

## J-PARC リニアックの現状

### PRESENT STATS OF J-PARC LINAC

小栗英知<sup>#, A)</sup>, 長谷川和男<sup>A)</sup>, 伊藤崇<sup>A)</sup>, 千代悦司<sup>A)</sup>, 平野耕一郎<sup>A)</sup>, 森下卓俊<sup>A)</sup>, 篠崎信一<sup>A)</sup>, 青寛幸<sup>A)</sup>,  
大越清紀<sup>A)</sup>, 近藤恭弘<sup>A)</sup>, 田村潤<sup>A)</sup>, 山崎宰春<sup>A)</sup>, 堀利彦<sup>A)</sup>, 佐藤文明<sup>A)</sup>, 根本康雄<sup>A)</sup>, 小泉勲<sup>A)</sup>,  
菊澤信宏<sup>A)</sup>, 上野彰<sup>A)</sup>, 三浦昭彦<sup>A)</sup>, 加藤裕子<sup>A)</sup>, 福田真平<sup>A)</sup>, 池田浩<sup>A)</sup>, 佐藤浩一<sup>A)</sup>, 大曾根晃<sup>A)</sup>,  
澤邊祐希<sup>A)</sup>, 川根祐輔<sup>A)</sup>, 菊池一夫<sup>A)</sup>, 廣木文雄<sup>A)</sup>, 飯村武二<sup>A)</sup>, 矢内宗利<sup>A)</sup>, 田所一彦<sup>A)</sup>, 大沢謙治<sup>A)</sup>,  
内藤富士雄<sup>A)</sup>, Liu Yong<sup>A)</sup>, 方志高<sup>A)</sup>, 杉村高志<sup>A)</sup>, ニツ川健太<sup>A)</sup>, 池上清<sup>A)</sup>, 川村真人<sup>A)</sup>, 南茂今朝雄<sup>A)</sup>,  
福井佑治<sup>A)</sup>, 宮尾智章<sup>A)</sup>, 丸田朋史<sup>A)</sup>, 高木昭<sup>A)</sup>, 大内伸夫<sup>B)</sup>, 伊藤雄一<sup>C)</sup>, 鈴木隆洋<sup>D)</sup>, 石山達也<sup>D)</sup>,  
吉位明伸<sup>E)</sup>, 高安利男<sup>F)</sup>, 宇佐美力<sup>F)</sup>

Hidetomo Oguri<sup>#, A)</sup>, Kazuo Hasegawa<sup>A)</sup>, Takashi Ito<sup>A)</sup>, Etsuji Chishiro<sup>A)</sup>, Koichiro Hirano<sup>A)</sup>, Takatoshi Morishita<sup>A)</sup>,  
Shinichi Shinozaki<sup>A)</sup>, Hiroyuki Ao<sup>A)</sup>, Kiyonori Ohkoshi<sup>A)</sup>, Yasuhiro Kondo<sup>A)</sup>, Jun Tamura<sup>A)</sup>, Saishun Yamazaki<sup>A)</sup>,  
Toshihiko Hori<sup>A)</sup>, Fumiaki Sato<sup>A)</sup>, Yasuo Nemoto<sup>A)</sup>, Isao Koizumi<sup>A)</sup>, Nobuhiro Kikuzawa<sup>A)</sup>, Akira Ueno<sup>A)</sup>,  
Akihiko Miura<sup>A)</sup>, Yuko Kato<sup>A)</sup>, Shinpei Fukuta<sup>A)</sup>, Hiroshi Ikeda<sup>A)</sup>, Koichi Sato<sup>A)</sup>, Akira Oozone<sup>A)</sup>, Yuki Sawabe<sup>A)</sup>,  
Yusuke Kawane<sup>A)</sup>, Kazuo Kikuchi<sup>A)</sup>, Fumio Hiroki<sup>A)</sup>, Takeji Imura<sup>A)</sup>, Munetoshi Yanai<sup>A)</sup>, Kazuhiko Tadokoro<sup>A)</sup>,  
Kenji Ohsawa<sup>A)</sup>, Fujio Naito<sup>A)</sup>, Yong Liu<sup>A)</sup>, Zhigao Fang<sup>A)</sup>, Takashi Sugimura<sup>A)</sup>, Kenta Futatsukawa<sup>A)</sup>,  
Kiyoshi Ikegami<sup>A)</sup>, Masato Kawamura<sup>A)</sup>, Kesao Nanmo<sup>A)</sup>, Yuji Fukui<sup>A)</sup>, Tomoaki Miyao<sup>A)</sup>, Tomofumi Maruta<sup>A)</sup>,  
Akira Takagi<sup>A)</sup>, Nobuo Ouchi<sup>B)</sup>, Yuichi Ito<sup>C)</sup>, Takahiro Suzuki<sup>D)</sup>, Tatsuya Ishiyama<sup>D)</sup>, Akinobu Yoshii<sup>E)</sup>,  
Toshio Takayasu<sup>F)</sup>, Tsutomu Usami<sup>F)</sup>

<sup>A)</sup> J-PARC center

<sup>B)</sup> JAEA/ R&D Program Management Department

<sup>C)</sup> JAEA/Department of ITER Project

<sup>D)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co. Ltd.

<sup>E)</sup> NS Solutions Corps.

<sup>F)</sup> Nippon Advanced Technology Co. Ltd.

### Abstract

J-PARC linac power upgrade program is now in progress in parallel with the user operation. To realize the nominal performance of 1 MW at 3 GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) and 0.75 MW at a 30 GeV Main Ring synchrotron (MR), we need to upgrade both the energy (400 MeV) and the peak beam current (50 mA) of the linac. For the energy upgrade, we installed an annular-ring coupled structure linac (ACS) after the separated drift tube linac (SDTL) during the summer shutdown of 2013. The beam commissioning of the linac was started in December 2013, and the designed beam energy of 400 MeV was achieved in January 2014. The user operation of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) was resumed in February, 2014 with the beam power of 300 kW. During the operation, some failures such as discharge of a klystron, malfunction of high voltage power supply for the klystron and instability of cooling water flow level were occurred. For the beam current upgrade, we have a plan to replace the ion source and the Radio Frequency Quadrupole linac (RFQ) during the summer shutdown of 2014. A test stand has been constructed to perform the beam test before installation. At the beam test, one month continuous operation with the peak beam current of 50 mA from the RFQ was successfully demonstrated in June 2014.

### 1. はじめに

J-PARC の加速器施設の一つであるリニアックでは、ビーム利用運転と並行してビームパワー増強計画を進めている。計画では、エネルギー及び s ビーム電流をそれぞれ 400 MeV 及び 50 mA に増強する。エネルギー増強については、2013 年に Annular-ring Coupled Structure (ACS) 型加速空洞<sup>[1]</sup>をビームラインに設置し、2014 年 1 月に 400 MeV 加速に成功した。現在、400 MeV にてビーム利用運転を行って

る。一方、ビーム電流増強については、新たに製作したイオン源及び RFQ の性能試験を行うために、2013 年に専用のテストスタンドを整備した。性能試験と並行して、RFQ からの出力ビームを利用してビームチョップシステム用スクレーパの材料照射試験も実施した。本テストスタンドは 2014 年 6 月末に試験を終え、同年 7 月より新イオン源及び RFQ のビームライン設置作業を進めている。本学会では、ここ 1 年間のリニアックの運転状況及び主なトラブル事例と、ビーム増強計画の状況について報告する。

<sup>#</sup> oguri.hidetomo@jaea.go.jp

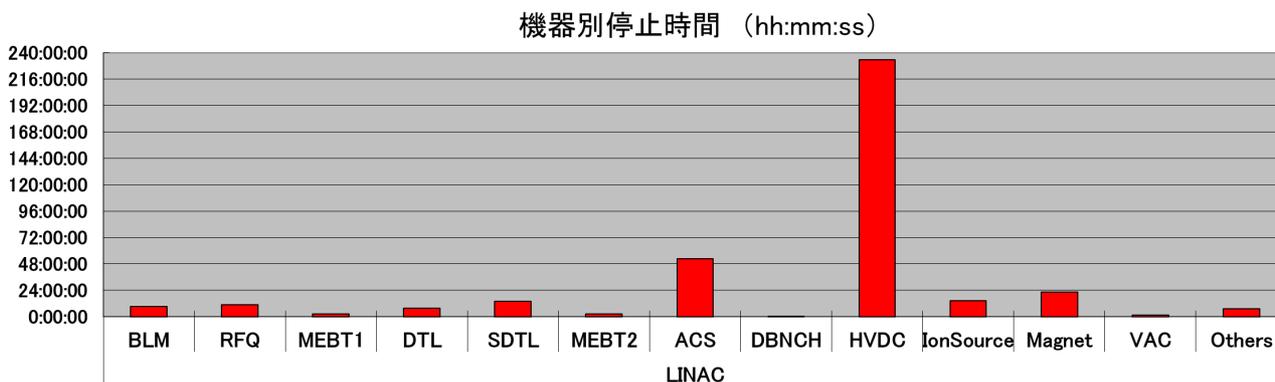


Figure 1: Beam stop time due to linac components (from Dec. 2013 to Jun. 2014).

## 2. リニアックの運転状況

リニアックの2013年12月から2014年6月までの機器別停止時間をFigure 1に示す。この期間において停止時間の最も長かったのは、クライストロン高圧電源（図中ではHVDCと表記）であった。主な原因は、高圧電源9号機の電圧調整盤（AVR）内で使用している制御基板や主回路の電流測定用DCCTに不具合が頻発したことである。

本運転期間中に、HVDCで使用している変圧整流器の2号機及び5号機が故障した。前者は今季のビーム運転再開前、後者は今季のビーム運転最終日にそれぞれ発生したため、Figure 1のHVDC停止時間には約21時間しか計上されていないが、もしビーム運転の最中に本トラブルが発生したら10日間程度ビームが停止する可能性がある。変圧整流器は2012年3月にも1号機が故障しており、リニアックの運転開始時から使用している6台のうち半数の3台が故障したことになる。故障の原因は3台とも同じで、変圧整流器の内部に実装されている三相整流を行うためのダイオードモジュールの破損である。破損原因は未だ調査中であるが、おそらく高電圧サージによるダメージが運転時間に乗じて蓄積され、サージ印加寿命により破壊に至ったと考えられる<sup>[2]</sup>。現在、変圧整流器の入力側にCRサージアブソーバを設置してダイオードモジュールを保護する対策を検討している。

高周波四重極リニアック（RFQ）は、2008年に放電トラブルを起こして以来、ビーム停止要因の代表格であったが<sup>[3]</sup>、タンク内の真空圧力の改善やコンディショニングを頻繁に行うなどの措置が功を奏し、停止時間は年々減少していった。放電問題が発生して以来、ヴェーン間電圧を定格の96%に下げて運転を行ってきたが、本運転期間ではビームパワーの増加に合せて電圧を徐々に上げて運転を行った。2014年6月にはヴェーン間電圧を定格まで上げたが、トリップレートは10回以下/dayであった。対策直後は定格96%で~20回/day、2011年震災後の運転再開

時は~60回/dayであったことを考えると、非常に安定した運転を実現できたといえる。本RFQは加速ビーム電流30mAで設計されておりビーム電流増強計画には対応できないため、2014年の6月をもって使用を終了した。

現在稼働中のイオン源のRUN毎の運転時間及びビーム電流の推移をFigure 2に示す。稼働中のイオン源は、LaB<sub>6</sub>（六ホウ化ランタン）製フィラメントを使用したアーク放電型である<sup>[4]</sup>。RUN#26（2009年9月）までは先に述べたRFQの不具合のためにビーム電流を6mAに抑えて運転を行っていたが、次のRUNからは、ビーム電流を17mAまで上げて運転を行った。本運転期間においては、ビーム利用運転時には約20mA、加速器ビームスタディ時には約32mAで運転を行った。RUN#46及びRUN#52において、運転中にフィラメントが断線した（Figure 2において、バーの色が茶色から赤色に変わるタイミング）。この2回の断線事象から20mA運転条件でのフィラメント寿命は、約1,000時間であることが分かった。32mA条件下ではフィラメントが断線するまで運転を続けたことは無いが、RUN#51では500時間程度の運転を行い、運転後のフィラメントに顕著な損傷が見られなかったことから、500時間の連続運転は可能であると言える。本イオン源が発生できる最大ビーム電流は32mA程度でありビーム電流増強計画には対応できないため、2014年6月をもって使用を終了した。

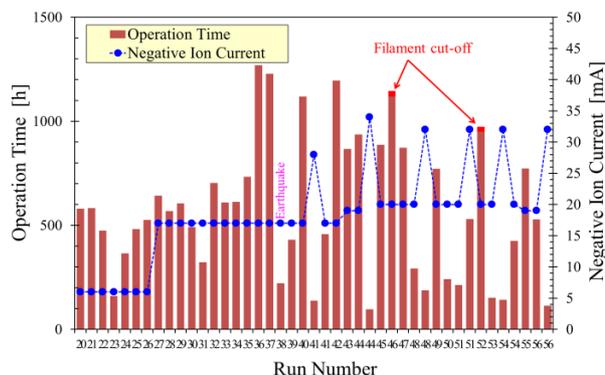


Figure 2: Ion source current and operation time.

324 MHz クライストロンの 2014 年 6 月までの総運転時間を Figure 3 に示す。2006 年の運転開始時から 2014 年 6 月までの期間に、全 20 台の 324 MHz クライストロンのうち 4 台の交換を行った (RFQ、DTL02、SDTL13 及び SDTL15 用)。そのうちの RFQ 用クライストロンの交換は、自身の性能劣化によるものではなく、先の述べた変圧整流器の故障時に予防的に行ったものである。残り 3 台については、電子銃部の耐圧不良やアノード放電の頻発などクライストロン本体の性能劣化に伴う交換であった。交換した 3 台のクライストロンの運転時間から算出される平均寿命は 32,800 時間である。交換した 4 台と 2013 年より使用を開始した SDTL16 用以外は全て総運転時間が 35,000 時間を超えており、今後は交換ペースが増加すると考えられる。現在、スペアのクライストロンの脱ガス処理を行い、故障時に直ぐ交換できるように準備をしている。また、今までに故障したクライストロンの状態を詳細に調べ、故障の予見が可能か検討中である<sup>[5]</sup>。もし可能であれば、イオン源の定期メンテナンス等に合わせて計画的にクライストロンを交換することで、加速器の計画外停止を低減することができる。

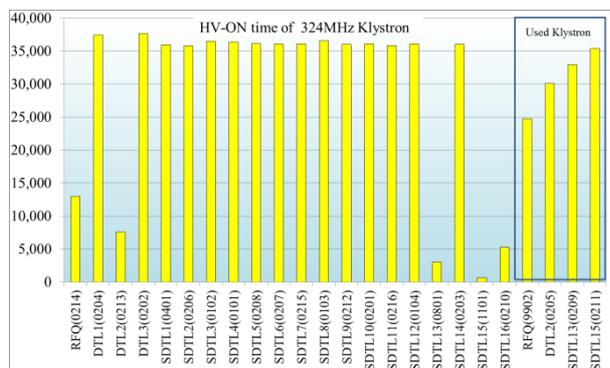


Figure 3: Operation hours of 324 MHz klystrons.

### 3. リニアックビーム増強

J-PARC 実験施設にビームを供給している 3GeV シンクロトロン (RCS) 及び 30GeV メインシンクロトロン (MR) において、それぞれ 1 MW 及び 0.75 MW を実現するためには、リニアックではエネルギーを 400 MeV、ビーム電流を 50 mA に増強する必要がある。ビームパワー増強前後のリニアックのレイアウトを Figure 4 に示す。エネルギー増強には、これまで 181 MeV 運転を行っていた SDTL15 の下流に SDTL16 を追加して 191MeV とし (SDTL16 空洞はこれまでデバンチャーとして使用していた)、さらに 21 台の ACS 加速空洞、2 台のバンチャー空洞及び 2 台のデバンチャー空洞を新設して 400 MeV まで加速する。電流増強には、初段加速部 (イオン源及び RFQ) とビームチョップ空洞を更新する。以下に、それぞれの現状について記す。

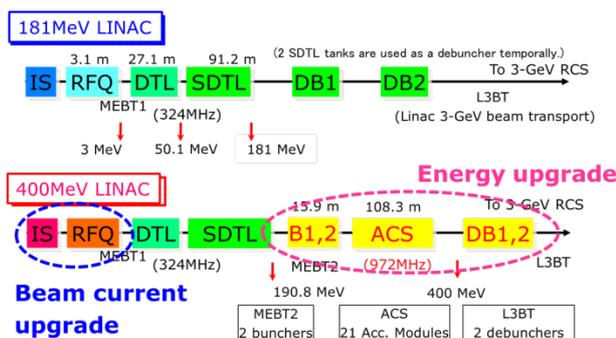


Figure 4: Schematic configuration of the previous (upper) and upgraded (lower) J-PARC linac.

#### 3.1 リニアックエネルギー増強

リニアックでは、400 MeV 加速達成のために ACS 空洞とこれを駆動する高周波電源となる 972 MHz クライストロンの開発と、制御系、ビームモニタ及び冷却水設備等の付帯設備の増設を進めてきた。2013 年の夏季メンテナンス時に、新加速システム及びビームモニタの設置工事 (Figure 5) と、制御系の増設工事を行った。これらの工事は、既設の 181 MeV 機器の設置工事の経験から 1 年近くを要する見込みであったが、J-PARC は既にビーム利用運転を行っているため、より短期間の停止で行うことが求められた。そこで数年前から設置工事工程を綿密に策定し、毎年行われる夏のメンテナンス期間を利用して導波管やケーブルの敷設など準備工事を周到に進めてきた。その結果、2013 年の本体機器設置工事は実質約 3 か月で完了することができた。

2013 年の 11 月から ACS 空洞のコンディショニングを開始したが、一部の 972 MHz サーキュレータにおいて放電が頻発する不具合が生じた<sup>[6]</sup>。そのため、健全なサーキュレータを複数の空洞で使い回しながらコンディショニングを進めた。その後のビーム調整試験<sup>[7]</sup>においては、大きなビームロスが発生する空洞位相調整時にイオン源のビーム強度を 5 mA に下げるなどの対応を行い、機器の放射化を可能な限り軽減した。先に述べたサーキュレータの故障など予期しなかったトラブルにより一時的に工程遅れが生じたが、制御系を工夫して既設空洞のビーム調整と新設空洞の高周波電力のみによるコンディショニングを並行して行うことにより遅れを挽回した。その結果、ビーム調整試験をスケジュール通りに完了し、2014 年 1 月に 400 MeV のビーム加速に至った。その後、ビーム電流を 15 mA に上げて利用運転用の Q 磁石の調整等を行い、1 月末から RCS ビーム供給を開始した。現在、ビーム利用運転と並行して RCS でのビームロスを低減するためのビーム最適化研究を行っている<sup>[8]</sup>。

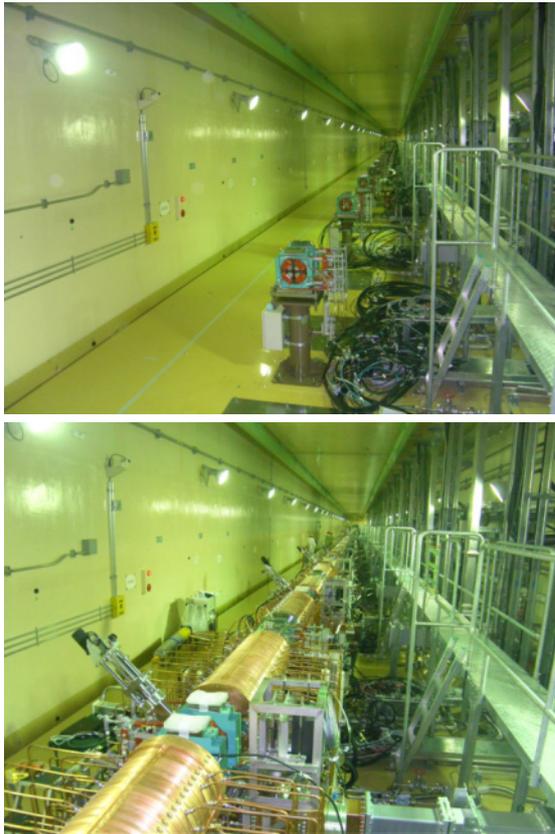


Figure 5: Accelerator tunnel before (upper) and after (lower) ACS cavities installation.

### 3.2 リニアックビーム電流増強

リニアック出口でビーム電流 50 mA を達成するためには、初段加速部（イオン源及び RFQ）を更新する必要がある。ビーム電流増強用のイオン源については、セシウム添加型高周波イオン源を製作し、専用のテストスタンドを使用してビーム試験を進めてきた<sup>[9]</sup>。また、RFQ については、空洞内の真空排気には有利な構造である真空ロー付け接合により空洞を製作し、2013 年 3 月に完成した<sup>[10]</sup>。

新初段加速部をビームラインに設置する前にビーム性能等を確認するために、専用のテストスタンドを整備し、2014 年 1 月より新 RFQ のビーム試験を開始した（Figure 6）。RFQ 出口で所期の性能である 50 mA 加速を確認したのち、約 1 か月間の昼夜連続運転を行った。連続運転では特に大きな問題は起こらなかったが、RFQ のトリップレートが 1 時間当たり 5~10 回と高い数値を示した。これは、RFQ のヴェーンでのビームロスによるアウトガスが原因と考えられ、真空ポンプ追加による排気速度向上と、ビームによるコンディショニングの継続で改善されることが期待される。

ビーム電流の増強を行うには、RFQ 下流に設置しているビームチョップシステムの更新も必須である。現在稼働中のチョップ空洞に 50mA のビームを通す

と、ビームがチョップの電極やビームパイプに衝突することがシミュレーション結果で示されていることから、電極間隔やパイプ径を拡張した新チョップ空洞<sup>[11]</sup>を製作した。また、チョップ空洞より蹴り出されたビームを除去するため設置されているスクレーパの熱負荷による損耗<sup>[12]</sup>も、ビーム電流増加に伴い問題となる。現在、スクレーパには炭素複合材を用いているが、他に優れた材料が無いか検討中である。また、スクレーパを 2 ヶ所に配置し、ビームを交互に当てることで損耗速度を低減する方式も採用する予定である。



Figure 6: New RFQ test stand for beam current upgrade.

### まとめ

J-PARC リニアックでは、2013 年度にエネルギー増強計画を完了し、現在、400 MeV にてビーム運転を行っている。2014 年度の夏季メンテナンスでは、ビーム電流増強を行うために初段加速部及びビームチョップ空洞の更新を行う予定である。更新作業を 9 月下旬に終え、10 月からビームコミッショニングを開始し、RCS 出口で 1 MW 相当のビーム加速の実現を目指す予定である。11 月からはピークビーム電流 30 mA にて 300 kW のビーム利用運転を開始し、その後はビーム電流を徐々に上げていく予定である。

### 参考文献

- [1] H. Ao et al., “J-PARC 用 ACS 空洞の開発”, SUOLA3, in these proceedings
- [2] E. Chishiro et al., “J-PARC クライストロン高圧電源の改修”, SUP048, in these proceedings
- [3] K. Hasegawa et al., “J-PARC における RFQ の現状” Proceedings of the 6th Accelerator Meeting in Japan, p693, Tokai, Aug. 5-7, 2009
- [4] K. Ohkoshi et al., “J-PARC イオン源の運転状況”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 3-5, 2013, Nagoya
- [5] T. Hori et al., “J-PARC リニアック 324MHz クライストロンのアノード短絡状況とその対策”, SUP050, in these proceedings
- [6] K. Futatsukawa et al., “J-PARC リニアックでの 972MHz サーキュレータ放電とその対策”, SUP053, in these proceedings

- [7] T. Maruta et al., “J-PARC リニアックにおける 400 MeV 増強後のビームコミッショニングの進捗”, SUP011, in these proceedings
- [8] Y. Liu, “RCS へのための J-PARC 線形加速器ビームの最適化研究”, SAP012, in these proceedings
- [9] I. Koizumi et al., “J-PARC 用セシウム添加高周波駆動負水素イオン源の開発状況”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 3-5, 2013, Nagoya
- [10] T. Morishita et al., “Fabrication of the RFQ-III for the J-PARC Linac Current Upgrade”, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, 2013
- [11] K. Hirano et al., “J-PARC リニアックチョッパシステムの開発”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 3-5, 2013, Nagoya
- [12] T. Sugimura et al., “J-PARC LINAC 3MeV ビームスクレーパーの開発”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 3-5, 2013, Nagoya