156. JT-60 真空容器建設途上の真空管理

山本 正弘*, 清水 正亜*, 新井 貴*, 中村 博雄*,
安東 俊郎*, 荻原 徳男*, 高津 英幸*, 能代谷 彰二*,
大久保 実*, 秋野 昇*, 砂押 秀則*, 豊島 昇*,
平塚 一*, 大都 和良*, 太田 充*, 畑 守**, 梶浦 宗次**

(1986年 4月19日 受理)

Vacuum Quality Control of JT-60 Vacuum Vessel during Assembly

By Masahiro YAMAMOTO, Masatsugu SHIMIZU,
Takashi ARAI, Hiroo NAKAMURA, Toshiro ANDO,
Norio OGIWARA, Hideyuki TAKATSU, Shoji NOSHIROYA,
Minoru OHKUBO, Noboru AKINO, Hidenori SUNAOSHI,
Noboru TOYOSHIMA, Hajime HIRATSUKA, Kazuyoshi OHTSU,
Mitsuru OHTA, Mamoru HATA and Souji KAJIURA

The present report describes the vacuum leak testing, the wall conditioning and the obtained vacuum performance of the JT-60 vacuum vessel before the first plasma production.

The JT-60 tokamak machine is composed of many components, and its assembly had been conducted for 19 months at Naka Establishment in Japan Atomic Energy Research Institute under unfavorable conditions for vacuum parts. Vacuum quality control and wall conditioning of the vacuum vessel had been carefully carried out during the course of installation.

The following results of the vacuum control are obtained. No vacuum leaks beyond the detectable limit were observed. The final vacuum pressure of 7.4×10^{-7} Pa and the outgassing rate of 6.8×10^{-10} Pa·m³/s·m² were obtained after three times of bake out of the vacuum vessel.

KEYWORDS: JT-60 tokamak, outgassing rate, surface cleaning, ultimate vacuum pressure, vacuum, vacuum properties, vacuum vessel

I. 緒 言

日本原子力研究所(原研)が建設を進めていた臨界プラズマ試験装置⁽¹⁾(JT-60)は、約19ヵ月の現地据付け工事の末、1984年10月末に本体の組立てを完了した。JT-60の鳥瞰図をFig.1に示す。

以後、各設備単体の調整試験、本体コイル通電試験、総合機能試験などを順調に終え、1985年4月8日に最初のプラズマの着火に成功した。その後、JT-60は約3ヵ月間のジュール実験を行い、プラズマ電流1.6 MA、プラズマ密度 4.8×10^{19} /m³、電子密度2 keVのプラズマ生成に成功した⁽²⁾。現在は中性粒子入射装置(NBI)、高周波加熱装置(RF)を据付け中である。

プラズマの性能は、その閉じ込め用真空容器の到達圧力、内表面の清浄度の程度によって大きく左右される⁽³⁾。そのため、Table 1に示すように、大型で複雑

な形状である点を考えると、総合的にみて厳しい真空性能がJT-60の真空容器に課せられた。

Table 1 Specification of JT-60 vacuum vessel

Item	Required value
Allowable leak rate	6.65×10^{-8} Pa·m ³ /s
Allowable outgassing rate	1.33×10^{-8} Pa·m ³ /s·m ²
Ultimate vacuum pressure	1.33×10^{-6} Pa

真空容器の構造は、大周方向にインコネル625製の厚肉リングとベローズを交互に各8個接続した主半径3 mのトーラス容器である。ポロイダル断面の形状は卵形で、短径は約2 m、長径は3 mである。真空容器の内壁は、プラズマの不純物対策のため純Moおよびインコネル625材の表面を炭化チタンでコーティング

* 日本原子力研究所 (Japan At. Energy Res. Inst.)

** 日立製作所 (Hitachi Ltd.)

Each number denotes following components:
 (1) Vacuum vessel, (2) Toroidal field coil, (3) Poloidal field coil, (4) Vacuum pumping system, (5) Support structure, (6) Magnetic limiter coil, (7) First movable limiter, (8) Neutral beam injector, (9) Radio-frequency system

Fig. 1 Bird's-eye view of JT-60

した第1壁で覆われており、さらにプラズマの不純物対策および位置制御用に3本の磁気リミタコイルが設置されている。コイル導体は真空保持可能なトーラス状のインコネル625製の保護管に収納されており、その保護管の構造は全体で約100対の成形ベローズと厚肉リングを大周方向に交互に接続したものである。

真空容器の厚肉リングには、プラズマ計測、プラズマ第2段加熱、真空排気、プラズマ予備電離、ガス注入等の各種用途のポートが合計約180本取り付けられている。ポートと計測器等との取合い部には、約90台の全金属製ゲートバルブが設置されている。真空リークの可能性のおそれがある溶接箇所およびフランジ締結箇所は約1,500箇所、溶接線の長さは約1.3kmであり、真空に面する表面積は $2,750\text{ m}^2$ 、内容積は 165 m^3 である。

JT-60本体の構造は、トロイダル磁場コイル、ポロイダル磁場コイル、真空排気設備、本体支持構造物、付属設備等からなる。本体全体の大きさは高さ約13m、直径約18m、総重量約5,000tと極めて大型の装置であり、主要機器の大部分を現地で組み立てた。そのため真空容器の組立て期間には、他機器のトレーラによる搬入や組立て溶接作業などが行われ塵埃密度も 10^7 個/ m^3 を超えた。このように、超高真空を要求する核融合装置用真空容器を組み立てるには厳しい条件である。Table 1に示した真空性能は保証値であり、実際には真空リークは検出感度以下、放出ガス速度および到達圧力は保証値の1桁以下を目標として製作および組立てを進めた。そのため超高真空技術の適用など十分な対策が必要と考えられた。

今回、JT-60の真空性能仕様を満足させるため、原研独自の真空管理により実施された真空容器の内表面からの放出ガス低減化のための清浄化処理および溶接部やフランジ接続部からの真空リーク防止対策の結果、極めて満足のいく真空特性を得ることができた。

第Ⅱ章には、真空容器の組立て中および組立て後の真空リーク試験を、第Ⅲ章にはベーキングを含む真空容器の清浄化処理を、第Ⅳ章にはその結果得られた真空特性について述べる。

Ⅱ. 真空容器の真空リーク試験

真空容器の真空境界を形成するポート等の多くの部品は、ポート等の接続フランジを除いてすべて真空容器本体と溶接で接続されている。これらの溶接作業の大部分は、本体の構造および工程上の理由から、他の大型構成機器の組立てと並行して行う必要がある。そのため、仮に溶接部から真空リークを生じた場合、装置を分解してその溶接作業工程を逆に戻す必要がある。しかし、分解の作業性や工程を考慮すると対応上困難な問題が多く、組立て後に真空リークが発見された場合、真空リーク箇所の修復が実質的に不可能となる。したがって、部品製作および組立て工程の所要所での真空チェックが重要な工程となる。

このため、真空容器の現地組立てに先立って製作工場で真空容器本体を 180° に2分割した状態での真空容器本体および全真空部品の真空リーク試験を、ベーキングの前後に実施した。この際、ポートなどには仮閉止板を溶接により取り付けを行なった。

現地組立て作業においては、真空容器本体と真空部品との現地接続溶接作業の都度、その部品の真空リーク試験を実施して次の作業工程に進んだ。これらの組立て作業工程と真空リーク試験との関係をFig. 2に示す。この時の試験方法は、被試験部に局所的に真空排気可能なチャンバを形成してHeリークディテクタを接続し、かつ被試験部の真空雰囲気の反対側にはフードを設けてHeガスを注入して試験を実施した(局所排気系真空リーク試験と称す)。ただし、被試験部にチャンバの取付けが不可能で、かつ組立て完了後の修復が可能な部分については、真空容器の組立てが完了した段階で真空容器全体を真空排気して真空リーク試験を実施した(全体排気系真空リーク試験と称す)。このように、真空容器の真空リーク試験は局所排気系および全体排気系の2つに分けて実施した。

局所排気系真空リーク試験(Fig. 3参照)の被試験部の真空チャンバには、排気速度が $0.2\text{ m}^3/\text{s}$ のターボ分

Fig. 2 Schemes of vacuum vessel assembly and vacuum leak test procedure

子ポンプの下流にソーブションポンプを介して直接 He リークディテクタを接続した。ターボ分子ポンプは真空リーク検知の時定数を減らすために、またソーブションポンプはリークディテクタ検出部の圧力を下げて真空リーク検知の感度を上げるために取り付けられた。

Fig. 3 Schematic configuration of vacuum pumping system for local leak test

Fig. 4 Schematic configuration of forth of vacuum pumping system for leak test of overall vacuum vessel

He リークディテクタとターボ分子ポンプの間の容積は約0.01 m³, He リークディテクタの排気速度は 1×10^{-3} m³/s であり, 検査対象部のチャンバの容積が一般に0.5 m³ 前後のため, 真空リーク検知の時定数は約12 s になる。試験時間はこれに比べて充分長い10min 間とした。また, 真空リーク試験時の検出感度は 6.65×10^{-11} Pa·m³/s であった。

全体排気系真空リーク試験の場合, 真空容器内部の

真空排気は実機真空排気設備4系統のうちの1系統を使用して行なった(Fig. 4 参照)。なお, 真空容器真空排気設備の排気速度は Table 2 に示す通りである。

1 系統に He リークディテクタを接続した場合の真空リーク検知の時定数は約57 s であるため, 試験時間は10min 間とした。このときの検出感度は $\sim 1 \times 10^{-10}$ Pa·m³/s であった。

Table 2 Total pumping speed of each pumping system

System	Pumping speed	Pressure range
Main pumping system	13.6 m ³ /s (N ₂) 29.0 m ³ /s (H ₂)	<1.33 Pa
Rough pumping system	0.12~1.4 m ³ /s	10~1.33 Pa
Maintenance pumping system	5.3 m ³ /s (N ₂) 10.0 m ³ /s (H ₂)	<1.33×10 Pa

また, 磁気リミタコイル保護管の接続部の真空リーク試験については, 保護管の内部は断熱材等が充填され, かつ閉ループ構造のため被試験部に He ガスが注入されにくい。真空リーク量を算出するためには, 予め試験時の被試験部近傍の He 濃度を 知る 必要 がある。そのため, 真空リーク試験に先立って保護管溶接前に180°に2分割部を仮接続した状態で He 濃度の測定を行なった。その結果, 3本の磁気リミタコイルとも He ガス圧力0.1 MPa, 流量0.23 m³/s, 注入時間3 h の条件で60%以上の濃度であることを確認した(Fig. 5 参照)。真空リーク試験は, この濃度確認試験と全く同じ条件で保護管に He ガスを注入した。

(Condition)

Connect coil reassembling parts with vinyl pipe
Injection He pressure: 0.1 MPa
He flow rate: 0.23 m³/min

Fig. 5 Relation of concentration and time of He gas injected into magnetic limiter coil cans

真空容器全体の真空リークに対する合否判定は, 全真空リーク試験被対象個所の真空リーク量(実際は真空リークがないことを確認しながら据え付けるので, いずれも試験時の検出感度をもって真空リーク量とみ

なす)をすべて積算し, その値が仕様値を満足するか否かによった(積算法と称す)。

積算法によった理由は, JT-60 本体があまりにも大きく複雑で, 装置全体を覆うことが困難なためである。この方法は単品および現地接続部について残らず真空リーク試験を実施しながら組立てを行うので, 装置組立て完了時に修復不可能な真空リークを生じる可能性は極めて小さく, 健全な装置を製作する上で非常に信頼性が高い。

現地局所排気系, 現地全体排気系および工場単品の真空リーク試験結果(検出感度値の合計)を Table 3 に示す。総積算値は 7.2×10^{-9} Pa·m³/s であり, 仕様値 6.65×10^{-9} Pa·m³/s を充分満足した。

また, 機器単体で真空リーク量が規定されている機器, 例えば可動リミタおよび磁気リミタコイルについても, それぞれの仕様値が 2.67×10^{-9} , 1.33×10^{-9} Pa·m³/s に対し, 両方でリーク量が 1.43×10^{-10} Pa·m³/s の検出感度値以下であり, 充分満足する値が得られた。

Ⅲ. 真空容器内の清浄化処理

大周方向に2分割された真空容器の内部組立て作業はJT-60 本体を構成する他の主要機器と並行して現地において実施された。本来, 真空容器内機器の取付け等の作業は, 塵埃侵入防止を確実にこなって真空容器内部を清浄な状態に組み立てるために, 180°に2分割された真空容器を1つの容器に接続した状態で行うことが望ましい。しかし, JT-60 本体の組立て方法と工程短縮の都合上, 真空容器の2個所の現地接続部のうちの1個所が開いた状態で真空容器内機器の組立てを実施した。

Table 3 Vacuum leak rate(detectable leak rate)

Parts	Numbers	Leak rate (Pa・m ³ /s)
(1) At factory		
180° sectorial vacuum vessel A	1	6.9×10^{-11}
180° sectorial vacuum vessel B	1	1.6×10^{-10}
Ports	~200	2.0×10^{-9}
Movable limiter etc.	20	3.3×10^{-10}
Total	~220	2.7×10^{-9}
(2) In local tests on site		
Welded connection of ports	148	2.9×10^{-9}
Others	4	2.0×10^{-10}
Total	152	3.1×10^{-9}
(3) In overall tests on site		
Gate valves	93	4.4×10^{-10}
Magnetic limiter coils	3	9.4×10^{-11}
Cooling ducts of fixed limiter and magnetic limiter plate	104	1.1×10^{-10}
Flanges	34	1.9×10^{-10}
Others	95	5.3×10^{-10}
Total	329	1.4×10^{-9}
Sum total	~700	7.2×10^{-9}

以上の環境下における真空容器組立て時の清浄化処理の問題点をまとめると次の通りである。

- (1) 現地で組立てを実施しなければならない部品、機器が非常に多いので、工場で清浄化処理してもまた汚れてしまう可能性が多い。
- (2) 他の大型機器と並行して組立てを実施しなければならないので、時期によっては防塵のための真空容器内の養生方法に制限がある。
- (3) 真空容器内部を汚す大きな原因となる溶接作業(ポロイダル磁場コイルおよび真空容器の接続、ポートの取付け、プラズマの位置制御用電磁気計測検出器の取付けなど)等種々の作業を真空容器の内部でも行う必要がある。
- (4) JT-60 本体の組立て室に大型車両等が頻繁に(1日当たり数10回)出入りするため、本体室外部から内部へ塵埃の流入が著しく、防塵管理を厳重にしないと真空容器内が汚れ易い。
- (5) 現地据付け期間が19ヵ月のため、真空容器内に塵埃が侵入する機会が多い。

以上、質の良い清浄な真空を要求する核融合装置の真空容器を組み立てる環境としては、塵埃密度も 10^7 個/m³ を超えるなど非常に条件が悪い。

このような環境下における内部機器の組立ておよび清浄化処理手順を以下に述べる。

- (1) 溶接、グラインダ加工、治工具類の撤去作業等、真空容器を汚し易い作業の実施
 - (2) 1回目の真空容器内の洗浄
 - (3) 第1壁以外の機械的に取り付ける機器類の取付け作業
 - (4) 2回目の真空容器内の洗浄
 - (5) 第1壁の取付け作業
 - (6) 上側ポートの全金属製ゲートバルブの取付け
 - (7) 真空容器接続部残り1個所の溶接(洗浄済み部分と隔離して実施)
 - (8) 最終の真空容器内の洗浄
 - (9) 下側ポートの全金属製ゲートバルブの取付け
- 以上の真空容器内洗浄、組立て作業後、前項の全体排気系リーク試験のための真空排気およびベーキングを行なった。

各工程の清浄化処理後、目視による検査のほか、アセトンに浸潤させた拭取り洗浄専用の特殊ガーゼで真空容器内部をくまなく拭き、ガーゼの汚れが認められないことを判定条件とした検査を実施した。

真空容器内の清浄化処理としては、真空掃除機による清掃、圧縮空気の吹付け、温水の吹付け洗浄、フロン吹付け洗浄、フロンまたはアセトンの拭取り洗浄など一連の作業を行なった。なお、清浄化処理後の最終的な真空容器内部の状態を **Photo. 1** に示す。

Photo. 1 Internal vacuum vessel after surface cleaning

真空容器内への塵埃侵入防止は、ポートのフランジおよびゲートバルブの弁座の気密保持部の材質はすべて金属であり、組立て中気密保持部に塵埃が付着するとそこから真空リークを生じる可能性がある。防止策として、以下の5つの対策を講じた。

- (1) 真空容器内への空気の供給は、上側ポートから清浄空気供給装置($0.3 \mu\text{m}$ の塵埃を99.9%以上除去可能)を使用して行なった。その際、バ

ーティクルカウンタにより真空容器内の塵埃密度の測定を定期的に行い、供給空気の塵埃密度が 2.7×10^5 個/ m^3 以下になるように清浄度の管理を行なった。同時に清浄な空気を真空容器内に供給することにより、その内部を陽圧にしてマンホール等の開口部からの塵埃侵入を防止するとともに作業者の酸素欠乏を防止した。

- (2) 組立て室および全金属製ゲートバルブ取付け時に、塵埃侵入防止用クリーンルームを仮設して、内部の塵埃密度の測定を行い清浄度の管理に努めた。その結果をTable 4に示す。
- (3) 本体組立て室や真空容器内の日常的な掃除、機器、資材等の搬入用大型車両等が本体組立て室へ入る際の洗車を実施し、本体室の空気の汚

Table 4 Measured dust particles at inside of vacuum vessel and torus hall
(unit: particles/ m^3)

Measuring place	Measuring point	Measured average volume
Cat walk	①	3.66×10^7
	②	2.29×10^7
	③	1.31×10^7
Assembling room	④	4.44×10^7
	⑤	2.75×10^7
	⑥	2.09×10^7
	⑦	5.05×10^7
Machine room	⑧	8.50×10^8
	⑨	5.96×10^8
	⑩	1.12×10^7
	⑪	1.60×10^7
Vacuum vessel	⑫	1.25×10^5
	⑬	1.16×10^5
	⑭	4.49×10^4
Inside cleaned room†(closed entrance)		4.70×10^4
" (slightly open entrance)		1.59×10^5
Outside cleaner room		1.11×10^7

† Using mount gate valve with vacuum vessel

れを極力防止して、間接的に真空容器内の塵埃侵入の防止に努めた。

- (4) 作業者の防塵服や靴底のクリーニング、ポート開口部等の目張りなどを実施し、塵埃が真空容器に侵入することを極力防止した。
- (5) 真空容器内への出入口にビニール製のクリーンルームを直列に2部屋設け、塵埃の直接侵入の低減を図った。クリーンルーム入口部の最初の部屋は、真空容器内への持込み品の一持保管場所や作業服の脱衣場とし、2番目の真空容器入口部の部屋は防塵服の着衣や持込み品の洗浄場所として使用し、真空容器内に近い部屋ほど内部をより清浄に維持するようにした。

IV. 真空特性

1. 放出ガス速度

真空容器は放出ガス低減のため、装置完成までにベーキングを3回実施した。第1回ベーキング時の真空容器内の圧力変化をFig. 6に示す。ベーキング温度が 100°C を超えると、水の蒸発による急激な圧力上昇が見られる。以後も温度上昇過程において、放出ガス量の増加に伴う圧力上昇が見られる。ベーキング前後の単位面積当りの放出ガス量をTable 5に示す。

Fig. 6 Vacuum pressure and temperature of vacuum vessel during bake-out

測定方法は、Fig. 4に示した真空排気設備4系統の主排気系統上流の全金属製ゲートバルブを同時に閉状態にし、単位時間当りの放出ガスによる圧力上昇値を測定したものである(いわゆるビルドアップ法)。

放出ガス速度の計算は次式によった。

$$q = \frac{Q}{A} \Delta T = V \frac{\Delta P}{A} \Delta T$$

ここで、 q : 単位面積当りの放出ガス速度 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^2 / \text{m}^2 \cdot \text{s}$)

Q : 全放出ガス量 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$)

Table 5 Outgassing rate and vacuum pressure before and after bake-out

No.	Period	Date	Vacuum pressure (Pa)	q ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$)
1st baking				
1	Before baking	20 Sep.1985	2.2×10^{-4}	1.9×10^{-8}
2	After baking	26 Sep. "	6.2×10^{-6}	2.1×10^{-8}
3	After repairing leakage	30 Sep. "	2.2×10^{-5}	6.9×10^{-9}
2nd baking				
4	Before baking	19 Nov.1985	1.5×10^{-5}	7.1×10^{-9}
5	After baking	26 Nov. "	8.5×10^{-6}	2.4×10^{-9}
6	During coil power test	21 Dec. "	1.3×10^{-6}	8.5×10^{-10}
3rd baking				
7	Before high temp. coil power test	13 Feb.1986	5.9×10^{-6}	5.3×10^{-9}
8	After high temp. coil power test	25 Feb. "	9.7×10^{-7}	1.5×10^{-9}
9	"	27 Feb. "	8.3×10^{-7}	7.6×10^{-10}
10	"	28 Feb. "	7.4×10^{-7}	6.8×10^{-10}

V: 真空容器と真空排気設備マニホールドの容積 (165 m^3)

A: 真空容器と真空排気設備マニホールドの表面積(真空容器内部取付け部品の表面積を含む)(2,750 m^2)

ΔP : 圧力上昇値 (Pa)

ΔT : 測定時間 (s)

現地における第1回ベーキング前の放出ガス量は $1.9\times 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ である。なお、工場における真空容器ベーキング前の測定値は $5.85\times 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ であった。現地と工場においては履歴が異なるためこの値を単純比較することはできないが、現地においては工場試験時に比較して第1壁等、数多くの機器が真空容器内に取り付けられ、その表面積が5倍以上になったことを考えると、洗浄作業が困難になったにもかかわらず現地においても良好な清浄化が行われたと考えられる。

Table 5のNo.1,2に示すように、ベーキング後の値が、その前に比べて高いのはベーキング後に付属機器に真空リークを生じ、それが圧力上昇に寄与しているためである。真空リーク部を差動排気し真空容器内に大気が入らないようにした結果、Table 5のNo.3に示すように低い値を得ている。

第1回ベーキング前後の分圧変化をFig.7に示す。質量数 $M/e=18(\text{H}_2\text{O})$, $44(\text{CO}_2)$ は効果的に減少しているが、 $M/e=28(\text{N}_2, \text{CO}, \text{C}_2\text{H}_4)$ が増加しているのは上述の真空リークのためである。また、第2回ベーキング前後の放出ガス速度をTable 5のNo.4,5に示し、そのときの分圧変化をFig.8に示す。図からわかるように、ベーキング後 $M/e=18, 44$ が減少し、

Fig. 7 Residual gases measured by residual gas analyzer (R.G.A.) before and after first bake-out

$M/e=2(\text{H}_2)$ が支配的になっている。 $M/e=28$ は途中上昇しているが、これはフランジ締結部に生じた真空リークによるものである。放出ガス速度の値は、第1回ベーキング後(Table 5のNo.3)以降は、仕様値 $1.33\times 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ を満足している。

コイル通電試験や高温通電試験を経て、真空容器の真空排気開始約50日後に測定した値は、仕様値より1桁以上低い値 $6.8\times 10^{-10} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ (Table 5, No.10 参照)を得た。この時の残留ガス分析結果をFig.9に示す。 $M/e=18, 44$ が他の質量数に比較して多いが、この理由は真空リーク箇所補修のため、一たん真空容器内を大気開放したが、その後の第3回ベーキングを高温コイル通電試験を兼ねて 150°C で実施したので、局所的に 100°C より低い部分が存在し、そこに H_2O , CO_2 などが吸着されたためと思われる。しかし、放出ガス速度の値としては極めてよい値を得ることができ、これは清浄化作業の管理が十分であったことを示している。

Fig. 8 Residual gases measured by R.G.A. and baking temperature during coil performance tests

2. 到達圧力

第2回ベーキングを実施した直後の時点においても、到達圧力は仕様値を満足しなかった (Table 5, No. 5 参照)。原因はベーキングの実施により、ポート先端の締結フランジ等に真空リークを生じたためである。しかし、その後真空リーク箇所を完全に修復した段階においては仕様値を満足した。装置完成時に測定された最終的な到達圧力の値は 7.4×10^{-7} Pa (Table 5, No. 10 参照) であり、仕様値を十分満足した。

V. 結 言

以上の内容をまとめると次の通りである。

- (1) 真空リーク試験の結果、容器全体の最終的真空リーク量(積算値)は 7.2×10^{-9} Pa $\cdot$ m³/s で、仕様値 (6.65×10^{-9} Pa $\cdot$ m³/s) を約1桁下回った。
- (2) 真空容器の清浄化処理の結果、最終的放出ガス速度は 6.8×10^{-10} Pa $\cdot$ m³/s $\cdot$ m² で、大型機器にもかかわらず実験室規模の値が得られた。
- (3) 到達圧力は最終的に 7.4×10^{-7} Pa の値が得られ、仕様値 1.33×10^{-6} Pa を満足した。

Fig. 9 Residual gas spectrum by R.G.A. at final stage of commissioning

- (4) 全金属製ゲートバルブおよびフランジは塵埃の噛込みによる真空リークはなく、塵埃密度の管理値 2.7×10^6 個/m³ は適切な値であったと考えられる。
- (5) 現地組立て完了後の真空容器内の残留ガス分析結果では、ベーキング前後ともに炭化水素系が比較的少なかった。完成後に引き続いて行なったプラズマジュール実験で短期間に再現性の良いプラズマが得られたことは、上述の良好な真空特性が寄与していると考えられる。

以上のことから、JT-60の真空容器は大型で複雑な構造、かつ現地組立て部分が多いにもかかわらず、良い真空性能が得られたのは適切な真空リーク管理と清浄化処理がなされた結果であり、その真空リーク管理および清浄化処理方法が適切であったと考えられる。

真空容器の真空特性に関する作業および試験を遂行するに当たり、日本原子力研究所 森 茂副理事長、磯 康彦理事、苫米地 顕那珂研究所長、吉川允二 臨界プラズマ研究部長、飯島 勉 JT-60 試験部長からは終始激励を頂いた。本成果はJT-60第2試験室および製作受注メーカーの榎日立製作所の製作担当者のご尽力に負うところが大きい。以上の方々に深く感謝します。

—参考文献—

- (1) 磯 康彦, 吉川允二: 原子力誌, 24[4], 274 (1982).
- (2) 森 茂: 同上, 27[5], 386 (1985).
- (3) Invited Paper for 12th European Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics (Budapest), JT-60 Team presented by M. Yoshikawa.
- (4) 横倉賢治: 真空, 26[4], 300 (1983).