ヘリウム排気用クライオソープションパネルの開発の現状

——核融合炉トーラス真空排気系に用いることを前提として——

中 村 和 幸, 村 上 義 夫

日本原子力研究所核融合研究部 茨城県那珂郡東海村

(1983年1月10日受理)

Present Status of R & D on Cryosorption Panels for Helium Pumping

Kazuyuki NAKAMURA and Yoshio MURAKAMI

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 10, 1983)

Synopsis:

Since tokamak fusion experimental reactors try to sustain 100–200 second D-T burning, helium exhaust from plasma core is one of the major issues of the tokamak reactors. There have been proposed two major concepts about helium exhaust from plasma. They are concepts of magnetic divertor and pumped limiter. In both cases, a very large pumping system is required for the helium and fuel pumping.

The cryosorption pump with 4.2 K panels is considered to be a prime candidate for these applications. When molecular sieves are used as the adsorbent, it has been recognized that the pump may not be able to accommodate helium-hydrogen isotopes mixtures, because condensed deuterium and tritium will block the adsorbent surface and prevent helium pumping. This means that the cryosorption panels (4.2 K) for helium will be surrounded by two chevrons, one at 77 K and the other at 4.2 K. Recently, cryopumping has intensively studied in the TSTA project in the United States. It has been shown that cryosorption by charcoal and cryotrapping by argon condensed layers will appear to work successfully with tokamak reactors.

In the cryopumps, it is necessary to recover the pumped gases as quickly as possible in order to achieve low inventories of tritium. The regeneration cycle will be determined by considering several items which include tritium inventory and safety problems.

1. はじめに

核融合炉では炉心プラズマで D-T 反応の結果、多量のヘリウムが生成される。たとえば、熱出力60万キロワットの炉の場合には毎秒 2.1×10^{20} 個のヘリウム

が生成される。プラズマ中のヘリウムが増加すると、プラズマの放射損失が増大するほか、相対的に燃料密度が低下するので、炉心プラズマから連続的に外部へヘリウムを排出することが必要である。トカマク型核融合炉の場合、炉心プラズマからのヘリウムの排出は、

図1 磁気ダイバータおよびポンプリミタによるヘリウムの排出

磁気ダイバータやポンプリミタと呼ばれる装置により高温のプラズマ粒子を冷却するとともに中性化し、これらに接続した真空排気装置によって行われる。図1(a),(b)にそれぞれ磁気ダイバータとポンプリミタの概念を示す。核融合炉の熱出力が決ると、毎秒プラズマから排出しなければならないヘリウムの量 Q_{He} は一義

的に決るが、真空排気装置を設計する立場からすると、磁気ダイバータやポンプリミタと真空排気装置（排気ダクトを含む）の取合部における所要排気速度 S_{He} が与えられる必要がある。これには、 $S_{He}=Q_{He}/p_{He}$ の関係から、取合部における中性ヘリウムガス圧力 p_{He} がどの程度になるかが問題であるが、現状ではプラズマのスクレイブオフ層と磁気ダイバータまたはポンプリミタ相互の関係がまだ十分に解明されていないので、不確定要素が残っている。以前には $p_{He}=10^{-5}$ Torr程度とする考えが支配的であったが¹⁾、最近ではダブレットⅢの実験結果^{2),3)}などから、 p_{He} は 10^{-3} Torr程度まで高められる可能性がでてきた。

以上はヘリウムに関する議論であるが、磁気ダイバータやポンプリミタには燃料（重水素、トリチウム）とヘリウムを分離したり、ヘリウムを濃縮する効果はほとんど期待できないので、真空排気装置にはヘリウムの数～数十倍の重水素やトリチウムが流入することも考慮しなければならない。また1%以下の炭素や酸素化合物も不純物ガスとして混入すると思われる。トリチウムは半減期12.3年で β 崩壊する放射性物質であるため大気への漏洩をきわめて低い値に抑えなければならない。また、トリチウムの有機物への影響が大きいので、真空排気装置には原則として有機高分子材料は使用できない。真空排気装置におけるトリチウムの滞留量はできるだけ少くすることが望まれる。

核融合炉用真空排気装置として、現在クライオポンプを主体としたもの、水銀拡散ポンプを主体としたものの、ターボ分子ポンプを主体としたものなどが検討さ

図2 気体の蒸気圧曲線⁵⁾

図3 クライオポンプの構成

れている⁴⁾。このうちクライオポンプ方式は、系が清浄であること、大排気速度のものが製作できることなどの利点がある反面、ヘリウム排気については新たな問題も多いので、主に米国を中心に研究開発が進められている。クライオポンプには、低温の金属パネルに気体を凝縮させる方式と、低温の多孔性物質に気体を収着させる方式とがある。ヘリウムの蒸気圧は4.2Kで1気圧であるため(図2参照)、ヘリウムの排気には後者の方式を採用しなければならない。ヘリウムと水素同位体、その他の不純物ガスから成る混合気体の排気に対しては、図3に示すようなクライオパネルから構成されるクライオポンプが検討されている。すな

わち、4.2Kのシェブロンで水素同位体とその他の不純物ガスを排気し、ここを通過したヘリウムを4.2Kの収着面を設けたパネルで排気する。

本稿では、ヘリウム排気用のクライオソープションパネルの開発の現状と問題点について概説する。なお2節は、五明、中村、村上の調査報告⁶⁾を参考にした。

2. クライオソープションパネルの開発の現状

2.1 MS5Aを用いたパネル

モレキュラーシープス MS5A(ユニオンカーバイド社製)を用いたクライオソープションパネルによるヘリウムの排気については、Grenier, Stern らによって比較的是やくから研究が行われている^{7),8)}。1966年に発表された Grenier らの測定結果を表1に示す。ヘリウムガス流量が $1.1\times 10^{-6}\sim 1.5\times 10^{-5}$ Torr・l/s・cm²の範囲で、収着面での付着確率が0.69~0.91という値が得られているが、この値は21~30 l/s・cm²の排気速度に相当する。(ただし、この実験ではソープションパネルの前段にシェブロンが置かれていないため、他の実験と直接比較はできない。)MS5Aの排気特性の温度依存性を表2に示す。MS5Aのヘリウムに対する排気作用は、クライオ面が4.2Kでないと多くを期待できないことがわかる。

Fisher らは Excalibur 社製の CVR 1106 を用いて、ヘリウム排気速度の収着量依存性を調べた⁹⁾。Fisher らの実験で、ヘリウム流量が $2.9\times 10^{-7}\sim 6.6\times 10^{-6}$ Torr・l/s・cm²の場合の結果を図4に示す。彼らの結

表1 MS5A パネルの 4.2K におけるヘリウム排気特性

Helium influx rate, Q		Steady-state helium pressure, p (Torr)	Amount of helium absorbed at end of test [cm ³ (STP)/g]	Pumping speed S ^b (liter/sec)	Sticking coefficient α
(μ liter/min.)	(Torr liter/sec)				
8.1	1.4×10^{-4}	3.7×10^{-8}	0.127 ^a	3.8×10^3	0.91
12	2.0×10^{-4}	5.8×10^{-8}	0.377	3.4×10^3	0.82
17	2.8×10^{-4}	7.5×10^{-8}	0.529	3.7×10^3	0.89
27	4.5×10^{-4}	1.4×10^{-7}	0.789	3.2×10^3	0.77
32	5.3×10^{-4}	1.7×10^{-7}	0.930	3.1×10^3	0.74
45	7.5×10^{-4}	2.5×10^{-7}	1.42	3.0×10^3	0.72
68	1.1×10^{-3}	3.8×10^{-7}	3.05	2.9×10^3	0.70
92	1.5×10^{-3}	5.4×10^{-7}	4.08	2.8×10^3	0.67
123	2.0×10^{-3}	6.0×10^{-7}	6.23	3.3×10^3	0.80

^a Amount of helium adsorbed at start of test: 0.084 cm³ (STP)/g.
^b Geometric area of adsorbent: 2.06 in. ²weight of adsorbent: 11.8 g.

表2 MS5A パネルのヘリウム排気特性の温度依存性

Cryosorption panel temperature (K)	Gas temperature (K)	Maximum pumping speed (liter/sec·ft ²)	Sticking coefficient α
17	77	Barely measurable	—
13.6	77	55	3.7×10^{-2}
10	77	720	4.8×10^{-2}
4.2	4.2	27000	0.9

図4 MS5A パネルのヘリウム排気速度の収着量依存性

図5 高ヘリウム負荷下におけるポンプ室内の周期的な圧力変動 (MS5A, 4.2K)

果によれば、収着量ゼロでは $3.3 \text{ l/s} \cdot \text{cm}^2$ の排気速度を有するが、収着量 $0.15 \text{ Torr} \cdot \text{l/cm}^2$ では排気速度は最初の $\frac{1}{2}$ に低下する。また、図4の範囲では、排気速度低下の状況はヘリウム流量に依存しないことがわかる。Fisher らは、ヘリウムガス流量を $6.6 \times 10^{-6} \text{ Torr} \cdot \text{l/s} \cdot \text{cm}^2$ 以上に増加すると図5に示すような圧力の脈

動が発生することを観察した。この現象は、MS5A 内へのヘリウムの拡散が MS5A 表面への気相からのヘリウムの流入に追従できないためと解釈されている。気相の圧力が上昇して MS5A の温度が上ると、MS5A 内へのヘリウムの拡散が促進され、ポンプは再び排気能力を回復する。

Dillow らは、Excalibur 社製の CVV 2008 ポンプを用いて、水素90%、ヘリウム10%の混合ガスの排気を試みた¹⁰⁾。 $2 \times 10^{-7} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ Torr}$ の圧力領域において、排気速度は $1.4 \sim 5.6 \text{ l/s} \cdot \text{cm}^2$ であったが、再現性はよくなかった。

この他にも MS5A を用いた実験は数件報告されているが^{11), 12)}、各測定結果間の一致は必ずしもよくない。この原因として、MS5A の表面に吸着した不純物の影響、シェブロンの有無によるヘリウムガス温度の違い、MS5A の表面付近の温度の違いなどが考えられる。

このように MS5A の排気特性にはまだ不明な点が多い。核融合炉条件ではヘリウム負荷が大きいので、MS5A をソーブションパネルの収着剤として使用することは問題が多いと考えられる。

2.2 活性炭を用いたパネル

活性炭を用いたソーブションパネルの性能については、古くは Stern らによって調べられた例があるが、最近になって Hseuh らによって精力的に実験が行われるようになった^{13), 14)}。Hseuh らは銅板に活性炭をエポキシ樹脂で接着し、活性炭のヘリウム収着能を4.2~20K の温度範囲で調べている。図6は種々の温度における既収着量と排気速度の関係を示したものである。4.2K での排気速度は、収着量が $7 \text{ Torr} \cdot \text{l/cm}^2$ に達す

図6 活性炭パネルのヘリウム排気速度の収着量依存性

図7 活性炭パネル温度とヘリウム収着量の関係

るまでおよそ $4 \text{ l/s} \cdot \text{cm}^2$ の値を保つ。活性炭の温度を高めると排気速度は次第に低下する。排気速度の低下は特に収着量の多いところで著しい。しかし活性炭は、MS5A の場合とは対照的に、既収着量が増加しても排気速度の低下は比較的緩やかで、たとえば 11.2 K の時収着量 $1 \text{ Torr} \cdot \text{l/cm}^2$ で $3 \text{ l/s} \cdot \text{cm}^2$ の排気速度を有することは注目に値する。図7はヘリウムと水素・ヘリウム混合ガスに対する活性炭の収着量を種々の温度で測定したものである。この時のヘリウム流量は $2.7 \times 10^{-5} \sim 2.7 \times 10^{-3} \text{ Torr} \cdot \text{l/s} \cdot \text{cm}^2$ である。収着量は

MS5A の場合に比してかなり大きい。これは両物質におけるヘリウムの拡散速度の差に起因するものと考えられる。ヘリウム・水素混合ガスについては水素の割合が大きいのでも32%で核融合炉条件からかなり掛離れているが、この範囲では混合ガスも一応排気している。水素とヘリウムの混合比が大幅に異なる場合の特性は表3の通りである。活性炭の温度が 4.2 K でヘリウム収着量が $0.67 \text{ Torr} \cdot \text{l/cm}^2$ の場合には、水素の混合比が79%になってもヘリウムの排気速度は純粋なヘリウムガスの場合と変わらない。ヘリウム収着量が $2.8 \text{ Torr} \cdot \text{l/cm}^2$ になると、水素の割合が88%の混合ガスに対してヘリウム排気速度は75%に低下する。活性炭の温度が 13.5 K の場合には、水素の混入がヘリウムの排気速度に大きな影響を及ぼす。

以上のように、活性炭は混合ガスを排気する場合に若干問題があるが、ヘリウムのみを排気する場合には、MS5A に比して広い範囲の温度とガス流量で使用できる利点がある。

2.3 気体凝縮層を用いたパネル

適当な条件下で低温面に作られた Ar, Xe, CO_2 などの気体の凝縮層は、水素やヘリウムなどの気体を収着する能力を有している。これはそれらの凝縮層が非晶質ないしは微結晶の集合で構成されており、モレキュラーシーブスや活性炭と同様真の表面積が大きい多孔性構造を形成するからである。気体凝縮層を収着剤として使用する実験はいくつか報告されているが^{(15)~(17)}、実用化のためにはまだいくつかの解決しなければなら

表3 活性炭パネルのヘリウム排気速度に及ぼす水素の影響

$T=13.5^\circ\text{K}$		$T=4.2^\circ\text{K}$		$T=4.2^\circ\text{K}$	
$C_{\text{He}}^{(a)}=0.15$	$C_{\text{H}_2}=0.03$	$C_{\text{He}}=0.67$	$C_{\text{H}_2}=0.10$	$C_{\text{He}}=2.8$	$C_{\text{H}_2}=0.47$
$Q_{\text{H}_2}^{(b)}/Q_{\text{He}}$	$S_{\text{He}}^{(c)}$	$Q_{\text{H}_2}^{(b)}/Q_{\text{He}}$	$S_{\text{He}}^{(c)}$	$Q_{\text{H}_2}^{(b)}/Q_{\text{He}}$	$S_{\text{He}}^{(c)}$
.04	.96	.02	1.00	.02	.91
.07	.91	.04	.95	.04	.93
.15	.78	.10	.95	.10	.87
.37	.56	.19	.96	.19	.88
.91	.46	.38	.97	.38	.89
1.83	.39	.76	1.00	.76	.88
3.65	.33	1.90	1.19	1.52	.83
		3.80	1.15	3.80	.83
				7.60	.75

(a) C: Surface coverage expressed in $\text{Torr} \cdot \text{l/cm}^2$.

(b) Q_{H_2} not corrected for hydrogen cryocondensation.

(c) S_{He} relative to pure helium pumping speed at same temperature.

ない問題がある。しかし、気体凝縮層を収着剤として用いる方法には、収着剤の劣化やトリチウムによる汚染の問題を考慮する必要がなく、再生の方法も簡単になる可能性があるため、今後さらに検討する価値がある。

2.4 クライオトラッピングを利用したパネル

クライオトラッピングを利用したヘリウムの排気に関しては、Batzerらが精力的に実験を行っている^{18), 19)}。彼らはガス配管に直径4/1000インチの穴を数センチメートル間隔で設け、ここから排気面に向けてアルゴン吹きつけるようにしている。図8は、4.2Kの面のクライオトラッピングによるヘリウムの排気速度を示したものである。ヘリウムの排気速度はおよそ $3 \text{ l/s} \cdot \text{cm}^2$ で、他の方式の場合と同程度である。この時のヘリウム流量は $1.6 \times 10^{-5} \sim 1.6 \times 10^{-4} \text{ Torr} \cdot \text{l/s} \cdot \text{cm}^2$ 、アルゴンガス流量はヘリウム流量の28~30倍であった。この方式の利点は、気体凝縮層を用いたパネルの場合と同様収着剤の劣化やトリチウムの汚染を考慮しなくてよいことと、水素とヘリウムの排気を同一のパネルで行えるためポンプの構造が簡単になることであろう。しかし、この方式は、パネルの再生の際に多量のアルゴンガスが気化するため後段の燃料処理系のガス負荷が大きくなるという難点を有する。

図8 アルゴンクライオトラッピングにおけるヘリウム排気速度の圧力依存性

2.5 TSTA 用クライオポンプの開発の現状

TSTAは、最近米国のロスアラモス研究所に完成した装置で、実験炉の燃料給排気系を模擬し、トリチウムの取扱技術を確立することを目的としたものである。この装置の真空排気系に用いられるクライオソープションポンプには、候補として①MS5Aを収着剤としたもの、②活性炭を収着剤としたもの、および③アルゴンクライオトラッピングを利用したもののが取上

(A) LASL DESIGN

(B) BNL DESIGN

(C) LLL DESIGN

(D) MODIFIED BY
ADDITION OF VALVE

図9 TSTA用クライオポンプの模式図

げられ、それぞれロスアラモス研究所、ブルックヘブン研究所、ローレンスリバモア研究所が担当してポンプの試作が進められた²⁰⁾。その後これらはロスアラモス研究所に集結され、比較試験が行われている。図9は試験されたクライオポンプの模式図である。予備的な実験結果ではあるが、これらの3種のポンプの排気特性を図10に示す。測定時のヘリウム流量は、MS5A面で $2 \sim 20 \times 10^{-6} \text{ Torr} \cdot \text{l/s} \cdot \text{cm}^2$ 、活性炭面で $4 \times 10^{-4} \text{ Torr} \cdot \text{l/s} \cdot \text{cm}^2$ 、アルゴントラッピングの場合にはおよそ $10^{-4} \text{ Torr} \cdot \text{l/s} \cdot \text{cm}^2$ であった。これらの条件における初期排気速度は、MS5A面でおよそ $1 \text{ l/s} \cdot \text{cm}^2$ 、活性炭面およびアルゴントラッピング面でおよそ $2 \text{ l/s} \cdot \text{cm}^2$ である。また、ヘリウム収着量と排気速度との関係では、活性炭がヘリウムを最も多く収容できることがわかる。TSTAの仕様では、活性炭を収着剤とするもの、アルゴントラッピングを利用するものいずれもが採用できるといわれる。

図10 TSTA用クライオポンプのヘリウム排気速度の収着量依存性

3. クライオポンプ方式の問題点

核融合実験炉の真空排気装置にクライオポンプを採用する場合の問題点は大きく2つに分けられる。その1はポンプの排気性能に関する点であり、他の1つはトリチウムのインベントリに関する問題である。

排気特性については、2節で述べたように、基礎的なデータがかなり蓄積されており、活性炭を用いたパネルやアルゴントラッピングを利用したパネルはこの目的に使用できそうであることが判ってきた。今後これらのパネルにおける他の不純物ガスの影響や熱疲労についても調べる必要があると考えられるが、これらはTSTAの試験が進むにつれて明らかにされると思われる。

トリチウムのインベントリは極力少くする必要がある。特にわが国の実験炉では系全体のトリチウム滞留量を抑制することが重要な課題になると考えられる。クライオポンプは貯込式のポンプであるため排気、再生を交互に行う必要があるが、再生の頻度は収着剤のヘリウム収着量、クライオパネルに凝縮しているトリチウムの崩壊熱、不慮の事故で系内に大気が入りし凝縮層の水素同位体が蒸発した場合の爆発限界、系全体に許容できるトリチウムインベントリなどから検討さ

れなければならない。国際トカマク炉INTORの設計では、使用できるトリチウムの量から再生の周期を4時間（排気2時間、再生2時間）としている²¹⁾。このような短い周期で運転、再生を繰り返すことは、クライオパネルの熱疲労が心配であり、また毎回開閉を余儀なくされる全金属製のゲートバルブの寿命が問題になる。

4. おわりに

以上、核融合実験炉に必要な真空排気系の条件と、これまで主に米国で行われてきたヘリウム排気を目的としたクライオソーブションパネルの開発の状況を概説した。クライオソーブションパネルを組込んだ大型クライオポンプは実験炉の排気系の主ポンプとして有力な候補と考えられているが、わが国ではまだこの方面の実験的研究がきわめて少いのが現状であり、この研究への取組が望まれる。一方、クライオポンプには貯込式ポンプであることによる問題もある。この点に関しては、拡散ポンプやターボ分子ポンプなどのダイナミックポンプに魅力があり、これらについても並行して検討する必要があるだろう。大型ゲートバルブや主ポンプの後段に用いられるトリチウム仕様のポンプの開発も望まれる。

参 考 文 献

- 1) INTOR Report, Zerophase (IAEA, 1980) 507-536
- 2) M. Shimada, et al.: Phys. Rev. Lett. (1981) 796
- 3) D.O. Overskei, Phys. Rev. Lett. (1981) 177
- 4) Y. Murakami, et al.: JAERI-M 8513 (1979)
- 5) R.E. Honig and H.O. Hook, RCA Rev. **21** (1960) 360
- 6) Y. Gomay, et al.: JAERI-M 82-037 (1982)
- 7) G.E. Grenier and S.A. Stern, J. Vac. Sci. Technol. **3** (1966) 334
- 8) S.A. Stern, et al.: J. Vac. Sci. Technol. **3** (1966) 99
- 9) P.W. Fisher and J.S. Watson, J. Vac. Sci. Technol. **16** (1979) 75
- 10) C.F. Dillow and J. Palacios, J. Vac. Sci. Technol. **16** (1979) 731
- 11) R.E. Southerlan, Technical Documentary Report AEDC-TDR-65-49 (1965)

- 12) J. J. Halama and J.R. Aggus, J. Vac. Sci. Technol. **11** (1974) 323
- 13) H.C. Hseuh and A. Worwetz, J. Vac. Sci. Technol. **18** (1981) 1131
- 14) H.C. Hseuh, et al.: Proc. 8th Symp. Eng. Prob. Fusion Res., 1979 (IEEE) 1568
- 15) 阿部仁志, 真空 **22** (1979) 12
- 16) 荒川, 辻, 生産研究 **31** (1979) 597
- 17) J.J. Thibault, et al.: J. Vac. Sci. Technol. **18** (1981) 1140
- 18) T.H. Batzer, et al.: Proc, 10th Symp. Fusion Technology, 1978
- 19) T.H. Batzer, et al.: J. Vac. Sci. Technol. **18** (1981) 1125
- 20) D.O. Coffin and C.R. Walther, Proc. 8th Symp. Eng. Prob. Fusion Res., 1979 (IEEE) 513
- 21) INTOR Report, Phaze One, (IAEA, 1982) 529