

J-PARC リニアックにおける ACS 空洞の運転状況 OPERATING STATUS OF THE ACS IN THE J-PARC LINAC

根本康雄^{*A)}、田村潤^{A)}、伊藤崇^{A)}、森下卓俊^{A)}、平野耕一郎^{A)}、近藤恭弘^{A)}、小栗英知^{A)}
杉村高志^{B)}、南茂今朝雄^{B)}、青寛幸^{C)}

Yasuo Nemoto^{*A)}, Jun Tamura^{A)}, Takashi Ito^{A)}, Takatoshi Morishita^{A)}, Koichiro Hirano^{A)}, Yasuhiro Kondo^{A)}
Hidedomo Oguri^{A)}, Takashi Sugimura^{B)}, Kesao Nanmo^{B)}, Hiroyuki Ao^{C)}

^{A)}J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency

^{B)}J-PARC Center, High Energy Accelerator Research Organization

^{C)}Facility for Rare Isotope Beams, Michigan State University

Abstract

In the J-PARC linac, one and a half years have past since the 400 MeV beam operation using ACS (Annular-ring Coupled Structure) started. In this period, the aluminum chain clamps used in the ACS beam line have suddenly broken, and it caused the beam operation to shut down. To prevent the same problem from occurring, we replaced all the aluminum chain clamps in the ACS beam line with stainless steel clamps. After the clamp replacement, no vacuum trouble has happened. Through the long-term conditioning period of the beam operation, the vacuum pressure and the RF trip rate have been reduced, and all the ACSs are stably running. In the ACS section, the residual radiation in the beam line between each ACS cavity is considerably high. This situation is caused by the CT monitors that have smaller aperture than that of other instruments in the beam line. To reduce the residual radiation, we plan to replace the monitors with new ones that have larger aperture and replace the unused monitors with titanium ducts during this summer shutdown period.

1. はじめに

J-PARC リニアックではそのビームエネルギーを 181MeV から 400MeV まで増強するため、2013 年の夏季メンテナンス期間に、ACS (Annular-ring Coupled Structure) 空洞をリニアック下流部のビーム輸送部に設置した。このエネルギー増強のために設置した ACS 空洞は全部で 25 台であり、うち 2 台がバンチャー空洞、21 台が加速空洞、そして 2 台がデバンチャー空洞である。加速器トンネルへの設置後、これらの空洞に大電力を投入し^[1]、2014 年 1 月、負水素イオンビームの 400MeV 加速に成功した^[2]。そして 1 月末には、後段の 3GeV シンクロトロンへのビーム供給を開始した。エネルギー増強後の J-PARC リニアックの概略を Fig. 1 に示す。

リニアックにおけるビームエネルギー 400MeV 達成後、実験施設のビーム利用運転は 2014 年 2 月に始まり (Run#52)、これまで ACS 空洞は加速器の稼働率に大き

な影響を与えることなく安定に稼働している。現在はこの ACS 空洞間の残留放射線が問題になっており、2015 年の夏季メンテナンス期間を利用して、この残留放射線量を低下させるための対策を行う。本報告では、この残留放射線の問題に対する対策を含め、リニアックエネルギー増強後の ACS 空洞の運転状況について述べる。

2. ACS 空洞

J-PARC リニアックでは、そのビームエネルギー増強に向けて J-PARC 用 ACS の開発と量産を行い^[3,4]、2013 年 3 月までに 25 台すべての ACS 空洞の製作を完了することができた。J-PARC 用 ACS は、2 台の加速タンクと 1 台のブリッジタンクで構成される。加速空洞においては (Fig. 2)、1 つの加速タンクは 17 個の加速セルと 16 個の環状結合セルで構成され、ブリッジタンクは 5 個の励起セル (加速セル) と 4 個の非励起セル (結合セル) で構成される。空洞の加速モード ($\pi/2$ モード) 周波数は、ブリッジタンクの励起セルに設置された可動

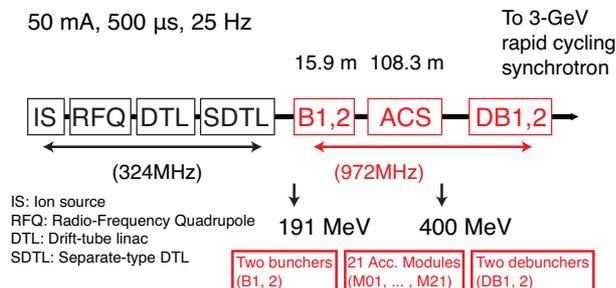


Figure 1: Diagram of the J-PARC linac accelerating structure in the 400-MeV beam operation.

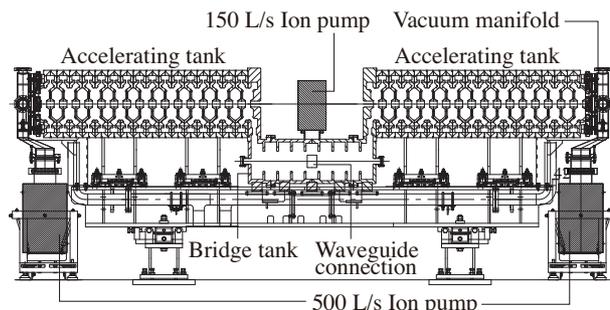


Figure 2: J-PARC ACS accelerating cavity.

* nemotoya@post.j-parc.jp

チューナーを用いて調整する。高周波源からの電力は、ブリッジタンク中央の励起セル側面のアイリスを通して空洞に供給される。また真空排気については、加速タンク端の真空マニホールドに設置された2台のイオンポンプ（排気速度 500L/s）、高周波窓手前の導波管上部に設置された1台のイオンポンプ（排気速度 150L/s）の合計3台を用いて行う。空洞内真空圧力は、ブリッジタンク中央のセルに設置された B-A ゲージ、上流側加速タンク端の真空マニホールドに設置された B-A ゲージの2台の電離真空計で測定している。空洞の運転条件は、繰り返し周波数 25Hz、RF パルス幅 600 μ s、運転周波数 972MHz である。

ACS 空洞を使用したビーム運転を開始してから 2015 年の夏季メンテナンス開始直前まで、ACS 空洞は安定に稼働してきた。Fig. 3 に、Run#63 ビーム運転終了時（2015 年 6 月末、ビーム負荷無し）の空洞ピーク電力と真空度（ブリッジタンク）を示す。21 台の ACS 加速空洞の平均ピーク電力値は 1.18MW である。バンチャー部のピーク電力値が約 200kW、デバンチャー空洞#1 のピーク電力値が約 600kW であり、3GeV シンクロトロン入射時のビームロス低下のビーム運転条件によりデバンチャー空洞#2 は現在使用していない。空洞内真空圧力は残留ガスによるビームロスが 0.1W/m 以下となる 4×10^{-6} Pa より十分低く、平均真空圧力値（ACS 空洞 25 台のブリッジタンク部）は、 2.6×10^{-7} Pa である。上流側加速タンク端の真空マニホールド部の真空圧力値は、ブリッジタンク部の真空圧力値の 1~1/4 程度である。ACS 加速空洞#11 の真空圧力値は 1.5×10^{-6} Pa と他の空洞と比べて高いため、リークチェックを入念に行っているが、今のところリークは見つかっていない。空洞内アウトガスについて他の空洞と違いがないか、夏季メンテナンス期間を利用して残留ガスの質量分析を行うなどの調査を予定している。

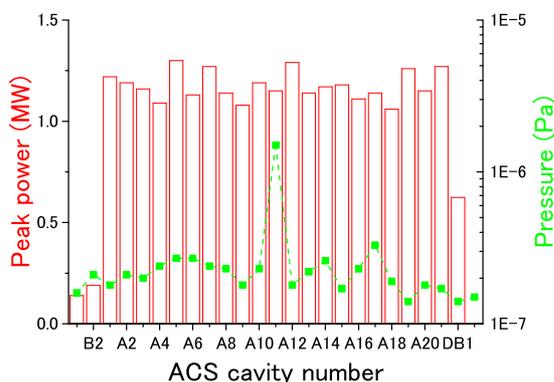


Figure 3: Peak power and vacuum pressure at each ACS cavity.

3. クランプ破損による真空リーク

これまで、ACS 区間においてビームラインの真空締結に使用しているアルミ製チェーンクランプ（NW40）の突発的な破損が断続的に5回発生した。突発的に真空度異常のインターロックが発報したため（ 1×10^{-4} Pa の

B-A ゲージ設定閾値でアラーム）、真空度悪化の原因調査のため He リークディテクタにを用いてリークチェックを行った。これにより明らかなリーク箇所が見つかり、空洞を窒素パージしてリーク箇所を確認したところ、アルミ製チェーンクランプの破損が原因であることがわかった。破損したアルミ製クランプの写真を Fig. 4 に示す。チェーンクランプのネジ留め部分（Fig. 4 の左）に、せん断状の亀裂が生じているのが分かる。このアルミ製チェーンクランプに起こった突発的な破損 5 回について、破損はすべて同じ箇所のせん断状の亀裂であった。真空締結時はトルク管理を行っていたが（4N \cdot m）、この肉厚が薄い部分に局所的にトルクがかかり、強度が足りない事で亀裂ができたと考えられる。

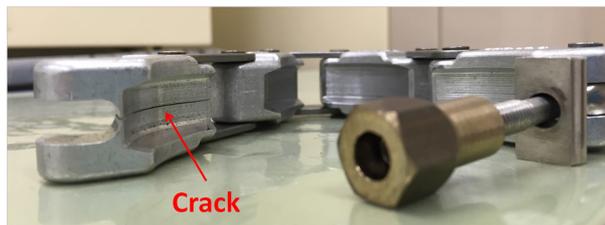


Figure 4: Crack generated in the Clamp.

この突発的なクランプ破損が起こった場合、最初に真空度異常のインターロックが発報してから、原因調査、空洞の窒素パージ、クランプ交換、真空排気の一連の作業を行い、再び RF 印加およびビーム運転再開に必要な真空圧力まで低下するのに数日を要する。この対策の1つとして、真空度悪化を事前に認知することによって（真空圧力値をソフトウェアで監視し、 10^{-6} Pa 程度の閾値で警報）、クランプ交換までにかかる時間を最小化し、ビーム運転停止時間を短縮することを試みた。しかし、クランプが破損したと思われる時間からビーム運転停止の真空圧力値 1×10^{-4} Pa までの圧力上昇の傾向は一樣ではなく、真空度悪化の事前の認知は困難であった。この一例として、2015 年 1 月に ACS 加速空洞#15 で起こった、クランプ破損による圧力上昇を Fig. 5 に示す。1 月 8 日の 12 時から徐々に圧力が上昇し、この真空リークを原因とするイオンポンプ停止が 1 月 11 日の 18 時に発生し、圧力が急激に上昇してビーム運転停止

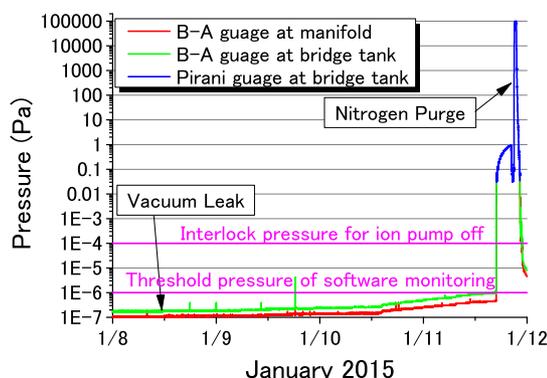


Figure 5: Vacuum leak occurred in ACS#15.

に至っている。つまり、真空度悪化の事前の認知ができなかったのである。

同じアルミ製チェーンクランプは、ACS 区間のビームラインで約 300 箇所で使用していた。この中の 5 箇所は破損により交換を行ったが、残りのクランプもいつ同様の破損が生じてもおかしくない事態であった。そこで、同じトラブルを未然に防ぐため、2015 年初めのビーム運転停止期間を利用して、全てのアルミ製チェーンクランプを他社製のステンレス製チェーンクランプと交換した。取り外した約 300 個のアルミ製クランプを確認したところ、亀裂が発生する箇所について、その肉厚に大きなばらつきがあることがわかった。亀裂はこの肉厚が特に薄いもので発生している傾向があり、取り外したクランプの中には、近いうちに亀裂の発生が予想されるようなものもあった。現在、製作メーカーとともに詳細な原因調査を開始したところである。

2014 年 1 月から現在までのビーム運転中の ACS 空洞の真空度の推移を Fig. 6 に示す。ビーム運転が約 1 年半継続され、長期 RF 印加のコンディショニング効果により、25 台の平均真空圧力値 (Fig. 6 の緑) が 2×10^{-7} Pa 程度まで下がっているのがわかる。

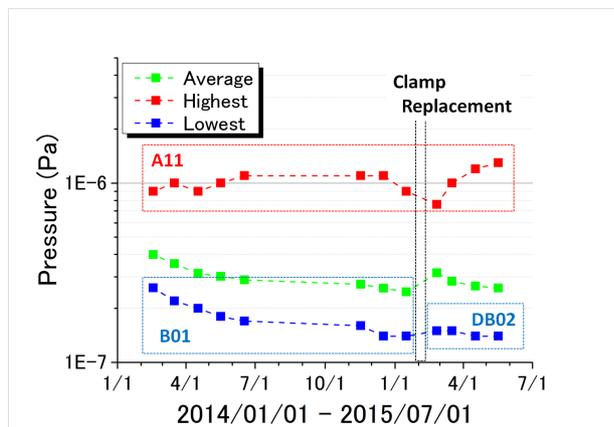


Figure 6: Vacuum pressure of the ACS cavity.

4. 空洞安定度

ACS 空洞の健全な運転状況を確認する手段として、RF トリップ (空洞反射波のインターロック) 回数に注視している。2014 年 2 月の Run#52 から 2015 年 6 月の Run#63 までの、各 ACS 空洞の RF トリップ回数の推移を Fig. 7 に、1 日あたりの RF トリップ回数 (全 ACS 空洞分の合計) の推移を Fig. 8 に示す。約 1 年半の RF コンディショニング効果により、現在 (Run#63) の RF トリップ頻度は利用運転開始時 (Run#52) と比較して約 70% 減少した。現在、ACS 空洞は J-PARC 加速器全体の稼働率に大きな影響を与えることなく安定に稼働していると言える。

5. ACS 区間の残留放射線

現在 ACS 区間では、空洞間ビームラインの残留放射線量が問題となっている。Fig. 9 に、ACS 空洞間ビームラインの残留線量 (測定条件: ビーム運転停止約 4 時間後) を示す。ビームエネルギーの大きい下流側ほど残

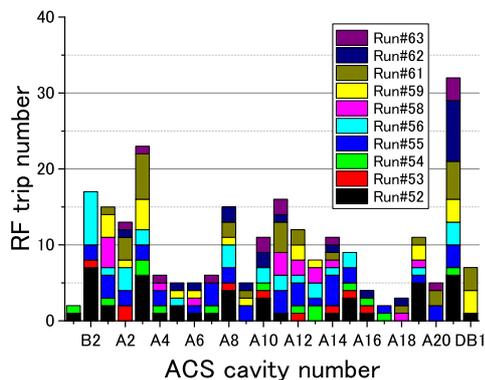


Figure 7: Number of trips from Run#52 to Run#63.

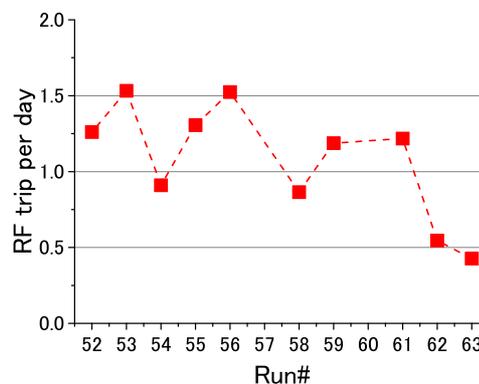


Figure 8: RF trip rate from Run#52 to Run#63.

留線量が高くなり、また、ビーム電流の増加とともに残留線量が高くなっていることがわかる。詳細なサーベイを行った結果、残留線量が高いのは空洞間に設置された CT モニターであることがわかった。

この CT モニターは空洞の出口と入口に 1 台ずつ設置されており、特に出口側で線量が高い。この CT モニター以外の機器は空洞を含め、口径 40mm 以上で設計されているが、この CT モニターの口径が 37.1mm であ

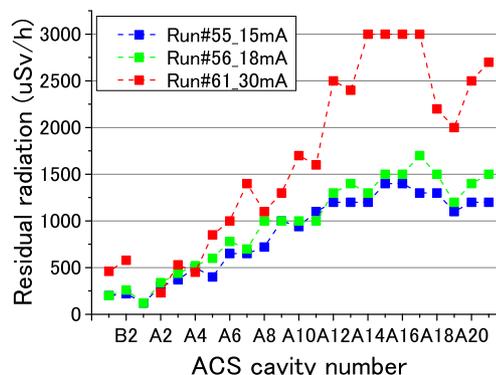


Figure 9: Residual radiation in the ACS section.

PASJ2015 THP054

るため、 H^0 粒子やビームハローがこれに衝突し、局所的な放射化が起こっていると考えられる。今後リニアックのビームパワーが増大するにつれてこの残留線量も高くなることが予想される。そこで2015年の夏季メンテナンス期間に、空洞出口のCTモニターを口径40mmのものに交換し、空洞入口のCTモニターは現在モニターとして使用していないためチタン製のダクトに交換することを計画している。このチタン製ダクトの口径は、残留線量の比較的低い上流部を37.1mmとし、 H^0 粒子を散乱させることで空洞内でのロス低減を図る一方、残留線量が高く問題となる下流部は40mmとする予定である。リニアックのビーム強度増強に伴いACS区間の残留放射線の問題はさらに高くなることが予想されるため、最適なダクト形状、材質について検討を行っていく。

6. まとめ

ACSを使用したビーム運転を開始してからおよそ1年半が経過した。この間、ACS区間のビームラインに使用していたアルミ製チェーンクランプの突発的な破損が発生したが、同様の事態を未然に防ぐため約300個のクランプをステンレス製のものに交換して対策を行った。このクランプ交換後は、現在まで真空トラブルは起こっていない。また、真空圧力、RFトリップ頻度ともに低下傾向にあり、現在ACS空洞は安定に稼働している。今後のビーム強度増強に伴い、残留放射線の問題はより大きくなっていくが、事前に対策を行って放射化をできるだけ低減することで、空洞のメンテナンス性向上を行っていく。

7. 謝辞

ACSビームラインのクランプ交換は、J-PARC加速器の多くの方々のご協力により完了することができました。また、コミッショニンググループ丸田氏によるGeant4シミュレーションの結果を参考に、残留放射線量低減のための対策を立てることができました。感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Ao et al., "High Power Conditioning of Annular-Ring Coupled Structures for the J-PARC Linac", Proceedings of LINAC2014, Geneva, Switzerland, THPP089, p1053.
- [2] K. Hasegawa, "Commissioning of Energy Upgraded Linac of J-PARC", Proceedings of LINAC2014, Geneva, Switzerland, TUIOB03, p417.
- [3] H. Ao and Y. Yamazaki, "First high-power model of the annular-ring coupled structure for use in the Japan Proton Accelerator Research Complex linac", Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 011001 (2012).
- [4] H. Ao et al., "First annular-ring coupled structure cavity for the Japan Proton Accelerator Research Complex linac", Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 051005 (2012).