

JT-60SA 統合コミッショニングにおける真空容器内のガス分析

○大和田篤志[#]、神永敦嗣、飯島貴朗、笹島唯之、芝間祐介、柳生純一、松永剛
量子科学技術研究開発機構 量子エネルギー部門 那珂研究所

概要

超伝導トカマク装置 JT-60SA は、2023 年 5 月末から統合コミッショニングを再開し、12 月に完了した。この一連の運転における大きな目的の一つである、初プラズマを生成するには、真空容器内壁を洗浄し、清浄な真空（目標： 2×10^{-5} Pa）を得る必要がある。そこで、真空容器二重壁間に高温の窒素ガスを循環させることで内壁を約 200°C に昇温して水分を始めとする内壁からのガス放出を促進する 200°C ベーキング、真空容器内壁をカソードとしてグロー放電を起こすことで内壁の不純物を叩き出す水素グロー放電洗浄（H₂-GDC）によって不純物の低減を図った。これらの処理による真空容器内のガス種の変化を調べるため、真空容器内の残留ガス及び真空容器からの排ガスを、四極子形質量分析計（QMS）を用いて分析したので報告する。

1. JT-60SA 統合コミッショニングとは

JT-60SA の統合コミッショニングとは、真空排気、漏れ試験、超伝導コイルの冷却及び通電試験並びにプラズマの生成及び制御といった JT-60SA 全体の動作を確認するための一連の運転のことである。

図 1 に、その運転の流れの概略を示す。

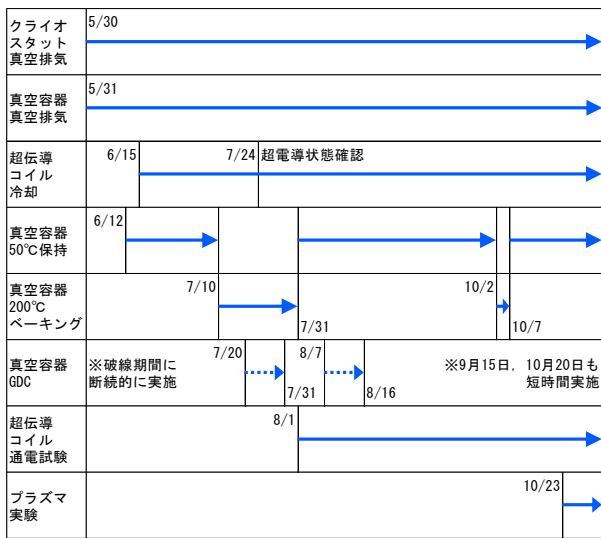


図 1. 統合コミッショニングの流れの概略

2023 年 5 月末、JT-60SA の改修が完了し、超伝導コイルの真空断熱容器（クライオスタット）の真空排気を開始したことで、統合コミッショニングが再開された。その後、真空容器の真空排気及び 50°C 保持、超伝導コイルの冷却及び通電試験、真空容器の 200°C ベーキング及び H₂-GDC 並びにプラズマ実験と、各試験を順次実施し、12 月に運転を完了した。

本報告では、真空容器の真空排気開始後、上記の各試験の進展、特に 200°C ベーキング及び H₂-GDC による真空容器内のガスの変化について述べる。

2. 統合コミッショニングにおける真空容器の内壁

日欧の共同事業である JT-60SA 計画は、その研究計画の検討・策定も日欧の研究者により進められた。そして、2018 年 9 月、日欧 435 名の共著者による文書『JT-60SA リサーチプラン Ver.4.0』として研究計画は確定した。このリサーチプランは、JT-60SA の実験・研究をいくつかの研究段階に分け、その進展に合わせて JT-60SA を段階的に増強することとしている。

統合コミッショニングは、その最初の研究段階に属し、設置されているプラズマ対向機器は、SUS316L 製リミター並びに上側及び内側の炭素製第一壁のみとなっている。そのため、下側及び外側は、SUS316L 製の真空容器内壁が直接プラズマに対向し、割合としてプラズマ対向面の約 2/3 が金属壁となる。

金属壁の表面には一般に酸化層が存在するため、プラズマ中の不純物の O₂ の発生源となりうる。

そのため、この酸素や付着した炭素-酸素化合物を H₂O や CO₂ の形で排気するため、後述する GDC の放電ガスとして H₂ を使用した（H₂-GDC）。

なお、残る外側第一壁及び下側ダイバータは次回運転開始までに設置する計画となっている。

3. 真空排気設備 真空容器主排気系

図 2 に、JT-60SA 真空排気設備の真空容器主排気系の概略図を示す。

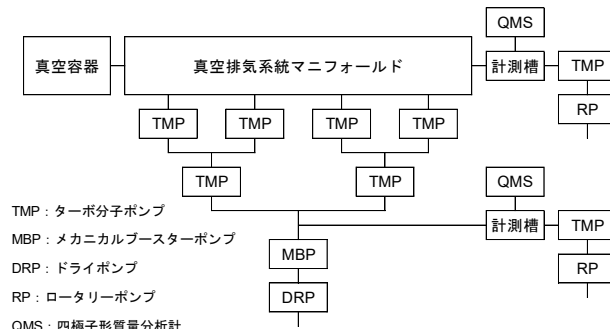


図 2. JT-60SA 真空容器主排気系の概略図

まず、真空容器に真空排気システムマニフォールドが接続されており、このマニフォールドに、主ポンプとして4台のターボ分子ポンプ（排気速度：3.3 m³/s）、第1段フォアポンプとして2台のターボ分子ポンプ（排気速度：0.74 m³/s）、第2段フォアポンプとしてメカニカルブースタポンプ（排気速度：0.14 m³/s）及びドライ真空ポンプ（排気速度：0.03 m³/s）を用いて真空排気を行っている。そして、この真空排気システムマニフォールドからターボ分子ポンプ（排気速度：0.19 m³/s）及び油回転ポンプ（排気速度：0.05 m³/s）からなる差動排気系によりガスを引き込み、QMSによる測定を行っている（残留ガス分析）。また、メカニカルブースタポンプの上段からも、残留ガス分析と同様にガスを引き込み、QMSによる測定を行っている（排ガス分析）。

なお、以降の結果では、明記しない限り残留ガス分析の結果を示す。

また、上述の真空排気マニフォールドは2系統が真空容器に接続されているほか、主排気系とは別に粗びき系も存在しているが、本報告では省略する。

4. 壁洗浄：200°Cベーキング・H₂-GDC

JT-60SA 統合コミッションングの大きな目的の1つであった初プラズマの生成には、真空容器内壁を洗浄し、清浄な真空（目標：2 x 10⁻⁵ Pa）を得る必要があった。そこで、この壁洗浄、すなわち内壁からのガス放出低減処理として、主に下記2種類の処理を実施した。

4.1 200°Cベーキング

200°Cベーキングは、真空容器二重壁の間に高温のN₂ガスを循環させ、内壁を約200°Cに昇温することでガス放出を促進し、ベーキング後のガス放出を低減させる処理であり、主な標的はH₂Oである。

2023年7月13日から31日までの約17日間及び10月5日から7日までの約2日間の2回の期間に実施した。なお、1回目の期間中においては、後述するH₂-GDCも実施している。

4.2 GDC

4.2.1 H₂-GDC

図3に、真空容器及びグロー電極の概略図を示す。

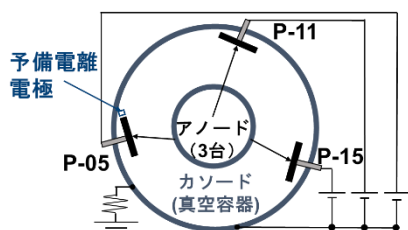


図3. 真空容器及びグロー電極の水平断面概略図

H₂-GDCは、H₂を放電ガスとして、P-05、P-11及びP-15に設置したグロー電極をアノードとし、真空容器内壁をカソードとしてグロー放電を起こすことで、陰極降下で加速されたH₂⁺によるスパッタリング現象によって内壁表面の不純物を叩き出す処理であり、

主な標的はO₂及び炭素-酸素化合物である。

3台のグロー電極それぞれが最大3Aの電流でグロー放電し、合計最大9Aの放電電流を得た。

放電ガスの圧力は0.01~1.0 Paで、合計放電時間は200°Cベーキング中の実施で約96時間である。

200°Cベーキング実施中の、2023年7月20日から着火調整を行い、調整後、夜間等で断続的に実施した。

トカマクプラズマと同様、グロー放電のプラズマも、一定以上の清浄な真空が必要なため、200°Cベーキングの後半から着火調整を開始した。なお、このGDC開始に際しては、以前の装置、JT-60UにおけるGDC開始の基準及び着火実績から、全圧3.7 x 10⁻⁵ Pa及びm/z = 18分圧1.6 x 10⁻⁵ Paを一つの基準とした。

また、7月28日から31日まで及び8月11日から16日までには24時間以上の連続放電を実施した。

なお、50°C保持中のH₂-GDCではイオン電流値の有意な低減は認められなかったため、本報告では省略する。これは、200°Cベーキング中の実施によって既に、GDCの効果が及ぶ範囲のm/z = 32は枯れた状態になっていた可能性等が考えられる。

4.2.2 He-GDC

長時間のH₂-GDCにより大きく増加したH₂のガス放出を低減するために、Heを放電ガスとしたGDC（He-GDC）も実施した。

ただし、Heが金属材料中に侵入することによる悪影響等も考慮し、短時間のみの実施とした。

2023年8月7日及び10月20日に合計22分間実施し、放電中に水素の排出が増加することは確認したが、実施前後における放出ガス率の有意な低減は認められなかったため、本報告では省略する。

5. 結果

5.1 真空容器内ガスの経時及び壁洗浄による変化

図4に、真空容器の50°C保持開始後からプラズマ実験開始までの真空容器の全圧及びQMS測定の主要なイオン電流値の経時変化を示す。

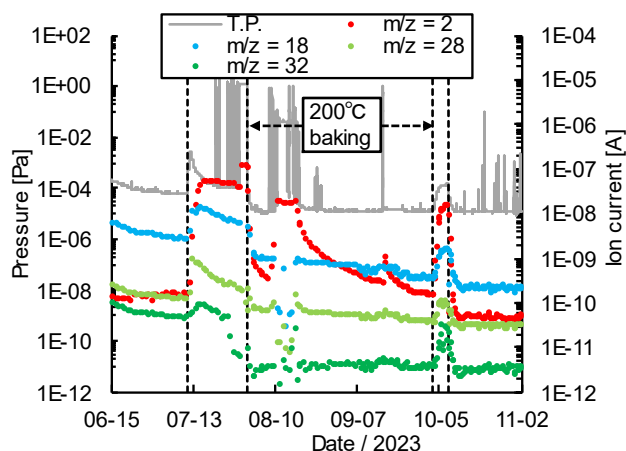


図4. 全圧及び主要なイオン電流値の経時変化

m/z = 2はH₂、m/z = 18はH₂O、m/z = 28はN₂及びCO、m/z = 32はO₂の主ピーク位置であり、図4の各

イオン電流値はこれらの気体の経時変化をそれぞれ表しており、200°Cベーキング中に全圧及び各イオン電流値の大きな上昇、すなわちガス放出が促進されていることが確認できる。

ここで、図5に、200°Cベーキング開始時における排ガス分析の結果を示す。

図4に示した残留ガス分析の結果と同様に、全圧並びに $m/z = 2$ 及び 18 のイオン電流値が大きく上昇していることが確認でき、従って、200°Cベーキングによって促進された H_2 や H_2O のガス放出は、前述の排気システムにより排気されていることが確認できた。

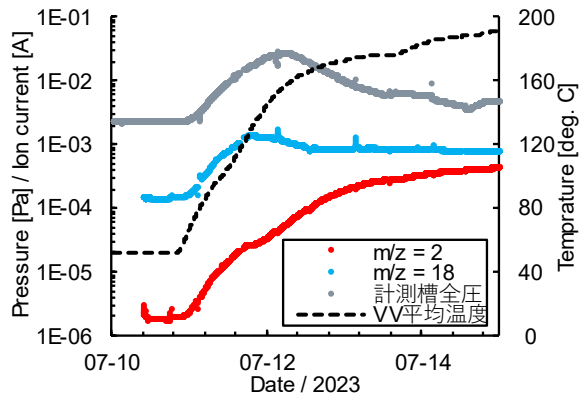


図5. 200°Cベーキング開始時の排ガス分析結果

また、表1に2回のベーキングそれぞれの前後における各イオン電流値の変化を示す。

表1. ベーキング前後における各イオン電流値変化

| | 1回目ベーキング前後での変化 | 2回目ベーキング前後での変化 |
|------------|--------------------|----------------|
| $m/z = 2$ | 約 2.3 倍 (GDC 影響) | 約 4 分の 1 |
| $m/z = 18$ | 約 3 分の 1 | 約 2 分の 1 |
| $m/z = 28$ | 約 2 分の 1 | 約 10 分の 7 |
| $m/z = 32$ | 約 12 分の 1 (GDC 影響) | 約 2 分の 1 |

2回の200°Cベーキングとともに、 H_2O 、 O_2 及び N_2 等のガス放出が低減されたことを確認した。ただし、 H_2 については1回目の200°Cベーキングでは H_2 -GDCを実施した影響でベーキング前の約2.3倍に増加した。一方、 O_2 は H_2 -GDCの主な標的であるため、実施によって値が大きく減少した。

長時間の排気及び壁洗浄全体の前後の比較として、図6に、1回目の200°Cベーキング開始前(7月10日)及び2回の200°Cベーキング及び全てのGDC終了後

(11月1日)の質量スペクトルを並べて示す。

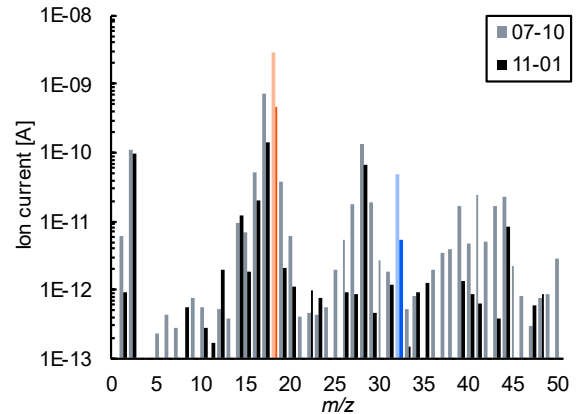


図6. 長時間の排気壁洗浄前後の質量スペクトル

H_2O を示す $m/z = 18$ を赤色で、 O_2 を示す $m/z = 32$ を青色で示した。

この7月10日から11月1日までの期間で、全圧は 6.10×10^{-5} Pa から 1.20×10^{-5} Pa (約5分の1) まで減少し、目標である 2×10^{-5} Pa を達成した。

$m/z = 18, 32$ をはじめとする多くのピークが減少し、炭素-酸素化合物を示す、 $m/z = 25$ 以上の位置に林立するピーク群も大きく減少し、ベースライン付近まで減少したのも少なくない。

従って、200°Cベーキング及び H_2 -GDC によって H_2O 、 O_2 及び炭素-酸素化合物等、多くの不純物を低減することができたと考える。

6. まとめ

JT-60SAの統合コミッショニングを2023年5月末から再開した。10月23日に初プラズマ(約130kA)の生成に成功し、12月に運転を完了した。

初プラズマ生成に必要な、清浄な真空(目標： 2×10^{-5} Pa)を得るため、200°Cベーキング及び H_2 -GDCを、主な壁洗浄として実施した。

その結果、 H_2O 、 O_2 及び炭素-酸素化合物等、多くの不純物を低減することができ、目標を達成する、 1.20×10^{-5} Paの全圧を得られた。

今後は、重水素運転に向け、 $m/z = 1-6$ の高分解能分析の導入やパターン係数及び感度係数の定期的な較正が可能な環境の整備をしたい。