プラズマ加熱用中性粒子入射装置のクライオポンプ*

——原研での研究開発——

柴田 猛順**・松田慎三郎**

(昭和55年11月7日 受理)

Cryopump of Neutral Beam Injector for Plasma Heating Experiment
—Research and Development at JAERI—

Takemasa SHIBATA and Shinzaburo MATSUDA

(Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka, Ibaraki)

(Received November 7, 1980)

1. はじめに

中性粒子入射加熱によるプラズマ加熱は実験的にその有効性が確かめられており¹⁾、日本原子力研究所で現在建設中で昭和59年末完成予定の臨界プラズマ試験装置(JT-60)でも、75 keV, 20 MWの高速水素原子ビームによる、プラズマの加熱が予定されている²⁾。中性粒子入射装置の概要を図1に示す。

イオン源から引きだされた水素イオンは中性化セル中で荷電交換して高速水素原子になり、プラズマ閉じ込め用磁場を横切ってプラズマ中に入り、ここで再びイオン化してプラズマを加熱する。中性化されなかったイオンは偏向磁石で曲げられてビームダンプにあたり水素ガスになる。この水素ガスと中性化セルより流れだす水素ガスの量は10~100 Torr・l/sにもなる。これを効率よく排気して 10^{-5} Torr以下にしないと、高速水素原子が偏向磁石を通過後、残留ガスと衝突して再イオン化したり、室温の水素ガスがプラズマ中に流れこんでプラズマを冷却することになる。このためビームラインを約 10^6 l/sの排気速度で排気しなければならない。

プラズマへのビーム入射の持続時間が100 ms以下のときは、ビーム入射前に、中性粒子入射装置の大きな真空容器をよく排気しておき、ビーム入射時の水素ガスを大きな真空容器内に拡散させる方法を採用できる³⁾。しかしながら、装置が大型化するに従い、ビーム入射の持

続時間も100 msを越えるようになると、水素ガスを真空容器に拡散させただけでは中性粒子入射装置内の圧力は 10^{-4} Torr以上になってしまう。このためビーム入射時間が100~300 msとなるアメリカのPLT, ISX-B, Doublet IIIなどの中型トカマク装置の中性粒子入射装置は、クライオポンプを使用するようになった⁴⁻⁶⁾。日本でも、100 ms~300 msのビーム入射を行う京大ヘリオトロン用中性粒子入射装置は、クライオポンプにより水素排気を行う予定である⁷⁾。臨界プラズマ達成をめざすアメリカのTFTR^{8,9)}、ヨーロッパ連合のJET¹⁰⁾、ソ連のT-10-M¹¹⁾、の大型トカマク装置の中性粒子入射装置は、ビーム入射時間が0.5~10 sと長いので、すべての装置がクライオポンプを使用する予定である。原研が建設中のJT-60中性粒子入射装置も、ビーム入射時間が5~10 sと長いのでクライオポンプを用いる。原研が、昭和50年に液体ヘリウム冷却による凝縮型クライオポンプをJT-60中性粒子入射装置の主排気ポンプと決定したのは、大きい排気速度をもち、しかも数年以内に確実に実現可能なものと考えたからであった。諸外国の大型装置についても、クライオポンプの採用を決定したのは原研と同時期であった。

原研では、このポンプの開発のため昭和50年度より小型クライオポンプ(排気速度12,000 l/s¹²⁾および60,000 l/s¹³⁾)を製作し、その排気特性を調べてきた。中性粒子入射装置のクライオポンプは、大電流の粒子ビームが存在するところで作動する点が他のクライオポンプと異なるため、ポンプへのビーム入射実験^{14,15)}も行った。JT-

* 昭和55年9月5日 日本真空協会9月研究例会で講演

** 日本原子力研究所核融合研究部(茨城県那珂郡東海村白根)

図1 中性粒子入射装置
1ユニットの構成

60では14個の入射孔に対応して14ユニットのビームラインで中性粒子入射システムが構成されるが、14ユニットの製作に先立ってその性能を確認するため、1ユニット(JT-60用中性粒子入射装置原型ユニット)の建設を始めており、昭和56年にその確証テストを行う予定である。この結果を反映させて、昭和56年度後半よりJT-60中性粒子入射装置の建設に着手する。

ここでは、排気速度60,000 l/sの小型クライオポンプの排気特性¹³⁾と、ビーム入射実験の結果^{14,15)}、および建設の始まった原型ユニットのクライオポンプと液体ヘリウム、液体窒素の循環システム(冷媒循環系)について述べる。

2. 水素排気用 60,000 l/s クライオポンプの 排気特性とビーム入射実験

このクライオポンプの鳥かん図を図2に、排気速度測定系の概略図を図3に示す。

クライオポンプは二組からなり、それぞれが液体ヘリ

図2 60,000 l/s ク
ライオポンプ

図3 排気速度測定
系の概略図

図4 排気速度測定結果

図5 水素ビーム入射実験構成図

ウム槽、液体窒素槽、シエブロン、60 cm × 60 cm のクライオパネルで作られている。シエブロンは銅板で、表面が陽極酸化により黒色化されている。クライオパネルに、ステンレス板を二枚重ね合わせて等間隔に溶接してキルティング状にしたものである。一組のポンプの設計排気速度は30,000 l/s で、二組で60,000 l/s である。クライオパネルの温度は、液体ヘリウム槽で発生する蒸気をロータリーポンプで排気して、4.2 K 以下にすることもできる。排気速度 S は水素ガスを流し、膨張法で校正した電離真空計 G_1, G_2, G_3, G_4 により測定した圧力 P_1, P_2, P_4 を用い、次の式から求めた。

$$Q = C(P_1 - P_2)$$

$$S = Q/P_4$$

ここで Q は水素の流量、 C は 1 cm φ の穴のコンダクタンス (32 l/s) である。ここで求めた流量はサーマルフローメーターの指示ともよく一致した。結果を図4に示す。水素の平衡蒸気圧が無視できる圧力領域で、排気速度は 63,000 l/s で設計排気速度とよく一致した。クライオパネルの各温度での平衡圧力も文献値¹⁶⁾とよく一致した。JT-60 中性粒子入射装置では、クライオパネル単位面積当りの水素凝縮量が 1.6 Torr · l/cm² となったときに、パ

ネルの再生を行う予定なので、クライオポンプの動作中排気速度が減少しないことを確かめるために、再生予定量の10倍以上までパネルに水素を凝縮させて、排気速度の変化をみた。結果は、パネルに水素を凝縮させても排気速度は減少せず、むしろほとんど水素を凝縮していないときの排気速度より、水素をある程度凝縮しているときの排気速度の方が大きいことがわかった。

大電流の高エネルギー粒子がポンプ内を通過する時のポンプの排気性能の変化をみるため、ポンプの収納された容器内にビームを導入する実験を53年¹⁴⁾と54年¹⁵⁾に行った。53年の実験では30 kV, 7 A, 引きだし持続時間100 msのイオン源を用い、引きだし持続時間100 ms, デューティサイクル10%の水素イオンビームをクライオポンプに導入した。この時の実験の構成を図5に示す。この実験ではビーム引きだし持続時間が短く、排気性能の悪化は認められなかった。また、クライオパネルとシエブロンへの熱入力を液体ヘリウムと液体窒素の蒸発量の変化より測定した。この結果とモンテカルロ法¹⁷⁾による計算結果との比較から、パネルとシエブロンへの熱入力の増加は、ビームダンパーからの後方散乱粒子と熱放射とによるものとして説明することができた。54年の実

図6 ビーム入射中のポンプ内圧力変化

験では、この年開発した設計仕様75 kV, 6 A, 引きだし持続時間10 sのイオン源¹⁸⁾を用い、引き出し持続時間10 sのビームをクライオポンプ内に導入した。図6にこの時のクライオポンプ内の圧力変化を示す。

ビーム入射時と消滅時の圧力低下と上昇は、真空容器等の表面での水素吸収と放出によるものと思われ、クライオポンプを動作させていないときにも見られるものである¹⁸⁾。ビーム入射約3秒後に一定の圧力を示すが、入射前より数%高くなっている。ビーム入射前も入射中も

イオン源への水素ガス流量すなわちクライオポンプへのガス流量は一定なので、ビーム入射中は排気速度が減少したことになる。この排気速度の低下は、ビーム入射中のパルス熱負荷によりパネル溶接部の温度が上昇し、水素ガスが放出されることによるものと考えられる。JT-60用中性粒子入射装置のクライオポンプでは、クライオポンプが直接受熱面を見込まないように水冷バップルを設けるなどの工夫をして、パルス熱負荷をここでの実験よりは小さくすることにより、ビーム入射中のパネル溶接部からの水素ガス放出を抑えることにしている。

3. JT-60 用中性粒子入射装置原型ユニットのクライオポンプ

原型ユニットはJT-60用中性粒子入射装置(実機)のプロトタイプの意味をもつので、大部分を実機と同一に作る。最も大きい違いはJT-60本体とプラズマのかわりにトーラス模擬容器を置くことであり、この中にビームターゲットと水素を排気するためのクライオポンプを置く。図7にトーラス模擬容器を含んだ原型ユニットの図

図7 JT-60 用中性粒子入射装置原型ユニット

図8 主排気タンク内のクライオポンプの配置

図9 液体ヘリウム循環系の概略図

を示す。図8に主排気タンク内のクライオポンプの配置の平面図を示す。

主排気タンク内は P_1 、 P_2 、 P_3 室の三つに仕切られ、それぞれ一対のクライオポンプで差動排気する。それぞれの室での排気速度は 6×10^5 l/s, 6×10^5 l/s, 7×10^4 l/sで、作動中の圧力は 5×10^{-6} Torr, 1.5×10^{-5} Torr, 8×10^{-6} Torrである。

クライオパネルの候補としてステンレス鋼をキルティング構造にしたものと、アルミニウムのフィン付管の二つを考えた。中性粒子入射装置はトーラスプラズマによる変動磁場があり、これによる渦電流がクライオパネル内を流れて発熱する。パネルに電気抵抗の小さいアルミニウムを用いると、渦電流によるパルス熱負荷で排気不能になる可能性があるので、キルティング構造のステンレス鋼をパネルに用いることにした¹⁹⁾。シェブロンは 120° に曲げたアルミニウム板をすだれ状に並べ表面を黒化処理する²⁰⁾。パネルの冷却方式には液体ヘリウムのた

めこみ方式を選んだ。強制循環方式を選ばなかったのは、ためこみ方式のほうがパルス熱負荷に対し抵抗があり、将来実機での14ユニットへの並列供給も容易と考えたためである。シェブロンやシールド板の液体窒素による冷却はポンプ圧送方式を選んだ。これはためこみ方式では真空容器内に気液分離器等が必要となって、内部配管が複雑になるためである。表1にヘリウム系への熱負荷、図9に液体ヘリウム循環系の概略図を示す。

冷凍機的能力は3.7K, 200Wとした。推定熱負荷は表1のように約170Wであるが、余裕をみて200Wとした。タンク内の推定圧力(最も低いところで 8×10^{-6} Torr)でも十分な排気速度をもつためには、パネルを3.9K以下にすればよい。一方、渦電流発熱等のパルス熱負荷によるパネル表面温度上昇は約0.2Kと評価される¹⁹⁾ので、冷凍機の冷却温度を3.7Kとした。液体ヘリウム系全体は閉サイクルで、クライオパネルは冷凍機に直結しており、パネル上部の気液分離器で発生した大気圧以下のヘ

表1 原型ユニット液体ヘリウム系への熱負荷の評価

	主 排 気 タ ン ク	ト ー ラ ス 模 擬 容 器	共 通 部 分	合 計
放 射	28.3W	18.1W		
熱 伝 導	3.1	1.4		
内 部 配 管	12.8	7.6		
バ ル ブ	11.6	11.6		
外部配管・バルブ			78W	
計	55.8W	38.7W	78W	173W

リウム蒸気は、コールドボックスにもどし寒冷を回収する。1,000 l の液体ヘリウムデューワーはパネルの予冷時間を短くするのに用いる。パネル温度の制御は回収ガスラインの圧力を一定にすることにより行い、液体ヘリウム供給の制御は気液分離器の液面を一定にすることにより行う。主排気タンクとトーラス模擬容器への液体ヘリウムと液体窒素の供給は並列供給で行うが、これは実機の14ユニットへの並列供給を模擬することになる。

JT-60 中性粒子入射装置のクライオポンプのための液体ヘリウムと液体窒素の循環系は、昭和55年に詳細設計を行い、これと原型ユニットの実験結果を見て57年には製作に入る予定である。

〔文 献〕

- 1) 松田慎三郎, 下村安夫: 日本原子力学会誌 **22**, No. 10 (1980).
- 2) 松田慎三郎, 荒川義博, 堀池 寛, 伊藤孝雄, 河合視己人, 近藤梅夫, 森田洋昭, 小原祥裕, 大賀徳道, 奥村義和, 桜庭順二, 柴田猛順, 白形弘文, 田中 茂: 日本原子力研究所報告 JAERI-M 7655 (1978).
- 3) Y. Shimomura et al.: 日本原子力研究所報告 JAERI-M 9065 (1980).
- 4) M. M. Menon et al.: J. Appl. Phys., **50** (1979) 2484.
- 5) J. Kim. et al: J. Appl. Phys., **51** (1980) 1984.
- 6) D. W. Doll, J. M. Kamperschroer and P. V. Arend: Proc. 8th Symp. Engineering Problems of Fusion Research, San Francisco, (1979) p. 2155.
- 7) 飯吉厚夫, 大引得弘: 私信
- 8) L. E. Valby: Proc. 7th Symp. Engineering

Problems of Fusion Research, Knoxville, (1977) p. 1040.

- 9) L. C. Pittenger et al.: Proc. 8th Symp. Engineering Problems of Fusion Research, San Francisco, (1979) p. 831.
- 10) J.R. Coupland et al.: Proc. 9th. Symp. Fusion Tech., Garmish-Partenkirchen, (1976), p. 903.
- 11) N. N. Semasko et al.: "Injector for large thermonuclear apparatus" 熱核融合炉の技術問題についての全ソ会議, レニングラード (1977) (ロシア語).
- 12) 柴田猛順, 松田慎三郎, 白形弘文, 齊藤正樹, 水野正保, 小宮宗治: 日本原子力研究所報告, JAERI-M 7792 (1978).
- 13) 柴田猛順, 奥村義和, 桜庭順二: 日本原子力研究所報告, JAERI-M 7869 (1978).
- 14) 桜庭順二, 大賀徳道, 柴田猛順: 日本原子力研究所報告, JAERI-M 8013 (1978).
- 15) 柴田猛順, 水谷泰彦, 奥村義和, 桜庭順二, 柴沼清: 日本原子力研究所報告, JAERI-M 投稿中.
- 16) C. Benvenuti, R. & Calder and G. Passardi: J. Vac. Sci. Technol., **13** (1976) 1172.
- 17) 桜庭順二, 柴田猛順: 日本原子力研究所報告, JAERI-M 7611 (1978).
- 18) Y. Okumura, S. Matsuda, Y. Mizutani, Y. Ohara and T. Ohga: Rev. Sci. Instrum. **51** (1980) 728.
- 19) 柴田猛順, 堀池 寛, 栗山正明, 松田慎三郎, 桜庭順二, 白形弘文: 日本原子力研究所報告, JAERI-M 8935 (1980).
- 20) S. Isobe, T. Ueda, T. Shibata, H. Shirakata, S. Matsuda: Proc. 8th. Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, San Francisco, (1979) p. 533.