

J-PARC DTL/SDTL の運転状況 OPERATING STATUS OF THE J-PARC DTL/SDTL

伊藤崇^{#, A)}, 平野耕一郎^{A)}, 小林 史憲^{A)}, 森下 卓俊^{A)}, 新井 宇宙^{A)}, 南茂 今朝雄^{B)},
根本 康雄^{C)}, 小坂 知史^{C)}

Takashi Ito^{#, A)}, Koichiro Hirano^{A)}, Fuminori Kobayashi^{A)}, Takatoshi Morishita^{A)}, Sora Arai^{A)}, Kesao Nanmo^{B)},
Yasuo Nemoto^{C)}, Tomohumi Kosaka^{C)}

^{A)} J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency, ^{B)} KEK, ^{C)} NAT Corporation

Abstract

The DTL and SDTL, which are the main accelerators of the J-PARC linac, have been in operation for about 17 years since October 2006, and are still operating stably and accelerating beams smoothly in 2023. This report describes the operation status of the J-PARC DTL/SDTL, the maintenance work that has been carried out, various troubles that have been experienced and their countermeasures, and improvements in the operation of the DTL/SDTL.

1. はじめに

Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) は、リニアック(LINAC/LI, 400 MeV)、Rapid Cycling Synchrotron (RCS, 3 GeV)、Main Ring Synchrotron (MR, 30 GeV)の3つの陽子加速器施設、及び物質・生命科学実験施設(MLF)、ニュートリノ実験施設(NU)、ハドロン実験施設(HD)の3つの実験施設の呼称であり、陽子ビームで発生させた中性子、ミュオン、K 中間子、ニュートリノなどの2次粒子ビームを利用した様々な研究を行っている。リニアックで加速されたビームはRCSに入射された後3GeVまで加速されMLFにビームを供給、あるいはMRに入射される。MRに入射されたビームは30GeVまで加速されNUまたはHDに供給される。

リニアック施設の加速器は上流から順に、Radio Frequency Quadrupole (RFQ)、Drift Tube Linac (DTL)、Separated-type DTL (SDTL)、Annular-ring Coupled Structure (ACS)の5種類の加速器で構成される。リニアックのレイアウトをFigure 1に示す。

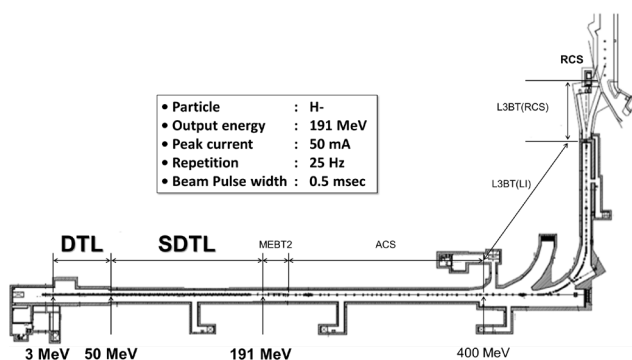


Figure 1: Layout of the J-PARC linac.

リニアックの建設は二期に分かれており、第一期ではSDTLまでがインストールされ、ビームの出射エネルギー(RCSへ入射するビームエネルギー)は181 MeVである。二期計画ではACSがインストールされ、RCSへのビーム

エネルギーは400 MeVとなる。

J-PARC施設は2001年度に建設が開始され、リニアックに関しては2006年3月の施設が完成した。加速器及び関連機器のインストールや調整を行い、2006年11月からビーム加速が開始され、2007年1月にビームエネルギー181 MeVの加速を達成[1]、その後2013年のACSのインストールを経て2014年1月に400 MeV加速に成功した[2]。その後現在まで、リニアックは所期性能である、ビームエネルギー400 MeV、ビーム電流値(ピーク)50 mA、ビームマクロパルス幅0.5 msec、繰り返し25 Hzを達成し、利用施設からの要求に沿ったビームパラメータでの安定な運転を継続している。

本稿では、リニアック施設の加速器のうち、主にDTL及びSDTLに関する運転経験を紹介する。

2. 構成機器

2.1 加速空洞

Table 1にDTL及びSDTLの主要パラメータを示す。DTL及びSDTLは一般的なアルバレ型加速器であるが、以下のような相違がある。

- 空洞径が異なる(DTL:560 mm, SDTL:520 mm)
- DTLはポストカプラーを有しているがSDTLは無い。
- DTLは空洞長が長く(~10 m)一空洞当たりのセル数が多い(DTL1から順に76, 43, 27セル)。一方SDTLは空洞長が短く(1.5 m~2.5 m)全ての空洞で5セルである。
- DTLは1台のクライストロンで1台のDTL空洞に電力を投入、SDTLは、1台のクライストロンで2台のSDTL空洞に電力を投入する。
- DTLはDTに内蔵したビーム収束用電磁石(DTQ電磁石)でビーム収束を行うが、SDTLでは隣り合うSDTL空洞間に設置したビーム収束用の四重極ダブレット電磁石でビーム収束を行う(ビーム収束の機能が加速器から分離されているのでSeparated-typeと呼称する)。

itou.takashi@jaea.go.jp

Table 1: Main Parameters of DTL and SDTL

	DTL	SDTL
Operating frequency (MHz)	324	
Repetition (Hz)	25	
RF macro-pulse width(μs)	600	
Number of cavities	3	32
Diameter(mm)	560	520
Length(m)	7.3 ~ 9.9	1.5 ~ 2.5
Drift tube diameter(mm)	140	90
Bore diameter	13, 18, 22, 26	36
Number of cells	76, 43, 27	5
Operating power; Peak (MW)	1 ~ 1.3	0.18 ~ 0.8
Beam Energy (MeV)	3 ~ 50	50 ~ 191

2.2 空洞装着機器

DTL/SDTL 本体に直接装着されている機器には以下の機器がある(真空関連機器は 2.4 項で述べる)。

- RF カプラー
- 可動チューナー
- 固定チューナー

DTL は、空洞 1 台当たり RF カプラー 2 台、可動チューナー 2 台、固定チューナー 10 台 (DTL1、2) 又は 8 台 (DTL3) が装着される。一方 SDTL は、空洞 1 台当たり RF カプラー 1 台、可動チューナー 1 台、及び固定チューナー 2 台が装着される。RF カプラーと可動チューナーは DTL と SDTL で兼用できるが、固定チューナーは装着位置毎に全て挿入量が異なる。

可動チューナーは加速器運転中にスタブの挿入量を変更可能なチューナーであり、空洞の共振周波数を調整している。挿入量を制御するためのコントローラーはリアック建屋の地上階に設置されている。

2.3 電磁石及び電磁石電源

DTL にはビーム収束用の DTQ 電磁石が全ての DT に内蔵されており、DTQ は全 149 台である (DTL1:77 台、DTL2:44 台、DTL3:28 台)。DTQ 電源は 111 台である。

SDTL 区間では隣り合う SDTL 空洞間に Q ダブレット電磁石 (SDTL-Q 電磁石) が 31 台設置されている。また、軌道補正用のステアリング電磁石 (SDTL-ST 電磁石) が 8 台設置されている。

SDTL-Q 磁石用電源、ST用電源はそれぞれ 35 台、16 台である。電源は全て地上階に設置されている。

2.4 真空機器

DTL/SDTL 空洞内を真空引き、あるいは真空封止するための機器である。主な真空機器は以下の通り。

- スクロールポンプ (DTL1~S06B)*
- ルーツポンプ (S07A~S16B)*
- ターボ分子ポンプ*
- イオンポンプ
- NEG ポンプ (S13A~S16B)

- 真空バルブ (真空引き系統用)*
- 真空バルブ (ビームライン用)
- サーモカップルゲージ (全空洞)*
- 電離真空計 (全空洞)

*が付いている機器はいわゆる粗引き真空系の機器である。全ての DTL/SDTL 空洞に対して 1 セット装着されており、大気圧から真空引きを行う際に用いる。加速器運転中は、基本的にイオンポンプ、あるいはイオンポンプ+NEG ポンプで真空引きを行い、粗引き系機器は使用しない。イオンポンプは、DTL 空洞 1 台当たり 5 台、SDTL 空洞 1 台当たり 2 台装着されている。真空バルブ (ビームライン) は、装着スペースが取れない D1-2 間及び S01A~S04B までの各空洞間を除いた全空洞間に装着されている。

これらの真空機器を操作するためのコントローラーや電源は地上階に設置されている。

2.5 冷却水機器

DTL/SDTL では、運転中の機器の発熱を除去するため冷却水を通水している。通水している機器は、加速空洞、空洞装着機器、電磁石、DTQ 電源で、その全ての冷却水系統には流量計を装着、併せて電磁石と DTQ 電源系を除いた全ての系統には水温測定用温度計 (PTTM) を装着し、流量と水温を常時監視している。DTL/SDTL 区間の流量計は約 700 台、PTTM は約 400 台である。

流量及び水温の監視は、地上階に設置した冷却水監視機器 (PLC など)で行っている。

3. 運転状況

3.1 ビームパワーと稼働率

Figure 2 に 2015 年度から 2022 年度の利用運転時 (ユーザーへの運転) のビームパワーと稼働率の推移を示す[3]。

棒グラフは各年度における MLF への最大ビームパワーを示している。年度を重ねるごとに順調にビームパワーを上昇してきたことがわかる。本グラフには示されないが、2018 年度には LI 及び RCS を利用した 1MW 相当のビーム加速にも成功しており、MLF 側で 1MW ビームの受け入れ準備が整い次第、1MW での利用運転が可能となる状況である。

Figure 2 の線グラフは MLF、NU、HD の 3 つの実験施設の稼働率の推移を示したものである。稼働率は、実験施設のユーザーの予定されたビーム利用運転時間に

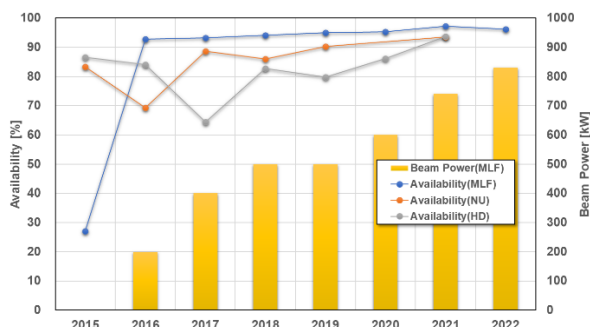


Figure 2: Trend of the availability and the beam Power.

守期間があり、利用運転を停止せずにセラミック窓の交換を実施することができた(DTL ではセラミック窓だけを交換することが可能)。取り外したセラミック窓とセラミック窓表面とセラミック窓用の金属製真空シールには対になる放電痕が複数見につき、ここでの放電が発報の原因だと推測している。セラミック窓交換後の DTL3 は、運転再開直後に数回アークセンサーの警報発報があったものの、その後発報はなくなり運転は安定した。

RF カプラーに関しては、運転中のアークセンサーの発報回数を取得し、年間を通じたアークセンサーの発報回数が多い空洞の RF カプラーを夏季保守期間に交換することで、利用運転中の交換をしなくて済むように予防保全を図っている。

4.1.2 空洞端板

SDTL 空洞の外壁は円筒形の空洞本体と空洞本体両端に装着する円盤状の端板で構成される。空洞本体と端板は、DTL1 から SDTL02 までは Oリング、SDTL03 から SDTL16 までは E シールと呼ばれる金属シールにインジウムメッキを施したシールで真空封止される。これまでに複数の端板で E シールのリークが発生しており、ビーム運転は停止しない範囲での空洞内部の真空度の悪化が観測された。リークの原因は、金属シールの不均一な締め付け、インジウムメッキの劣化(酸化)、放射線による E シールの弾性の劣化などが考えられるが、原因の特定には至っていない。

端板部を含め DTL/SDTL のフランジ部は二重シール構造になっており、これが運転中のリーク対策になっている。二重シール部では内側シールと外側シールの間の空間が真空引き可能であり、真空引き用ポートを封止しておけば、内側シール(E シール)でリークが発生しても、外側シールで真空封止されるため空洞内の真空度は維持されビーム運転は継続可能である。リークが判明した E シールは夏季保守期間中に交換している。

4.2 真空機器

4.2.1 イオンポンプからのガス放出

DTL/DTL では利用運転中は基本的にイオンポンプでのみ真空排気を行っている。イオンポンプからのガス放出が発生すると通常 10^{-6} Pa 台である加速空洞内の真空度が 10^{-3} Pa 台以上まで急速に悪化する。ガス放出後、運転可能な真空度まで回復するのに数分必要であり、その間ビーム運転が停止する。発生頻度はまちまちで一月に数回発生することもあれば、数カ月発生しないこともある。特定のイオンポンプで発生していた現象であり、原因はイオンポンプからのアルゴンの放出だと推定した。

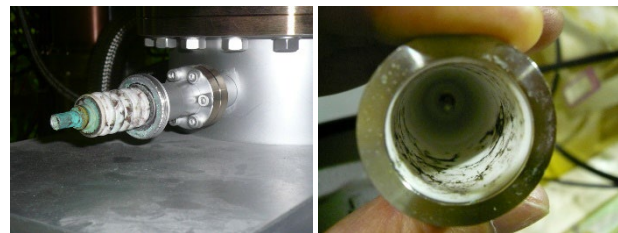
対策として、希ガス対応タイプのイオンポンプへの交換を実施した。イオンポンプを交換後した空洞では、その後本現象は発生していない。

4.2.2 イオンポンプコネクタの腐食

加速器運転中にイオンポンプに高圧がかからなくなり、イオンポンプを停止させる事象である。一台のイオンポンプが停止しても、DTL/SDTL には複数台の意ポンプが装着されており、真空度が上がった場合はターボ分子ポンプを利用することも可能なので、ビーム運転を停止させることはなかった。

保守時にコネクタ部を調査したところ、イオンポンプの

高圧コネクタ部で腐食(緑青)が発生していた(Fig. 5)。主な原因は加速器トンネル内の湿度が高かったことだと推定している。震災後にイオンポンプの停止が頻発した頃の加速器トンネル内の湿度は 70%を超える時があり、湿度を 50~60%程度に下げた後は、イオンポンプが停止することはほぼなくなった。



(a) HV Connector (IP) (b) HV Connector (Cable)

Figure 5: Photograph of the HV connector of the ion pump. Verdigris is on the surface of the HV connector.

4.3 冷却水機器

4.3.1 流量低下問題

DTL/SDTL に流している、非鉄系(RI4系)と呼ぶ冷却水の流量が低下し、流量低の警報発報により何度も利用運転を停止させた現象である(2009年頃)。RI4系の末端に位置し、他の空洞機器と比較して通水流量が少なく圧損が大きい DTQ で顕著に観測され、週一回の保守作業日に流量を増やす作業を実施していたにも関わらず、利用運転を何度も停止させた。

根本的な対策は 2016 年から実施し、運転中に流量を増加させるための電動バルブの設置、それに合わせた個別流調バルブの開閉度の変更、RI4系を 1 台の冷却水ポンプで流していたのを、北行(上流)、南行(下流)それぞれ別の冷却水ポンプに分離(南行用に 1 台増設)した。2017 年にはキャンドポンプをメカニカルシールポンプに変更した[7]。この対策により冷却水流量低下は抑えられ、その後流量低下によるビーム停止はほぼ皆無である。

4.3.2 冷却水ポンプ故障

施設側の RI4 系南行の冷却水ポンプが故障し利用運転を停止させ、さらに DTL/SDTL の冷却水の中に鉄粉をまき散らしたトラブルである。インペラの軸部が折れ、インペラとケーシングが擦れて表面を削り、その削りかす(鉄粉)が RI4 系全体にまき散らされた。その結果、RI4 系に接続されている全ての流量計約 400 台のフロートに鉄粉と思しき異物が付着する事態となった。

故障したポンプは 4.3.1 で述べた増設した 1 台だったため、RI4 系を元の冷却水ポンプ 1 台運転に戻して対応し、利用運転停止は数日で済んだ。

幸い付着物があっても流量計は使用可能だったため、利用運転の停止はなかった。付着物の成分分析結果は、付着物が SUS だと推定されるものであり、付着物はインペラ及びケーシングの削りかすであると同定した。

2017 年の夏季保守作業で流量計を分解し鉄粉を除去、また施設側で冷却水の入れ替えを行ったが、残水中の鉄粉や各機器内に残っている鉄粉などは完全には除去できないため、冷却水が回り始めると再び鉄粉が付

着する状態であった。その後 2022 年まで毎年、夏季保守作業での流量計の清掃を実施した結果、流量計フロートへの鉄粉の付着はほぼ無い状態まで改善した。

4.4 電磁石及び電磁石電源

4.4.1 SDTL-Q 電磁石の冷却水流量低下

SDTL-Q 電磁石のコイル巻き線にはホローコンダクター(ホロコン)を使用している。その流路内部が詰まり、冷却水を低下させる現象である(詰まりの原因は 4.3.2 の鉄粉ではない)。利用運転を停止させるまでの流量低下には至っていないが、定格流量の 6 割程度までしか流せない電磁石もあり、定格流量を流せるように戻す必要があった。

現在、詰まり対策としてホロコンの洗浄を毎年行っている。ホロコン入口から洗浄水と窒素(N₂)を同時に流し、ホロコン内部を詰まらせている物質を汚水として出す、というものである。沈殿物の成分分析では銅が検出され、黒色の沈殿物は酸化銅で、銅は電磁石のホロコン又は冷却水路に用いている銅チューブ由来のものであると推測している。

4.4.2 電磁石電源故障

DTL/SDTL 区間では、DTQ 電源、SDTL-Q 磁石電源、SDTL-ST 磁石電源の 3 種類の電源が用いられている。利用運転中に電流が出力できない故障が発生した時は電源本体を交換して対応している。平日であれば 30 分から 1 時間程度の交換時間(利用運転停止時間)で復帰できる。

電磁石電源の大多数の故障は冷却用 FAN の故障である。FAN は 3 種類の電源全てで使用しており、最大電源 1 台当たり 5 台の FAN が付いている。FAN は容易に着脱可能な構造なので、交換品を用意しておけば、動作確認も含めて 15 分程度で交換可能である。

4.5 その他の事例

4.4 節までに述べたトラブル、改善策以外の事例を以下に列挙する。

- 空洞表面マルチパクタ問題: 空洞内壁面上でマルチパクタが発生、定格運転ができなくなった。空洞内を洗浄することで解決[8]。
- 真空度改善対策
 - 真空引き用チューナー装着: S05A～S06B に真空引き可能な固定チューナーを装着。
 - IP ポンプ増設: S01A～S06B に IP を追加。
 - NEG ポンプ増設: S13A～S16B に NEG ポンプを追加。
- 粗引きポンプオイルフリー化: DTL1～S06B で使用していたロータリーポンプをドライスクロールポンプに交換。
- ビームダクト締結用クランプ破損: 保守期間中に発見。全数別タイプのクランプに交換。
- 冷却水用温度計交換: ケーブルが折れ故障、破損した温度計をケーブル断線対策済みの温度計に交換。
- 流量計未発報問題: 冷却水停止時にも未発報だった、ばねフロート式流量計を通常フロート式流量計に交換。減磁していたフロートを正常

品と交換。

- 電磁石電源故障対策: 電源使用後 7 年目頃から故障率が上昇、予防保全のため全電源のオーバーホールを実施、併せて故障が想定される内部基板等の交換部品を予備として製作。
- PLC モジュール交換: 同時期に複数回(複数個)の故障が発生したモジュールを予防保全のため全数交換。生産中止の旧モジュールを現行モジュールに全品交換。
- 同軸管損傷: 同軸内導体のコネクタが接触不良のため発熱、同軸管を損傷させた。同軸管接続部にサーモラベル及び熱電対を設置し、温度監視を行っている。

5. まとめ

2016 年以降、MLF へのリニアックの運転稼働率は 90%を超えている。特に 2021 年度、2022 年度は 95%を超え非常に安定している。NU、HD の稼働率も 2022 年度は 90%を超え安定していた。ビームパワーも順調に増加し、2022 年度は 800kW を超えた。すでに 1MW 相当のビーム試験も完了しており、MLF 側での受け入れが可能になり次第 1MW の供給が可能である。

リニアックのトラブルでは、HVDC のトラブルによる利用運転停止時間が多い。DTL、SDTL では RF カプラー近傍での放電が原因のトリップ回数が多いが、利用運転停止時間は電磁石関係のトラブルによるものが多い。

これまでに多くのトラブルを経験してきたが、都度問題を解決し、改善策を講じてきた。現在は経年劣化による故障が増加しており、その対策が課題である。

謝辞

保守作業、トラブル対応などの現場作業においては、三菱電機システムサービスの方々には御助力を頂き深く感謝いたします。また、様々なトラブルの原因究明、対策には J-PARC リニアックの各 Gr メンバーに多大な御協力を頂きましたこと、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] M. Ikegami, “J-PARC リニアックにおける 181MeV 加速の達成”, 高エネルギーニュース Vol25 No4 2007/1.2.3.
- [2] T. Maruta *et al.*, “Virtual sample of reference description II”, Proc. PASJ2014, Aomori, Japan, Aug. 2014, pp955-958.
- [3] K. Hasegawa, M. Kinsho, “Accelerator Overview”, J-PARC ATAC2016-2022, Tokai, Japan.
- [4] T. Morishita, “Status of Linac”, J-PARC ATAC2022, Tokai, Japan, Jan. 2023.
- [5] T. Ito *et al.*, “Trouble report for J-PARC DTL and SDTL”, Proc. PASJ2009, Tokai, Japan, Aug. 2009, pp690-692.
- [6] S. Arai *et al.*, “Investigation of an RF window for the J-PARC DTL”, PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. - Sep. 2023, TUP56, this meeting.
- [7] K. Suganuma *et al.*, “Present status of water cooling system at J-PARC LINAC 2018”, Proc. PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug. 2009, pp309-311.
- [8] T. Ito *et al.*, “Cavity cleaning for suppression of multipactor occurred at the J-PARC SDTL”, Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 193-196.