

KEK 電子陽電子入射器における火災と安全

FIRE AND SAFETY AT KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC

古川和朗 *^{A)}、明本光生 ^{A)}、阿部哲郎 ^{A)}、荒川大 ^{A)}、荒木田是夫 ^{A)}、飯田直子 ^{A)}、池田光男 ^{A)}、岩瀬広 ^{A)}、
恵郷博文 ^{A)}、榎本収志 ^{A)}、榎本嘉範 ^{A)}、大沢哲 ^{A)}、小川雄二郎 ^{A)}、柿原和久 ^{A)}、片桐広明 ^{A)}、
紙谷琢哉 ^{A)}、川村真人 ^{A)}、倉品美帆 ^{A)}、佐武いつか ^{A)}、佐藤政則 ^{A)}、設楽哲夫 ^{A)}、周翔宇 ^{A)}、
白川明広 ^{A)}、諏訪田剛 ^{A)}、清宮裕史 ^{A)}、平雅文 ^{A)}、竹中たてる ^{A)}、田中窓香 ^{A)}、張叡 ^{A)}、邱丰 ^{A)}、
峠暢一 ^{A)}、中島啓光 ^{A)}、夏井拓也 ^{A)}、西田麻耶 ^{A)}、東保男 ^{A)}、肥後寿泰 ^{A)}、本間博幸 ^{A)}、
松下英樹 ^{A)}、松本修二 ^{A)}、松本利広 ^{A)}、三浦孝子 ^{A)}、三川勝彦 ^{A)}、宮原房史 ^{A)}、矢野喜治 ^{A)}、
横山和枝 ^{A)}、吉田光宏 ^{A)}

Kazuro Furukawa* ^{A)}、Mitsuo Akemoto ^{A)}、Tetsuo Abe ^{A)}、Dai Arakawa ^{A)}、Yoshio Arakida ^{A)}、Naoko Iida ^{A)}、
Mitsuo Ikeda ^{A)}、Hiroshi Iwase ^{A)}、Hiroyasu Ego ^{A)}、Atsushi Enomoto ^{A)}、Yoshinori Enomoto ^{A)}、Satoshi Ohsawa ^{A)}、
Yujiro Ogawa ^{A)}、Kazuhiisa Kakihara ^{A)}、Hiroaki Katagiri ^{A)}、Takuya Kamitani ^{A)}、Masato Kawamura ^{A)}、
Miho Kurashina ^{A)}、Itsuka Satake ^{A)}、Masanori Satoh ^{A)}、Tetsuo Shidara ^{A)}、Xiangyu Zhou ^{A)}、Akihiro Shirakawa ^{A)}、
Tsuyoshi Suwada ^{A)}、Yuji Seimiya ^{A)}、Masafumi Taira ^{A)}、Tateru Takenaka ^{A)}、Madoka Tanaka ^{A)}、Rui Zhang ^{A)}、
Feng Qiu ^{A)}、Nobukazu Toge ^{A)}、Hiromitsu Nakajima ^{A)}、Takuya Natsui ^{A)}、Maya Nishida ^{A)}、Yasuo Higashi ^{A)}、
Toshiyasu Higo ^{A)}、Hiroyuki Honma ^{A)}、Hideki Matsushita ^{A)}、Shuji Matsumoto ^{A)}、Toshihiro Matsumoto ^{A)}、
Takako Miura ^{A)}、Katsuhiko Mikawa ^{A)}、Fusashi Miyahara ^{A)}、Yoshiharu Yano ^{A)}、Kazue Yokoyama ^{A)}、
Mitsuhiro Yoshida ^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK/SOKENDAI), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A high-power pulsed modulator was burnt at the accelerating structure assembly room adjacent to the electron positron injector linac building in KEK. It is considered that a capacitor in the pulse forming network was broken and caught fire. The container of the capacitor was plastic material and was filled with insulating oil that are combustible. The fire generated much carbon soot and it sneaked into the injector building. The operation of those facilities was interrupted. The fire and its recovery are reported.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構の7 GeV 電子陽電子入射器は、特性の異なる電子・陽電子ビームを、陽電子についてはダンピング・リング (DR) を通して、SuperKEKB 電子リング (HER)、陽電子リング (LER)、フォトンファクトリ・リング (PF)、PF アドバンス トリング (PF-AR) という4つの蓄積リング加速器に入射し、素粒子物理実験や放射光科学実験を支えている [1,2]。入射器は約700 mの長さを持っており、南北約600 mの長さの電子陽電子入射器棟に折り曲げて収められ、地下トンネルと地上クライストロンギャラリから構成される。入射器棟南端に接しては、加速管の試験・コンディショニングのために加速管組立室が Fig. 1 のように配置されており、さらにその東に加速管準備室が接している。加速管組立室においては、S-バンドやC-バンド、X-バンドの加速管の開発・保守が行われてきた。

2019年に入って、入射器と放射光施設は2月から、SuperKEKBは3月から運転を開始し、放射光は3月末で一旦休止した。4月に入って、加速管組立室において火災があり、入射運転中であつた SuperKEKB 衝突実験 [3] を中断させ、加速管の開発にも影響を

与えることになった。この火災対応の経過について報告し、考察してみたい。

2. 加速管組立室と NEXTEF

加速管組立室は電子陽電子入射器棟の南端に接しており、加速管の試験・コンディショニングのために、配置されている。加速管試験装置において、加速管から発生する放射線を遮蔽しながら2つの試験が行えるように、2つの遮蔽区画がある。加速管の試験に必要な大電力マイクロ波パルス変調器は、北側に接する入射器棟南端のクライストロン組立ホールに複数台と加速管組立室内にも1台が設置され、クライストロンやマイクロ波源自体の開発・保守とともに、加速管にマイクロ波を供給するために使用されてきた。

この加速管試験装置は、電子陽電子入射器の主加速器とは独立の運用がなされているが、ともに24時間の運用となっている。今年の前半は、X-バンドの高電界加速管の開発が計画され、来年には一方の遮蔽区画において SuperKEKB 向けの S-バンドの新規加速管の試験が行われることになっている。

X-バンド加速管の開発研究 (Nextef と呼ばれる) は、KEK と CERN の共同研究として2004年からこの場所で行われており [4,5]、今年度初めは、4月2日から6月末までの3ヶ月程度の連続運転を予定し

* <kazuro.furukawa@kek.jp>

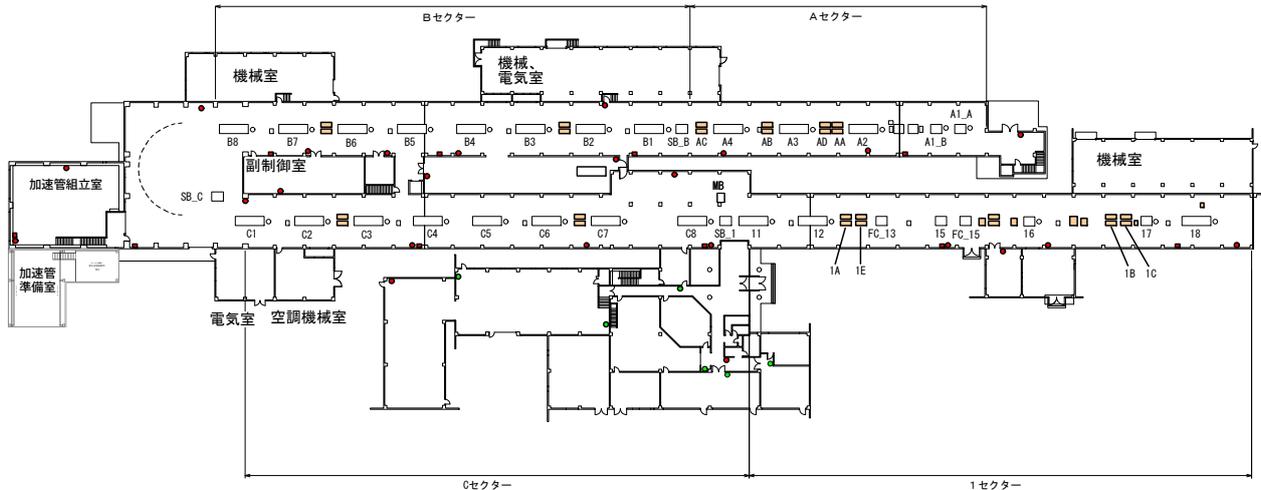


Figure 1: Southern one third of KEK electron positron injector building (the left hand side is south). The accelerator structure assembly room is adjacent to the south end of the injector building.

ていた。先に述べたように、並行して入射器本体では、SuperKEKBの衝突実験向けの入射運転が行われていた。

3. 加速管組立室の火災

今年度の X-バンド加速管試験の 2 日目、2019 年 4 月 3 日の 21 時、職員が加速管準備室と加速管組立室に立ち寄った際には正常な運転が行われていたが、21 時 44 分、加速管組立室において火災報知器の発報があった。職員 1 人が、発報場所近傍まで向かったが扉の向こう側が見えないため危険を感じ引き返し、再度当時の運転シフト担当職員を伴い、これらの職員 2 人が、発報場所の加速管組立室の扉を開けたところ大量の灰色の煙を確認し、21 時 48 分から 50 分にかけて消防を含めた関係者に連絡が行われた。さらにビームや主要電源の停止措置を講じた。このとき煙のため炎は確認されておらず、その後、外部の排気ダクトからの煙も確認された。

一方、加速管試験装置では、21 時 15 分にパルス変調器の充電異常で高電圧印加が自動停止するインターロックが作動した。遠隔での運転状況の監視によりこの状況に気付き、インターロックが解除できたため、21 時 25 分に再度高電圧を印加した。3 分ほど正常に運転できた後、クライストロンの放電異常により高電圧印加が自動停止するインターロックが作動した。10 分ほど待って再度インターロックが解除できたので、念のため充電電圧を下げ、21 時 39 分に高電圧印加を試みたが、今度はその直後に高電圧印加が自動停止するインターロックが作動した。確認すると、SMOKE と CUBICLE TEMP という初めて遭遇するインターロックであった。その後真空の悪化なども確認された。

22 時 15 分に入射器棟に消防が到着した後、最初に職員が開けた 1 階の高さの扉から加速管組立室内の階段を降りるよりも、加速管組立室の床面と同じ地階の高さの加速管準備室から侵入することが適当と考えられたために、消防士を加速管準備室の扉へ

案内した。加速管準備室のシャッターが熱くなっていないことや、放射線は既に発生していないはずなどの状況検討を入射器棟東側にて行なった。その後、消防士 6 人と放射線取扱主任者である放射線科学センター長が、放射線防護や酸素マスクの対策を行った上で、23 時 15 分ごろから現場に入り、放射線や熱などの危険が無いことが確認された (Fig. 2)。



Figure 2: A fireman entering into the burnt room.

当時、灰色の煙により視界は 2、3 メートルと思われる、床が煤で真っ黒になっていた。また、灰色の煙の一部は水蒸気と思われ高い湿度を感じた。その後搬入シャッター等を開放し、排煙がなされ、他の職員も現場に入れるようになった。この火災による人的被害は無かった。

加速管組立室内において、Nextef 加速管試験装置に大電力マイクロ波を供給するための大電力マイクロ波パルス変調器が焼損しており、他の装置には延焼はなかった。このパルス変調器は、13 年以上使用されてきたもので、内部にあるパルス形成回路 (PFN) のコンデンサからの発火が考えられている (Fig. 3, 4)。残念ながら最近変更した記録装置の不具合により、発火時の電圧波形など一部の情報が記録されなかったが、パルス形成のためのプラスティッ



Figure 3: Burnt pulsed high-power rf modulator.



Figure 4: Space where pulse-forming network was installed and burnt.

ク容器のコンデンサが寿命により破裂し、漏れた絶縁油が高電圧放電により着火したという可能性が指摘されている。

なお、22時過ぎから7トンの冷却水が失われたことがわかっており、パルス変調器の天井に配置されていた冷却水配管から、熱により冷却水が漏れ、鎮火させたと考えられる。

直接焼損しなかった機器も、大量の煤と水蒸気、さらに少量の塩酸などの化学物質により、加速管組立室内の装置はほとんどが動作できなくなった。汚染の除去回復作業を含め、復旧には1年またはそれ以上の時間を要すると考えている。

4. コンデンサ

Nextef のパルス変調器の PFN 回路においては、2010 年に 2 回のコンデンサ破裂を経験したため、電極の錫箔をアルミ箔に変更し、さらに溶接方法も変更して耐久性を改善したコンデンサに入れ換えていた。しかし、再度障害と火災を起こしたことにより、当面このタイプのコンデンサの使用は避けることとした。

ちなみに、今回 Nextef のパルス変調器で使用されていたコンデンサは Fig. 5 (左) のようにプラスチック容器であったが、電子陽電子入射器本体において同様の目的のために 60 台、20-40 年使用されている大電力パルス変調器のコンデンサは、セラミクスと金属の容器である。また、電位傾度 (誘電体の単位厚み当たりの印加電圧) について、Nextef の $52.8 \text{ V}/\mu\text{m}$ に対して入射器では $43.6 \text{ V}/\mu\text{m}$ と安全重視で余裕を持って設計されている。さらに破裂しないように防爆装置を備えている。



Figure 5: Capacitors of the Nextef modulator (right), and of the injector linac.

寿命に対する電位傾度の依存性は非常に大きいので、十分な寿命を得るためには電位傾度が低いことが必要であり、同時に誘電損失などのコンデンサの特性を定期的に監視することも重要である [6]。

5. 入射器本体への影響

加速管組立室と入射器棟建物は壁で隔てられているため、ある程度独立と考えられるが、入射器本体側から一部のマイクロ波・冷却水等が導波管や金属パイプを通して供給されている。そのため、マイクロ波及び冷却水の導入孔やシャッターの隙間から大量の煤が入射器本体側に侵入してしまった。このために、入射器本体運転に使用する高電圧機器や電子機器の健全性が損なわれ、装置の交換や回路内部の清掃・洗浄が必要となった (Fig. 6)。

しかし、煤を採集して簡易定性化学分析したところ、プラスチックの可塑剤として使われることの多い有害化学物質 (フタル酸ジオクチル) が、煤に付着して侵入していることがわかったため、作業時には有機溶剤向け防毒マスクや安全ゴーグル、全身防護措置を必要とし、かつ作業時間を記録保持することとなった。このため、当初は作業中の会話や相手の確認にも手間取ることがあった。また健康管理に注意を要した (Fig. 7)。後に定量分析により、有害化学物質はたいへん微量であることがわかった。

6. 入射器ビーム運転の回復

始まっていた SuperKEKB の衝突実験を中断し、放射光実験再開も 1 ヶ月後に予定されていたため、できるだけ早期の入射器運転再開が期待された。しかし、毎日新しい困難が見つかるような状況であり、



Figure 6: Carbon soot sneaked into injector components.

入射器火災復旧について (Linac Fire Recovery, April 2019)

- [ストレスイベント後の反応について \(安全衛生推進室、大井謙一様へ\) \(Response after stress event, May.10, NEW\) \[pdf\]](#)
- [電子線電子入射器の作業のみならず、環境安全管理、安全衛生推進室 \(J.Linac safety reminder, Jul.1, NEW\) \[pdf\]](#)
- [こころのケアについて \(安全衛生推進室、健康相談室\) \(Mental care, Apr.19\) \[pdf\]](#)
- [揮発性有機化合物調査結果と作業管理 \(環境安全管理室、安全衛生推進室\) \(Gas analysis and health care, May.27, NEW\) \[pdf\] : \[word\]](#)
- [従業員に対する作業管理の質問と回答 \(安全衛生推進室\) \(Gas mask and health care Q&A, Apr.21\) \[pdf\]](#)
- [従業員に対する作業管理と健康管理 \(安全衛生推進室\) \(Gas mask and health care, Apr.15\) \[pdf\]](#)
- [入射器射器構造測定結果と今後の作業における注意 \(Site assessment and recovery, Apr.17\) \[pdf\]](#)
- [化学物質情報検索 \(Chemical overview, Apr.6\) \[pdf\]](#)
- [化学物質情報 \(SDS\) \[pdf\] : \[Original link\]](#)
- [入射器入城安全検査 \(Linac safety, Apr.5, ORIGINAL\) \[pdf\]](#)
- [安全衛生推進室定例会報告 \(衛生管理室、安全衛生推進室\) \(Safety health inspection, May.9, NEW\) \[pdf\] : \[word\]](#)
- [安全衛生推進室定例会報告 \(衛生管理室、産業医事務所\) \(Safety health inspection, May.9, NEW\) \[pdf\] : \[word\]](#)
- [安全衛生推進室定例会報告 \(Safety inspection, Apr.11\) \[mail\] : \[word\]](#)
- [入射器 Beam 立ち上げ進捗 \(Linac restart progress, Apr.25\) \[pdf\] : \[excel\]](#)
- [入射器復旧作業進捗 \(Linac recovery progress, Apr.19\) \[pdf\] : \[excel\]](#)
- [入射器 Beam 立ち上げ進捗表 \(Linac restart progress overview, Apr.26\) \[pdf\]](#)
- [火災報知装置と加減速運転 \(Fire alarm and operation, Apr.19\) \[pdf\]](#)
- [施設復旧進捗 \(S18 recovery daily progress, Apr.26\) \[pdf\]](#)
- [施設復旧進捗 \(S18 recovery daily progress, Apr.26\) \[pdf\]](#)
- [サブ変電室復旧進捗 \(Substation recovery progress, Apr.26\) \[pdf\]](#)
- [対策会議結果と立ち上げ打合せ \(Recovery daily progress report, Apr.22\) \[mail\] : \[powerpoint\]](#)
- [対策会議結果 \(Recovery daily progress report, Apr.19\) \[mail\] : \[powerpoint\]](#)
- [火災について \(共同利用者の方へ\) \(KFK News\) : To KFK Users: On the fire, Apr.25 \(English\)](#)
- [火災について \(共同利用者の方へ\) \(KFK News\) : To KFK Users: On the fire, Apr.11 \(English\)](#)
- [火災について \(KFK Press release\) : Fire at Linac, Apr.4 \(English\)](#)
- [入射器入城手順 \(Linac entrance procedure, Apr.6\) \[pdf\]](#)
- [入射器階層図 \(Linac floor plan\) \[pdf\]](#)
- [Safety 情報 \(Safety fire photo\) \[pdf\] : \[Image 情報 \(Image fire photo\) \[pdf\] : 対策会議結果 \(Action item fire photo\) \[pdf\]](#)
- [火災概要 \(Incident overview slide, Apr.6\) \[pdf\]](#)
- [火災概要 \(Incident overview slide, Apr.5\) \[pdf\]](#)
- [火災概要報告 \(Incident overview 3-page report, Apr.6\) \[pdf\]](#)
- [詳細 Mail 共有情報 \(Linac update mail archive\)](#)
- [入射器復旧写真 \(Linac recovery photo archive\)](#)
- [緊急報告 \(Tentative report, May.18, NEW\) \[pdf\]](#)
- [時系列記録 \(Timeline\) \[html\]](#)

Figure 8: Web page to share essential information.



Figure 7: Intensive clean-up work continued for three weeks.

それぞれの解決に数日を要する事案も多く、毎朝全員による復旧作業進捗打ち合わせを持ち、夕方には各グループ責任者による打ち合わせを持ち、漏れがないような効率的な作業を心掛けた。また、情報交換のために、毎日 Mail による情報共有と、Web による情報集約、重要情報の入射器棟玄関での掲示を行った (Fig. 8)。

全ての機器を短期間で回復することは困難と判断されたので、夏の停止期間までの運用に必要な機器に限定した回復を計画した。火災の翌日 4 月 4 日から調査を始め、5、6 日には調達できた少数の防護具で、少人数による試験的な回復作業と、製造業者での故障修理のための運び出しに備えた機器の清掃を行った。8 日に追加の防護具が届くとともに外部からも協力を仰ぎ、全面的な回復作業を開始した。

徐々に機器への影響の評価が進み、加速管組立室に隣接するクライストロン組立ホールへの影響が最も大きかった。ホールの地下には 180 度ビーム偏向部 (J-ARC) があり、6 台の偏向電磁石はホールの 2 台の電磁石電源で稼働されている。ところがこの 2 台の電源の修理に 1 ヶ月以上を要する可能性があることがわかった。一方、予備の電源は 1 台だけ保有しており、エネルギーを下げれば、6 台の電磁石を稼働することができる。エネルギーを下げれば、入射器の後半部分での余裕がなくなり、クライストロンの障害により数日間運転を停止する可能性はあるが、影響の大きなホールの近くの大電力パルス変調器の立ち上げを回避することもできる。J-ARC のエネルギーを 1.5 GeV から 1.35 GeV に下げることにより、2 台の電磁石電源と 2 台の大電力パルス変調器の回復を回避することにした。

精力的な作業の結果、4 月 18 日には主な機器の低電力部の起動が可能となり、22 日から大電力部の電源を投入し、ビームの確認を始めた。25 日には SuperKEKB の HER の入射を試み、26 日に両リング入射、引き続き衝突調整を始めることができた。約 3 週間で運転を再開することができたことになる。衝突実験を継続しながら、連休後に当初の予定どおりに放射光実験も開始した。

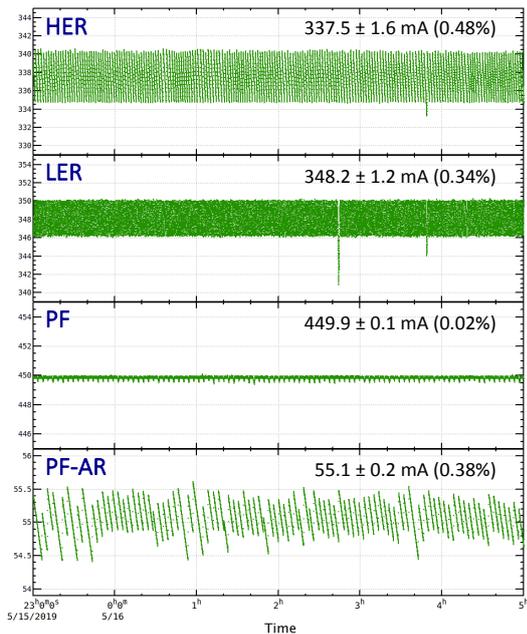


Figure 9: Stored beam currents and their standard deviations at 4 storage rings of SuperKEKB and light sources.

この後、LER と引き続いて HER の連続トップアップ入射の試験に成功し、DR とさらに昨年からはじめていた PF 及び PF-AR への入射と合わせ、4+1 の蓄積リング加速器への同時トップアップ入射に成功した (Fig. 9) [1, 7]。特に LER のビーム寿命が 30 分程度と短いため、同時トップアップ入射を始める前に比べ、順調な場合には 2.4 倍の衝突性能を達成することができた。

7. 火災の原因と対策

上にも記したように、火災の原因として、Nextef 大電力パルス変調器のプラスチック容器のコンデンサが破裂し、漏れた絶縁油が高電圧放電により着火したという可能性が高い。13 年間火災が無く運用されていたが、例えば寿命の検討など幅広い知見が必要とされると思われ、当面プラスチック容器を避け、電位傾度も安全設計を心がける。

より安全な設計の入射器本体の大電力パルス変調器においても、夏前の詳しい理解が進むまでの短期的な対策として、高電圧印加が自動停止するインターロックが作動した場合に、遠隔での状況把握だけでなく運転員が現場で状況を確認することとした。

人的・物的資源のバランスに配慮しながら、測定器や画像による監視装置の増設も進められている。

パルス変調器内に消火装置を備えている研究所も増えており、検討を始めた。絶縁油の特性から着火は爆発的ではなく、検出器の困難はあっても、効果は大きいと考えられる。

煤に対する事前の対策は充分でなかったため、被害を拡大させた。できるだけ境界からの煤の侵入を抑え、また、約 600 m の入射器棟建物内への複数の

隔壁設置の意見もいただいた。

化学物質の分析について、今回は火災の翌日から作業を始めたが、詳細な分析は通常 1 ヶ月を要する。回復作業に大きな影響があるので、想定実験などが必要かと思われる。

困難な回復作業の中で、特に肉体的・精神的な健康管理の重要性をしばしば感じた。当初からこのような多数の部門のさまざまな支援をいただいたが、通常は独立して機能している部門が、できるだけ密な連絡を行える臨時の組織を作ることが好ましいと感じた。

また、10 年を超えて装置を運用する場合には、元々設計時に想定した運用形態が失われる場合が見受けられ、能動的に設計思想を運用者に引き継ぐ必要性を感じている。

来年まで、回復作業が続くと思われるが、入射ビーム運転とバランスを取りながら、素粒子物理・放射光科学の実験への貢献も確保したいと考える。

謝辞

今回の火災について、各方面に多大な迷惑を掛けただにもかかわらず、機構内外からの献身的な支援をいただき、あらためて感謝したい。

参考文献

- [1] R. Zhang *et al.*, “Present Status of KEK Electron/Positron Injector Linac”, *these proceedings of PASJ'19*, Kyoto, Japan, 2019, paper FSP1003.
- [2] K. Furukawa *et al.*, “Injection operation into multiple storage rings at KEK electron/positron 7-GeV injector linac (II)”, *Proceedings of PASJ'17*, Sapporo, Japan, 2017, paper TUP006, pp.300–303; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/PDF/TUP0/TUP006.pdf
- [3] Y. Ohnishi *et al.*, “Start of phase 3 commissioning at SuperKEKB”, *these proceedings of PASJ'19*, Kyoto, Japan, 2019, paper FSPH008.
- [4] S. Matsumoto *et al.*, “High gradient test at Nextef and high-power long-term operation of devices”, *Nucl. Instrum. Meth. A* **657**, 2011, pp.160–167; doi:10.1016/j.nima.2011.06.062
- [5] T. Abe *et al.*, “Fabrication of Improved Quadrant-type X-band High-Gradient Accelerating Structures”, *these proceedings of PASJ'19*, Kyoto, Japan, 2019, paper WEOH04.
- [6] H. Honma *et al.*, “Improvements to the PFN capacitors for the klystron modulators of the KEK PF linac”, *Proceedings of Linear Accelerator Meeting 1989*, Nara, Japan, 1989, paper 8p-8P, pp.294–297.
- [7] K. Furukawa *et al.*, “Pulse-to-pulse Beam Modulation and Event-based Beam Feedback Systems at KEKB Linac”, *Proceedings of the IPAC'10*, Kyoto, 2010, paper TUOCMH01 pp. 1271–1273; <http://epaper.kek.jp/IPAC10/papers/tuocmh01.pdf>