JT-60 用中性粒子入射装置 (NBI) の クライオポンプシステム

柴田猛順, 柴沼 清

日本原子力研究所那珂研究所 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

(1985年11月25日受理)

Cryopumps and Cryogenic Systems for JT-60 Neutral Beam Injector

Takemasa SHIBATA and Kiyoshi SHIBANUMA

Japan Atomic Energy Research Institute, Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 25, 1985)

Synopsis :

The JT-60 neutral beam injector consists of 14 beamlines. Each beamline has a cryocondensation pump of capacity 1,400m³/sec. The purpose is to evacuate hydrogen gas of 2~4 Pa・m³/sec from the ion sources, thereby keeping the pressure in the beamline chamber in the order of 10⁻³ Pa during beam extraction. The cryopump consists of four large modules, two small modules and two phase separators. These modules are divided into three pairs and constitute differential pumping. In each module, liquid helium and liquid nitrogen are supplied from the phase separators by natural circulation based on thermal siphon effect. The cryogenic system for the cryopumps are helium and nitrogen systems. The helium system is a complete closed loop of a refrigerator (cold box, main and pumping compressors), distribution transfer lines, a liquid helium storage dewar and helium gas storage tanks. Design capacity of the refrigerator is 2,400W at 3.7K. The construction was started in autumn of 1983. Each performance of the 14 cryopumps was tested one by one in the test bed facility with good results. Capacity of helium refrigerator exceeded 2,500W at 3.6K. Completion of the system is scheduled for July 1986.

1. はじめに

日本原子力研究所では、昭和60年3月、臨界プラズマ試験装置 (JT-60) が完成し実験が開始されているが、昭和61年8月より中性粒子入射加熱と高周波加熱による本格的な加熱実験を行い、臨界プラズマの達成を目ざしている¹⁾。JT-60 用中性粒子入射加熱装置 (NBI : Neutral Beam Injector の略) は、Table 1 のように14ユニットで合計 20MW の高速水素原子で JT-60 のプラズマを加熱するものであるが、各ユニットには、排気容量が1,400m³/s という大容量のクライオポンプが設置されている。Fig. 1 に NBI の概要を示す。イオン源から引き出された水素イオンは中性化セル内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偏向されてビームダンプに衝突し水素ガスになる。この水素ガスと中性化セルよ

Table 1 Basic performance of the JT-60 NBI

Beam Energy	75~100keV
Ion Beam Current	70 A × 14
Neutral Beam Power	1.4 MW × 14
Beam Duration Time	10 sec
Number of Beamlines	14 units

Fig. 1 Schematic of a neutral beam injector (NBI)

り流れだす水素ガスの量は数 $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ (数十 Torr $\cdot$ l/s) にもなる。これを効率よく排気して、ビームライン内の圧力を 10^{-3}Pa 程度にして、高速水素原子が偏向磁石通過後、残留ガスと衝突して再イオン化するのを抑える必要がある。このため、ビームラインを $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の排気速度で排気しなければならない。JT-60 とともに臨界プラズマの達成を旨とするアメリカの TFTR、ヨーロッパ連合の JET の大型トカマク装置の NBI も大容量のクライオポンプ^{2,3,4)}を用いている。

原研が、昭和50年にこの条件を満たすポンプとして液体ヘリウム使用の凝縮型クライオポンプに決定したのは、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。しかし当時上記のような水素排気用大容量クライオポンプは例がなく未知の点も数多くあったこと、しかも NBI という特殊な条件下で使用されるので原研では、その試作開発を行った。

昭和50年度より $60,000\text{l/s}$ の小型クライオポンプ⁵⁾を製作し、これが水素ガスを予想どおり、排気することを確認した。NBI のクライオポンプは、大電流の粒子ビームが存在する近傍で作動する点が他のクライオポンプと異なるため、クライオポンプ近傍へのビーム入射実験⁶⁾も行っており、クライオポンプがビームダンプ等の受熱面を直接見込まないように水冷パッフル等を設ける必要のあることを示した。JT-60 用 NBI は14ユニットのビームラインで構成されるが、14ユニットの製作に先立って1ユニット (JT-60 用中性粒子入射装置原型ユニット) を昭和56年に完成させ、翌57年には定格である 75keV 、 70A 、 10秒 のビーム引出⁷⁾、58年には最高出力の 100keV 、 70A 、 10秒 ⁸⁾ のビーム引出に成功した。ビーム引出の試験とともに、クライオポンプの排気速度、再電離損失の測定を行い、いずれも目標性能を満足していることを確認した。原型ユニットの成果をもとに、昭和58年から JT-60 の中性粒子入射に用いる14基

のビームラインと、イオン源用電源、冷凍設備等の補助設備の建設を開始した。完成は昭和61年7月の予定である。この間14基のビームラインについては、JT-60 本体の周囲に据え付ける前に、その健全性を確認するため1基ずつ原型ユニットの施設で、ビーム引出実験と並行してクライオポンプの性能試験を59年3月から60年の8月にかけて行った。一方、これら14基のクライオポンプに液体ヘリウムを供給する He 冷凍機は、 3.7K 、 $2,400\text{W}$ という国内では最大の冷凍能力をもち、その運転は制御用計算機で自動制御される。

ここでは、JT-60 用 NBI のクライオポンプとその冷凍設備、現在までに行われた試験結果について述べる。また他の NBI のクライオポンプについての概要についても JT-60 用 NBI クライオポンプと比較するため紹介する。

2. JT-60 NBI のクライオポンプ

14基のビームラインは Fig. 2 のように上下2基ず

Fig. 2 Cross sectional view of the JT-60 NBI

つJT-60本体の周囲にとりつけられる。クライオポンプは、Fig. 3のように6個のクライオポンプモジュールと気液分離器及びこれらを結ぶ配管でできている。6個のクライオポンプモジュールは、Fig. 4のように中性化セル、偏向磁石、ビームダンプ等の周囲に真空容器壁面に沿って置かれている。真空容器はイオン源側から P_1 , P_2 , P_3 室の三つの部屋に仕切られ、それぞれに2個のクライオポンプモジュールがあつて中性化セルから流れだす水素ガス、ビームダンプから再放出

Fig. 4 Horizontal cross sectional view of the beamline chamber

Fig. 3 Cryopump in the lower beamline chamber; 1 Cryopanel 2 Chevron Baffle 3 Thermal Shield 4 He Phase Separator 5 Thermal Shield

Fig. 5 Cryopanel assembly section

する水素ガスを効率よく排出するための差動排気を行っている。クライオポンプの排気速度はドリフト部での再電離損失が5%以下になるように P_1 室, P_2 室, P_3 室のポンプの排気速度が, $650\text{m}^3/\text{s}$, $650\text{m}^3/\text{s}$, $70\text{m}^3/\text{s}$ で合計 $1,370\text{m}^3/\text{s}$ とした。クライオパネル単位面積当りの排気速度は, 小型クライオポンプの試験で得られた $9\text{ l/s}\cdot\text{cm}^2$ として各パネルの面積を決定し, クライオパネル面積の合計は 15m^2 とした⁹⁾。

各クライオポンプモジュールは Fig. 5 のようにステンレス鋼をキルティング構造にしたクライオパネル, アルミニウムのシェブロン, アルミニウムの放射シールドでできっており, 水素ガスはシェブロンを通過してクライオパネルに付着する。パネルの候補としては, 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き管の二つを考えた。NBI にはト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, ス

ステンレス鋼をパネルに用いた。トーラスからの影響でもう一つ考慮したことは、トーラスプラズマからのマイクロ波であるサイクロトロン放射であった。ステンレス鋼は電気抵抗が大きくサイクロトロン放射を吸収し、パネル温度が上昇して排気不能になる可能性が特にトーラスに近い P_3 室のクライオポンプにあったので、 P_3 室のクライオパネルには、表面の電気伝導をよくするため約 $1\ \mu\text{m}$ のアルミニウムをコーティングした⁹⁾。シェブロンは 100° に曲げたアルミニウム板をすだれ状に並べ、常温からの放射を吸収するように黒化処理をした。この黒化処理で特に注意したことは、その放射率を 1 に近くすることだけでなく、常温時の放出ガスを少なくすることであった。これはシリコン黒化塗料を採用することにより解決した¹⁰⁾。

6 枚のクライオパネルへの液体ヘリウムの供給は、Fig. 6 のように定常時は自然循環により気液分離器から行われる。予冷は冷凍機からの He ガスまたは液体ヘリウムを予冷弁を通してクライオパネル下部に直接流して行く。液体窒素も定常時は液体ヘリウムの場合と同様に、自然循環により気液分離器よりシェブロン、シールドに供給される。液体窒素は蒸発潜熱が大きいので予冷時も特別な予冷弁、予冷ラインを用いず、気液分離器から自然循環により液体窒素を落下させて行く。

パネル温度は 3.7K 以下で運転する。タンク内の水素ガス圧力が $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 程度でも十分大きい排気速度をもつためには、パネル面での水素の平衡蒸気圧を $1 \times 10^{-3}\text{Pa}$ よりずっと小さくする必要があり、パネルを 3.9K 以下にすればよい。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最大 0.2K と評価されたので、通常時のパネル温度は 3.7K 以下とした⁹⁾。このため、クライオポンプの液体ヘリウムの圧

Fig. 6 Flow diagram of helium in the cryopump

力は大気圧より減圧して -35cmHg 程度で運転される。

通常の低温装置と異なり、NBI には大パワーのビームを受ける受熱機器が数多くあり、いずれも水冷されている。このための冷却水が停止すると、液体窒素冷却のシェブロンによる放射冷却で冷却管内の水が凍結し、受熱機器の破損、さらに再び温度上昇したときに真空容器内への水の流入が起こる。このような事態を避けるため、クライオポンプが 0°C 以下のときは、必ず冷却水を流すよう制御され、停電時も非常電源で冷却水を循環させる対策が施されている。

3. クライオポンプ試験結果

ここでは、原型ユニットで行った試験結果を述べる。同じ施設で行った JT-60 用の 14 基のビームラインの試験については原型ユニットと異なるものについてのみ述べる。いずれの場合も、ビームラインにターゲット容器が接続してあり、中性ビームをターゲット容器に入射した。またクライオポンプは 3.7K 、 300W のヘリウム冷凍機¹¹⁾と接続して試験を行った。

3-1 排気性能試験

水素ガスを P_1 室、または P_3 室から導入し、このときの各室の圧力を較正した電離真空計で測定した。Fig. 7 はイオン源を通して P_1 室に $3\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ の水素ガスを導入したときのビームライン各部の圧力を示す。これらの測定から P_1 、 P_2 、 P_3 室のクライオポンプの排気速度はそれぞれ $680\text{m}^3/\text{s}$ 、 $680\text{m}^3/\text{s}$ 、 $60\text{m}^3/\text{s}$ 、

Fig. 7 Pressure distribution when hydrogen gas ($3\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$) was introduced through ion sources

合計1,430m³/s で設計値に近い値であった。

3-2 クライオポンプへの熱負荷

クライオポンプへの液体ヘリウムの供給を停止したときのヘリウムガス蒸発量を測定してクライオポンプへの熱負荷を求めた。ただし配管の一部と液面制御用弁の熱負荷はこの試験ではヘリウム蒸発量に寄与しないので、この部分の熱負荷の設計値を蒸発量に対応する熱負荷に加えて、クライオポンプへの熱負荷とした。原型ユニットではこの値は52Wであったが、JT-60用の14基のクライオポンプでは平均38Wであった。これは、14基のクライオポンプの内部配管の多層断熱材の巻き方を改良したためであると思われる¹³⁾。

3-3 ビーム入射とクライオポンプの動作

Fig. 8 に、90kV、63A、10秒のビーム引出を行っているとき、ビームラインの P₁、P₃室と、ターゲット容器の圧力の時間変化を示す。この実験ではビーム引出の3.5秒前からイオン源及び中性化セルに合計4.3 Pa・m³/sの水素ガスを導入しており、ビーム入射前のガス導入のみの時と、ビーム入射中でのクライオポンプの動作の比較ができる。P₁室、P₃室ではビーム入射中も、圧力はほぼ一定値を示し、クライオポンプが正常に動作していることがわかる。なお、ビーム引出直後の圧力低下は、ビーム相当分のガスが、一旦ビーム

Fig. 8 Temporal evolution of the gas pressure when 90keV、63A、10s ion beam was extracted and 1.40MW of neutral power was injected to the target

ダンプ等の受熱機器に留まり、そこから0.5～1秒程度の時定数で再放出されることによる。ターゲット容器も、全排気量900m³/sのクライオポンプで排気されており、その圧力上昇は、中性ビームがビームターゲットにあたって水素ガスが再放出するためである¹³⁾。

原型ユニットには、トカマク本体からの漏洩磁場を模擬するための漏洩磁場模擬コイルがある。この模擬漏洩磁場をビームラインに印加すると偏向磁石を通過した高速中性粒子で残留ガスと衝突して再イオン化したものは漏洩磁場により偏向され、ターゲットに入らなくなる。漏洩磁場を印加したときとしないときのターゲット入力パワーの差より再電離損失を求めた結果4%であった。設計目標値は5%であり、この値よりも小さくすることができた。またこの4%の値は、各ビームラインの水素ガス圧力と、再電離断面積から推定される値と一致した⁸⁾。

4. JT-60NBI クライオポンプ用冷凍設備

冷凍設備の主要フローを Fig. 9 に、主要機器の仕様を Table 2 に示す。冷凍設備全体の鳥かん図を Fig. 10 に示す。冷凍能力は、クライオポンプ及びコールドボックスとクライオポンプをつなぐ真空断熱配管の侵入熱推定値より決めた。クライオポンプの推定熱負荷は原型ユニットでの測定値の1基52Wをもとに14基で730Wとした。また Fig. 10に示すようにヘリウムの真空断熱配管は全長約450mであり、その推定熱負荷は、パイオネット継手、弁等も含んで、970Wである。合計熱負荷は、1,700Wであるが、予冷時の運転等を容易にするため、冷凍能力は、2,400Wとした。2台の主圧縮機、2台の減圧ポンプは、共に油潤滑のスクリー圧縮機である。

ヘリウムの循環は完全な閉サイクルであるので、ヘリウムガスの精製はコールドボックス内の内部精製器

Table 2 Major specifications of the cryogenic systems for JT-60 NBI

Helium	Refrigerator	2,400W at 3.7K
	Main Compressor	5,000 Nm ³ /h×2
	Pumping Compressor	1,100 Nm ³ /h×2
	LHe Dewar	3,000 l
	GHe Storage Tank	100m ³ ×2
	Recovery Compressor	100Nm ³ /h
Nitrogen	LN ₂ Storage Tank	100,000l×2

Fig. 9 Simplified flow diagram of the cryogenic systems for JT-60 NBI

Fig. 10 Overview of the cryogenic systems for JT-60 NBI

のみで行い、特別のヘリウムガス精製器はない。2週間の連続運転の後1週間停止で停止期間中に内部精製器の活性化を行う予定である。

液体窒素は各クライオポンプへ液体窒素タンクから長い真空断熱配管を通して圧送される。ヘリウムの真空断熱配管と並行する部分ではヘリウム配管と同一の真空槽内を流れ、ヘリウム配管のシールド板も冷却する。クライオポンプで蒸発した窒素ガスは加温器で常温にして大気放出する。また冷凍機のコールドボックス内の熱交換器を冷却するためにも液体窒素が用いられる。

クライオポンプも含めたヘリウム冷凍機は、計装用計算機により自動制御される。これは、14基のクライオポンプを並列で行うことと、夜間の運転を容易にするためである。14基のクライオポンプは各々独立に、四つの運転モード (1)停止 (2)予冷 (3)定常 (4)再生のうちいずれかを選択することができる。冷凍機の起動後、ジュワーに液体ヘリウムがたまるまでに9時間、クライオポンプが定常に達するのはジュワー液だめ終了後15時間を予定している。

昭和60年8月に、ヒーターの模擬負荷の入った冷凍能力試験用ジュワーを冷凍機コールドボックス、3,000 lの液体ヘリウムジュワーと接続して、冷凍能力試験を行った。この結果3.6Kで2,500W以上の冷凍能力が確認された。今後さらに流量等の最適化を行って最大冷凍能力を求める予定である。冷凍能力試験後、冷凍機と14基のクライオポンプを接続し、冷凍システムの総合試験を昭和61年2、3月に行い、61年8月からのJT-60加熱実験に備える。

5. JT-60以外の NBI クライオポンプの概要

JT-60用 NBI クライオポンプを他の NBI クライオポンプと比較するため、これらのクライオポンプの仕様を NBI 全体性能とともに Table 3 に示す^{14,15)}。前節で述べたように NBI にクライオポンプを用いることを考慮し始めたのは1970年代前半であったが^{16,17)}、実際の入射装置に用いられたのは1977年米国プリンストン大の PLT 用 NBI においてであった¹⁸⁾。このクライオポンプは、冷凍機とは接続されておらず、液体ヘリウムは、液体ヘリウムタンクから直接供給された。これとほぼ等しいクライオポンプが、プリンストン大の PDX、オークリッジ国立研究所の ISX-B 用の NBI でも用いられている¹⁹⁾。京都大学ヘリオトロンE用の NBI クライオポンプは、規模は小さいが、液体ヘリウムが、直接冷凍機から供給され、ヘリウムループが閉サイクルになった最初の例である²⁰⁾。米国 GA 社の Doublet III の NBI クライオポンプ以外のクライオポンプではクライオパネルへの液体ヘリウム供給は、パネル上部に気液分離器をもち自然循環により行っているが、Doublet III 用では、アルミニウムのフィン付管でできているパネルに強制的に3.8Kの気液二相ヘリウムを流している。この方法はビームライン内のヘリウム配管が単純となる反面、ヘリウムを十分流す必要がある²¹⁾。JET 用 NBI のクライオポンプはシェブロン構造が serial open structure と呼ばれ、ガス分子のシェブロン通過確率が、JT-60等のシェブロンの場合の倍以上あり、単位面積当りの排気速度が25l/s・cm²にもなっている⁴⁾。今後、よりコンパクトなクライオポンプを作っていくうえで非常に

Table 3 Comparison of Cryopumps for Neutral Beam Injectors

	Design Values of 1 Beamline		Number of Beamlines	Capacity of Refrigerator	References
	Neutral Beam Power	Pumping Speed			
PLT (US)	40keV, 0.75MW, 0.3 s	500m ³ /s	4	—	18, 19
Heliotron E (Kyoto Univ.)	30keV, 0.7MW, 0.2 s	200	3	100W at 3.6K	20
Doublet III (US)	80keV, 2.4MW, 0.5 s	1,400	3	300W	21
TFTR (US)	120keV, 5.5MW, 1.5 s (D Beam)	2,500 (for D ₂)	4	1,070W at 3.8K	2, 3, 23
JET (EC)	80keV, 5MW, 10 s	6,000	2	330W at 3.6K	4, 24
JT-60 (JAERI)	75-100keV, 1.4MW, 10 s	1,400	14	2,400W at 3.7K	25

重要な考案である。三大トカマクのうち、現在（1986年1月）NBIが稼動しているのはTFTRの2基のみである²²⁾が、1986年JT-60とともにJETのNBIも運転に入る予定である。JT-60 NBIはTFTR用²³⁾、JET用²⁴⁾と比較してビームライン1基当りの入射パワーが小さく、これに対応してクライオポンプ排気速度も小さいが、ビームラインの数は14基と最も多い。このため、クライオポンプ全体の排気速度及びクライオポンプ用冷凍機の容量は最も大きい²⁵⁾。

本稿ではNBIクライオポンプ全般について詳述できなかったが、最近J. Kim¹⁴⁾がよい総説を書いているので参照していただきたい。

6. おわりに

JT-60 NBIのクライオシステムの開発、建設は現在まで予定どおり進み、JT-60 NBIの他の設備についても順調であり、JT-60のNBI実験の成果が待たれる。

原研では、JT-60に続く実験炉の建設を予定している。実験炉でのNBIはエネルギーの大きいところでも中性化効率のよい負イオンを用いたものになると予想されるが²⁶⁾、主排気装置としてはクライオポンプをここでも用いることになる。実験炉ではプラズマ内でDT反応が起こり多量の中性子が放出されること、トラスからトリチウムも逆流してくることなど、JT-60 NBIのクライオポンプでは考慮しなかった重要な点が多くある。実験炉NBIのクライオポンプについても詳細に考え始めるのが必要な時期になっている。実験炉では、トラス真空容器の主排気装置としてクライオポンプが採用される可能性も大きい。この場合、中性子束はNBIクライオポンプでの中性子束よりずっと大きいだけでなく、DT反応で生ずるヘリウムの排気も行い必要がある。クライオポンプによるヘリウムの排気は小規模な基礎実験しか行われていない²⁷⁾。実験炉を想定したヘリウム排気のクライオポンプの開発は早急に着手すべき時期になっている。

JT-60 NBIは14基のビームラインで構成され、しかも14基のクライオポンプへのヘリウム配管が非常に長くかつ複雑なため、ヘリウム冷凍機は、2,400Wという大規模なものとなった。実験炉では、ビームラインの数は、1基か2基にしたいと考えており、クライオポンプに必要な冷凍能力は、JT-60 NBIに比べかなり小さくてすむと思われる。しかし実験炉に必要な超電導磁石の冷却には50kW程度の冷凍機を必要とす

る²⁸⁾。また高エネルギー研究所でも超電導キャビティ用に6.5~10kW程度の冷凍機が必要という²⁹⁾。以上の他にもさまざまな分野でヘリウムの大型冷凍機が今後必要とされるであろうが、今回の冷凍機は、これまで国内最大であった、超電導磁石研究用の原研の4.4 K, 1,200 W³⁰⁾を2倍以上上回るものであり、この冷凍機の製作、運転の経験は今後の冷凍機大型化への貴重な経験となるであろう。

謝 辞

本解説で述べた多くの内容は、JT-60 NBIの研究開発の一環として行われたものであり、松田慎三郎、白形弘文両室長を始めとする原研核融合のNBIグループの人々に感謝いたします。この解説の執筆を激励して下さい島本進超電導研究室長に感謝いたします。また終始御指導と激励をいただいた苫米地顕那珂研究所長、吉川允二臨界プラズマ研究部長に厚く御礼申し上げます。JT-60 NBIのクライオポンプと冷凍設備の設計建設に尽力されてきた（株）日立製作所の関係者の方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 磯 康彦, 吉川允二: 日本原子力学会誌, 24 (1982) 247
- 2) L.E. Valby: Proc. 7th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, Knoxville (1977) 1040.
- 3) R.A. Byrns and G.A. Newell: Advances in Cryogenic Engineering, 27 (1981) 1145.
- 4) W. Obert, G. Duesing, E. Kuessel, P. Kupschus, C. Mayaux, P.H. Rebut, H. Santos: Proc. 13th Symposium on Fusion Technology, Varese (1984) 311.
- 5) 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).
- 6) 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 92 13 (1980)
- 7) M. Akiba, M. Araki, H. Horiike, T. Ito, M. Kawai, M. Kuriyama, S. Kitamura, S. Matsuda, M. Matsuoka, H. Mukaida, Y. Oguchi, Y. Ohara, T. Ohga, H. Ohtsuki, Y. Okumura, K. Shibamura, T. Shibata, H. Shirakata and S. Tanaka: Rev. Sci. Instrum., 53 (1982) 1864.

- 8) H. Horiike, M. Akiba, M. Araki, M. Dai-raku, T. Itoh, M. Kawai, M. Kuriyama, S. Kitamura, S. Matsuda, M. Matsuoka, K. Mizuhashi, Y. Oguchi, Y. Ohara, T. Ohga, Y. Okumura, K. Shibamura, T. Shibata, H. Shigematsu, H. Shirakata, T. Sugawara, S. Tanaka and K. Watanabe: *Rev. Sci. Instrum.*, **55** (1984) 332.
- 9) 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)
- 10) S. Isobe, T. Uede, T. Shibata, H. Shirakata, and S. Matsuda: *Proc. 8th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, San Francisco (1979)* 533.
- 11) T. Shibata, M. Akiba, H. Horiike, M. Kuriyama, S. Matsuda, M. Matsuoka, Y. Okumura, K. Shibamura, S. Isobe, Y. Ono and T. Uede: *Proc. 9th International Cryogenic Engineering Conference, Kobe (1982)* 612.
- 12) 柴沼 清, 大楽正幸, 黒金正春, 小野要一, 柴田猛順, 寺門拓也: 日本原子力研究所報告 JAERI-M 85-167 (1985)
- 13) T. Shibata, M. Matsuoka, Y. Ohara, Y. Okumura and K. Shibamura: *J. Nucl. Materials*, **128 & 129** (1984) 713.
- 14) J. Kim: *J. Vac. Sci. Technol.*, **A2** (1984) 1180.
- 15) 白形弘文: 日本物理学会誌, **37** (1982) 1020.
- 16) H. J. Halama and J. A. Bamberger: *Proc. 6th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, San Diego (1975)* 202.
- 17) T. J. Duffy: *Proc. 6th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, San Diego (1975)* 805.
- 18) G. Schilling et al.: *Proc. 8th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, San Francisco (1979)* 1379.
- 19) W. L. Gardner et al.: *Proc. 8th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, San Francisco (1979)* 972.
- 20) N. Hosomi, Y. Awada, T. Obiki and T. Uede: *Proc. 9th International Cryogenic Engineering Conference, Kobe (1982)* 251.
- 21) A. R. Langhorn, J. Kim, M. L. Tupper, J. P. Williams and J. Fasolo: *J. Vac. Sci. Technol.*, **A2** (1984) 1193.
- 22) H. P. Eubank et al.: *Proc. 10th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, London 1 (1984)* 303.
- 23) G. R. Pinter and G. W. Tasoulas: *Proc. 8th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, San Francisco (1979)* 2147.
- 24) W. Obert, R. L. Roberts, H. Santos, and F. Spath: *Proc. 9th International Cryogenic Engineering Conference, Kobe (1982)* 247.
- 25) T. Shibata et al.: *Proc. 11th Symp. on Fusion Engineering, Philadelphia (1983)* 2021.
- 26) 柴田猛順, 堀池 寛, 松田慎三郎, 小原祥裕, 奥村義和, 田中 茂: プラズマ・核融合学会第2回秋期講演会(東海) (1985) 7aA11.
- 27) 中村和幸, 村上義夫: 低温工学 **18** (1983) 49
- 28) 臨界プラズマ研究部: 日本原子力研究所報告 JAERI-M 85-177 (1985)
- 29) 細山謙二, 私信
- 30) E. Tada, T. Hiyama, T. Kato, O. Takahashi, and S. Shimamoto: *Proc. 9th International Cryogenic Engineering Conference, Kobe (1982)* 93