的な面での特に目立った進歩や発展はあまり見あたらないようであるが、応用面というか工業化の面からは大きな進展があったといえる。また今後大きなナショナルプロジェクトには必ずといってよい程低温技術と真空技術が共に基礎的技術として必要となることが予想されるので、今後増々両技術のからみ合った分野での研究、実用化がさらに進展するのは確実である。

これらの大きなプロジェクトはそれぞれ色々の難かしい本質的な問題を抱えているが、その一環として、低温を利用した大容量の排気と、真空を利用して低温を効率良く発生、維持する問題とが必須の基礎的技術となっている。具体的にいうと Cryopumping の技術と真空断熱の技術ということになるが、恐らく今後もこれらに関連した学問と技術の発展、実用化が強く要望されて行くであろう。

低温技術のここ数年間のトピックスについては読者の方々の方が御専門であろうから触れないが、真空技術の面では依然として次の3つが研究の主流をなしているように思われる。

1. 10^{-15} Torr のような極高真空 (EHV) の生成と測定
2. 加速器、核融合などに関連した大容量、高真空

排気系の研究と実用化, Space Chamber, ロケット噴射など大量ガスの排気

3. 固体表面の諸現象, ガス, 電子, イオンなどによる影響, スパッタリング, 膜の生成, 特に超電導膜, 半導体膜などの研究

これらの諸研究は、真空技術だけを基礎としているように見えるが、実は必ずといってよい程低温技術が随所で使われているといえる。従って低温技術と真空技術のからみ合いは表1に示したように、数多くの問題点として浮び上って来る。これらの問題点はその一つ一つを追って行ってもそれぞれ極めて興味あるテーマではあるが、紙幅の関係と最近の両技術の関連を論じた総説¹⁾のやり方に従って、真空断熱と Cryopumping に主眼をおき、その関連として細かい問題をとり上げて見たい。

2. 真空断熱

いわゆる Superinsulation が極めて熱伝導の低い、断熱効果の高い断熱方法として注目を集めたのは10年以上前のことで、当時はこれで万能のような考え方が強かった。しかしその後研究が進むと同時に、実際に極低温装置, Cryostat, 魔法壺, 貯槽などに使用して見るとなかなか理論通りには行かず、色々の困難な点があることが分って来た²⁾。

それらの問題点とは

1. 注意深く製作しないと、期待したような断熱性能が得られないこと
2. 表皮効果, anisotropic な熱伝導を考える必要

表 1 低温技術と真空技術との関連問題点

主 要 テ ー マ	具 体 的 テ ー マ	個 別 的 テ ー マ
真 空 断 熱 ク ラ イ オ ポ ン プ	高真空, 極低温における熱移動 超電導関連機器の断熱 大型液化器, 超小型冷凍機 大型貯槽, He・H ₂ 貯槽, 輸送 低温を利用した大量排気系 Space Simulator ロケット排気の捕集 液化ガス減圧による温度降下 超高真空の局部的実現 極低温における漏洩現象, シール	低温における圧力 (真空) の測定 ガスによる圧力 (真空) の感度の差 Thermal Transpiration 低温, 高真空における蒸気圧, 液化, 固化 Accommodation Coefficient Sticking Coefficient Capture Coefficient 低温, 高真空における物質移動, 吸着 Cold Trap Cold Leakage

があること (通常考える熱伝導方向と直角の向の熱伝導)

3. 実際に応用するとき, 例えば断熱層を貫通する配管, 支持物などによって, 断熱層を切断, 貫通せねばならないこと, (理想通り, 多くの層で, 低温部を切れ目なく, グルグル巻くということが出来難いこと)
4. 圧縮力に対してほとんど抵抗力がなく, また圧縮された状態では熱伝導が非常に大きくなること。
5. 以上の問題点をうまく逃れるためには, この方法を実際に使うとき, 非常に手間をかけ, またコツのようなノウ, ハウを必要とする。従って, 一般に金のかかる方法といえる。また, 万一不具合のときの修復も難かしい。

などである。もち論, これらの問題点に対して

1. 今の所, 他のどんな断熱方法よりも断熱性能が格段に (熱伝導率で1桁以上) 良い。
2. 重量が軽く, 断熱層も薄く出来る。従って, この断熱法を施した容器は取扱い, 移動が容易である。
3. 軽いということは, 熱容量が小さく, 予冷に必要な熱量も少ない。

などの極めて優れた面もある。従って, 熱浸入を極度に押えなければならない極低温では依然として真空断熱の主流となっている。そのため, ここ 10 年あまり Superinsulation の原理の解析³⁾⁴⁾, 熱伝達⁵⁾⁶⁾, ふく射の検討⁷⁾⁸⁾, 施行方法⁹⁾¹⁰⁾, 性能の確認¹¹⁾¹²⁾などについて数多くの研究が行われた。

これらの報告によって Superinsulation 断熱法について次のような点が明らかになった。

1. 初期の Superinsulation に用いられていた, アルミ箔とグラスウールの組合せよりも, 最近では薄いプラスチック膜 (マイラーなど) に金属を蒸着したものの方が性能, 価格, 施工面で優れているので, 専らこれが使われている⁴⁾。
2. プラスチック膜の熱伝導はあまり問題はないが, 蒸着金属膜の熱伝導は通常の金属の熱伝導とは全く異って大きな値となる³⁾。特に低温においては寸法的な大きさの影響 (size effect) 表面だけ熱が伝わる (shin effect) を考慮せねばならない⁶⁾⁷⁾¹³⁾。
3. プラスチック面からのふく射率は 0.4 程度, 金属蒸着面からのふく射率はこれより一桁小さい 0.02~0.05 程度で, 金属をプラスチックの両面に蒸着すると, ふく射の面では極めて有利である⁷⁾。
4. 通常の Superinsulation は 30 層から 100 層の断熱層とするが, この温度分布を測定して見ると, 極低温側の数層に大きな温度勾配がついている。従って Superinsulation の性能を決めるのは, 多くの層のうち低温側の 10% くらいの層である¹⁴⁾。
5. 圧力は当初考えられていた 10^{-3} Torr のように, 実現容易な圧力ではなく, なるべく高真空, 少なくとも 10^{-5} Torr 程度がよい。従って, 漏洩の有無, 多層の間を排気する方法に充分気を使う必要がある¹⁵⁾。

などが新しい知聞である。

以上のような点, すなわち Superinsulation は施行方法が難しく, 理論的な値が得られ, 難く高価になる点から, 粉末真空断熱法の効率の見直しが行われた¹⁵⁾。

表 2 Microsphere 断熱法

	Microsphere	Superinsulation
性能の予想実現の率	$\pm 10\%$	$\pm 100\%$
伝熱方向と垂直な向の伝熱の率	1	$10^{-1} \sim 10^{-4}$
密 度 $[\text{kg/m}^3]$	70~80	50~60
実際の熱伝導率 $[10^{-5}\text{W/mK}]$	22~40	5~10
圧縮強さ $[\text{N/m}^2]$	$>3 \times 10^6$	ほとんどなし

そのなかから大きく浮び上って来たのが Microsphere という中空のガラス球を用いた粉末真空断熱法¹⁷⁾である。この方法を Superinsulation と比較すると表 2²⁾のように、熱伝導率が $2 \sim 4 \times 10^{-4} \text{ W/mK}$ と Superinsulation よりも大きい、何とんでも施工が容易で再現性が優れているので、特に工業装置などでは今後広く使われるであろう。

この他、真空断熱方法としては Vacuum Panel 式と称するフレキシブルなジャケットの中に、断熱材と吸着剤を封入して真空に引いた構造の断熱法の研究¹⁸⁾が行われた。このパネルの熱伝導率は $1 \sim 2 \times 10^{-4} \text{ W/mK}$ 程度である。単に低温容器のまわりに貼りつけるだけでよいという施工上の大きなメリットがあり、今後 LNG 装置の保冷など工業用の用途に使用されるであろう。

粉末真空断熱も上と同じ理由で、工業的な用途としては未だ捨てたものではなく、さらに性能向上の研究が行われている¹⁹⁾。これらの断熱剤の性能を表わすのに普通は熱伝導率を以て表わしているが、予冷に必要な熱量などを考えに入れたとすれば、断熱剤の熱容量(比熱 $\times$ 重量)も考えに入れた Thermal Diffusivity $\alpha = \lambda / \rho C_p$ $[\text{m}^2/\text{sec}]$ を比較した方がよい。この考えによる性能の比較を表 3 に示す。これで見ると、古くからの Perlite 粉末も中々良い性能を示している。

表 3 Thermal Diffusivity の比較
 α : Thermal Diffusivity $[10^{-9} \text{ m}^2/\text{sec}]$

低温側温度	Perlite	Microsphere
	$\rho = 104 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 73.7 \text{ kg/m}^3$
4 K	—	11.3
20 K	4.0	8.5
76 K	4.5	7.3
196 K	16.8	17.5
275 K	32.3	29.4
299 K	47.8	42.8

3. Cryopumping

大容量かつ高真空への排気系として Cryopump が注目されてから、これも10年以上の年月が経ったが、ようやく今日になって実際の工業用大型装置への応用が確立されたといえる。しかも Space Chamber のように数 100 m^3 という大きな装置を 10^{-10} Torr という超高真空に排気しようという場合、通常の真空ポンプでは膨大な数が必要となり、また超高真空と実現するための分子ポンプ、Ionpump、Getterpump などは数が多く必要であるという難点の他に、取扱が非常に複雑となることを考えると、Cryopumping が唯一の解決策であると言ってもよいようである。この面での研究応用は米国で盛んであったが、宇宙開発の全般的低調に伴って、現在はむしろ日本、欧州に移行したといえる。その具体例が最近完成した宇宙開発事業団の Space Chamber^{21)~23)}であり、この面での研究成果が我が国で集大成されて花開いたといえる。

一方、大型加速器の面でも、極めて大きな容積を、水素などのガスを流し込みながら、高真空に排気する必要がある、極低温吸着を利用した Cryosorption pump の利用が考えられている²⁴⁾²⁵⁾。

表 4 Cryopump の特性の一例²⁷⁾

排 気 速 度	Air	3,000 l/sec
	H ₂	7,500 "
	He	4,000 "
	A	2,300 "
	H ₂ O	30,000 "
液体ヘリウム	容 積	6 l
	蒸 発 量	0.17 l/h
	予 冷 量	10~12 l
吸 着 剤 能 力	H ₂	50 l/NTP
	He	10 l/NTP
到 達 圧 力	10^{-12} Torr 以下	

表 5 BA 真空計のガスによる感度²⁵⁾

ガ	ス	相 対 感 度
N ₂		1
He		0.15
Ne		0.25
A		1.4
Kr		1.8
Xe		2.7

これらの応用面の急速な発達と比較して、その理論的裏付けとなる現象の解明は未だ充分とはいえない。

例えば、極低温面に向い合った真空計の示す圧力は、何を表わしているのか²⁶⁾、Cryosorption pump はガスによって表 4 のような特性を示す²⁷⁾が、他の場合はどうなるのか、またガスによって圧力指示がどう変わるであろうか²⁸⁾、表 5 の値は信用してよいか、極低温、高真空中では果してガスはどういう事情で凝縮するのか²⁹⁾などの興味深いテーマが山積している。これらが一つ一つ解明されるのには、まだかなりの時間がかかるであろうか、それによって Cryopumping そのものの発展がより期待されるものになるであろう。

4. おわりに

低温と真空のからみ合った現象、またこれを同時に応用した分野の研究、実用化は最近益々盛んになって来た。

しかし、これらの動きを「低温技術講座」として僅かな紙数にまとめることは不可能に近い。本来から言えば、Thermal Transpiration の現象一つでも、この講座一回分の事柄があるように思われる。

従って、次の機会に、本講で触れたような事項について、それぞれの解説が行われるであろうことを期待して筆を置く。

参 考 文 献

- 1) G. Klipping, Proc. 6th Internl. Vac. Congr. (1974) 81
- 2) C. L. Tien, G. R. Cunningham, Cryogenics 12 No. 6 (1972) 417
- 3) C. L. Tien, B. F. Armaly, P. S. Jagannathan, "Thermal Conductivity" Plenum Press, (1969) 13
- 4) P. E. Claser, et. al "Thermal Insulation Systems" NASA, ST-5027 (1967)
- 5) P. S. Jagannathan, C. L. Tien, Adv. Cryo. Eng. 16 (1971) 138
- 6) C. H. Forsberg, G. A. Domoto, J. Heat Transf. 94 (1972) 1
- 7) C. L. Tien, C. K. Chan, G. R. Cunningham, J. Heat Transf. 94 (1972) 41
- 8) L. S. Wang, C. L. Tien, Internl. J. Heat Mass Transf. 10 (1967) 1327
- 9) G. C. Vliet, R. M. Coston, Adv. Cryo. Eng. 13 (1968) 671
- 10) D. O. Murray, Adv. Cryo. Eng. 13 (1968) 680
- 11) P. J. Perkins, M. A. Colaluca, L. S. Smith, Adv. Cryo. Eng. 9 (1964) 38
- 12) I. Ishaghoff, J. M. Canty Adv. Cryo. Eng. 9 (1964) 46
- 13) B. F. Armaly, C. L. Tien, Proc. 4th Internl. Heat Transfer Conf. 3 (1970) R1-1
- 14) P. J. Murto, Adv. Cryo. Eng. 7 (1962) 291
- 15) M. P. Hnilica Adv. Cryo. Eng. 5 (1960) 199
- 16) A. V. Luikov Internl. J. Heat Mass Transf. 11 (1968) 117
- 17) C. R. Cunningham, Adv. Cryo. Eng. 18 (1973) 403
- 18) W. E. Grunert, F. Nataro, Adv. Cryo. Eng. 13 (1968) 690
- 19) G. R. Cunningham, C. L. Tien, Adv. Cryo. Eng. 18 (1973) 103
- 20) R. P. Reinker, K. D. Timmechaus, R. H. Kropschot Adv. Cryo. Eng. 20 (1975) 343
- 21) 斎藤, 高田, 柴田: 第15回低温工学研究発表会 (1975年11月12~14日)
- 22) 飯出: 真空 18 (1975) 338
- 23) 遠藤, 青木, 田代, 西川, 北山, 坂垣, 久富, 榊原: 第16回真空に関する連合講演会 (1975年11月13, 14日)
- 24) H. J. Halama, J. R. Aggus, J. Vac. Sci. Tech 12 (1975) 532
- 25) C. Benvenuti, J. Vac. Sci. Tech. 11 (1974) 591
- 26) P. Kleber, Vacuum 25 (1975) 191
- 27) R. J. Powers, R. M. Chambers, 8 (1971) 319
- 28) C. Benvenuti, J. C. Decrocx, Le Vide 162 (1972) 243
- 29) T. J. Lee, J. Vac. Sci. Tech 9 (1972) 257