

iBNCT 加速器の現状報告 2019

STATUS OF THE iBNCT ACCELERATOR IN 2019

杉村高志^{#A)}, 池上清^{A)}, 帯名崇^{A)}, 久保田親^{A)}, 栗原俊一^{A)}, 小林仁^{A)}, 佐藤将春^{A)}, 柴田崇統^{A)},
高木昭^{A)}, 高崎栄一^{A)}, 内藤富士雄^{A)}, 南茂今朝雄^{A)}, 方志高^{A)}, 福井祐治^{A)}, 福田将史^{A)},
二ツ川健太^{A)}, 本田洋介^{A)}, 三浦太一^{A)}, 宮島司^{A)}, 熊田博明^{B)}, 田中進^{B)}, 名倉信明^{B)},
松本孔貴^{B)}, 大場俊幸^{C)}, 小林 武^{C)}, 堀 利彦^{C)}, 矢部 伸浩^{C)}, 山口 晃典^{C)},
櫻山久志^{D)}, 豊島寿一^{D)}, 吉沢寿夫^{D)}, 長谷川和男^{E)}

Takashi Sugimura^{#A)}, Kiyoshi Ikegami^{A)}, Takashi Obina^{A)}, Chikashi Kubota^{A)}, Toshikazu Kurihara^{A)},
Hitoshi Kobayashi^{A)}, Masaharu Sato^{A)}, Takanori Shibata^{A)}, Akira Takagi^{A)}, Eiichi Takasaki^{A)}, Fujio Naito^{A)},
Kesao Nanmo^{A)}, Zhigao Fang^{A)}, Yuji Fukui^{A)}, Masafumi Fukuda^{A)}, Kenta Futatsukawa^{A)}, Yosuke Honda^{A)},
Taichi Miura^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Hiroaki Kumada^{B)}, Susumu Tanaka^{B)}, Nobuaki Nagura^{B)}, Yoshitaka Matsumoto^{B)},
Toshiyuki Ohba^{C)}, Takeshi Kobayashi^{C)}, Toshihiko Hori^{C)}, Nobuharu Yabe^{C)}, Akinori Yamaguchi^{C)},
Hisashi Sakurayama^{D)}, Toshikazu Toyoshima^{D)}, Hisao Yoshizawa^{D)}, Kazuo Hasegawa^{E)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} University of Tsukuba

^{C)} Nippon Advanced Technology Co., Ltd.

^{D)} ATOX Co., Ltd.

^{E)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

Ibaraki BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) Project has been developing a 8 MeV proton accelerator at the Ibaraki neutron medical research center (Tokai, Japan). A mission of the accelerator is to produce an intense neutron from the target located at the end of the beam line. These years we have been focused on to increase an average beam current by raising up a repetition rate of the beam. At the same time we have paid attention to the stability of the accelerator system.

Accordingly, we obtained an average beam current of 2.8 mA at the beam repetition rate of 100 Hz. As for stability, success rate of the irradiation test attained to 74 % at the average beam current of 2.1 mA. Some troubles dragged down integrated beam charge, but it count about 1000 C since last year.

1. はじめに

いばらき中性子医療研究センターでは、粒子線がん治療法の一つである加速器を用いたホウ素中性子捕捉療法 (Boron Neutron Capture Therapy, BNCT) の実施を目指し研究開発を行っている。このプロジェクトでは RFQ, DTL を用いて 8 MeV の陽子線を作り、これをベリリウム標的に照射して中性子線源とし治療に用いることにしており iBNCT (いばらき BNCT) 方式と呼んでいる。

ここで用いている、RFQ (Radio frequency quadrupole linac), DTL (Drift Tube Linac) は J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex, 大強度陽子加速器施設) で実績のあるものをほぼそのまま採用しているが、必要な中性子束を得るためには加速器のデューティーファクターを J-PARC より高くて運転する必要がある、この点においては、J-PARC と異なる対応が必要となっている。昨年度の報告以降も平均ビーム電流を上げる改良および調整を行い、また、加速器システムの安定性の評価を続けている。これらの研究開発を紹介すると共に、運転上の問題点等を報告する。

2. 昨年度報告後の改良

昨年度の加速器学会 (PASJ2018) では加速器の安定化運転のために加速管冷却系の改善と RFQ 真空排気系の強化について報告した[1]。ここでは、その後の進捗について述べる。

2.1 冷却系の強化

昨年の報告では、加速管冷却系のポンプを能力の大きなものに交換したところまで報告を行い、RFQ 本体の冷却配管の最適化については、実施予定となっていたが、予定通り冷却配管の最適化を行った。改造前では、RFQ の冷却水は RFQ 空洞中央部から入り上流側と下流側に分かれてそれぞれ、端部まで行き、端部で折り返して中央部に戻り排出される 2 グループのみであった (Fig. 1 (a))。これを上流部、中央部、下流部の 3 つのグループに分けそれぞれで、冷却水ヘッダーに接続することで、冷却水路を短くし並列化を行った (Fig. 1 (b))。またヘッダーとの接続について以前は 90 度の継手を多用した銅パイプで、配管していたため、空洞内部での圧力損失と同程度の圧力損失を起こしていた。これを、内径を拡大したシンフレックス配管に変更し、曲率 R を大きくとった配管とした。Table 1 に配管変更前後での流量変化を示す。この配管変更により、RFQ には 1.5 倍程度の冷却水

[#] takashi.sugimura@kek.jp

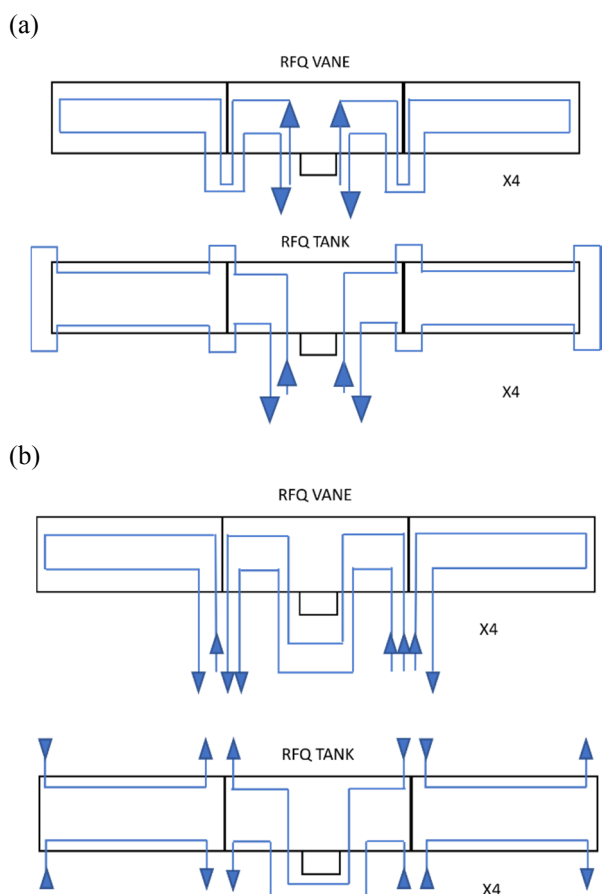


Figure 1: Schematics of the water flows in RFQ Cavity before parallelization (a) and after parallelization (b).

を流すことが可能になった。さらに DTL の冷却水量はもう少し減らして運転することが可能であり、それによる、DTL の RF trip などの副作用も見られないため、実運用では RFQ への冷却水量は 430 l/min を確保できている。昨年ポンプ改造前との比較では RFQ の冷却水量は 160 l/min で運用していたので、2.7 倍となる。

Table 1: Cooling Water Flow (l/min)

	Before parallelization	After parallelization	Present
Total	600	680	650
RFQ	220	330	430
DTL	220	220	130
Magnet	160	130	90

2.2 “高速”Quick Recovery の適正化

BNCT では J-PARC で採用している、RF I/L (インターロック) 発報時に 1 秒程度で復帰させる“Quick recovery” [2] をさらに高速化させた“高速 Quick recovery”の導入を試みていた。BNCT では RF I/L 発報時に RF が停止したことによる RFQ 空洞の温度変化が大きく、通常の

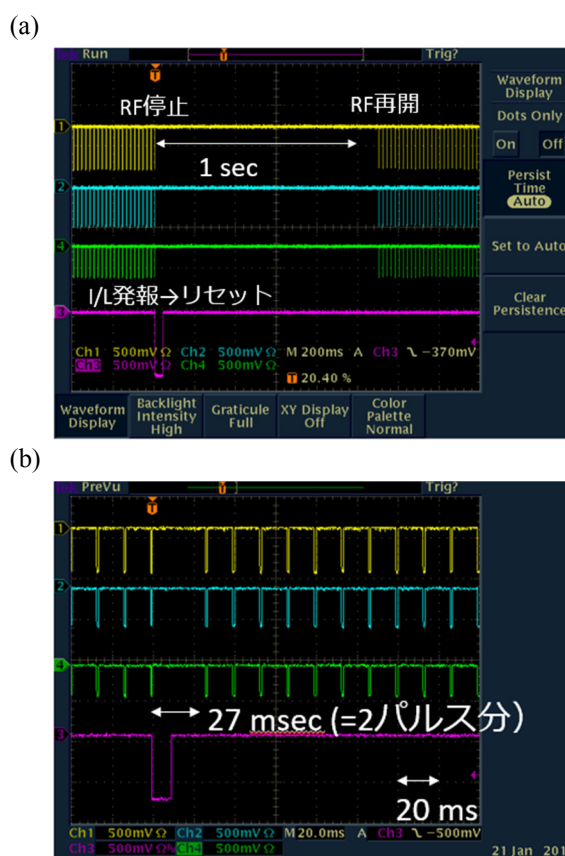


Figure 2: Waveforms of RF. (a) A wrong PLC setting causes 1sec time delay before recovery. (b) By the correct setting of the PLC, the RF recovers after interlock as expected.

Quick recovery での回復では復帰できずに、タンクレベルを下から定常まで上げなおすプロセスに 30 分以上かかる状況に陥ることが頻繁にあったため、数十 msec 程度の停止で、RF の再投入を行う“高速 Quick recovery”が必須であった。この実装は PLC 上のラダーで実現されている。当初 PLC の設定上の問題により、実際の復帰に 1 秒かかっていたために、“高速”動作にはなっていないが、問題が解決され、2 パルス後には復帰できることが確認できた。Figure 2 にこの様子を示す。これにより、Quick recovery の成功率が有意に上昇したことが確認できた。通常の Quick recovery は最初の I/L 発報後、他の I/L の発報状況などのログを記録し、その間に空洞の真空圧が下がることを期待して、1 秒後に復帰をする動作としているが、“高速 Quick recovery”ではこれらのことを放棄することで、“高速”性を獲得している。諸刃の剣であることを承知の上での選択であることは注意しておきたい。

3. 運転安定性とビーム電流向上

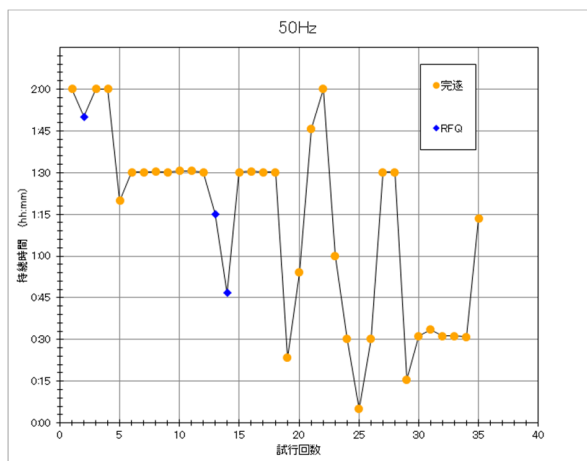
iBNCT では通常、運転安定性評価試験をおもに行っている。これは、加速器システムがどのくらい安定しているのかをユーザーである医療関係者に示すためのものであり、その平均ビーム電流で決められた試験時間(そのビームでの治療時間より少し多めの切りの良い時間)

ビームを出し続けることができるかどうかの試行を行うものである。但し、前述した Quick Recovery が成功した時はビームは出し続けていたものとして扱う。また、ビーム照射試験があるときは、長くても、短くてもユーザーのビーム要求時間を試験時間としている。

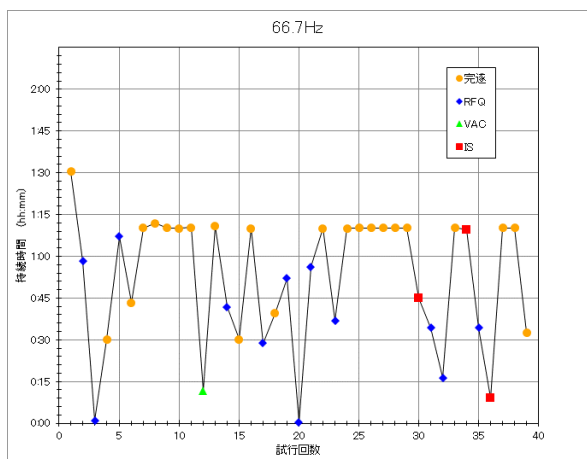
3.1 50~75Hz 運転

2018 年 10 月以降に実施したビーム繰り返し 50 Hz,

(a)



(b)



(c)

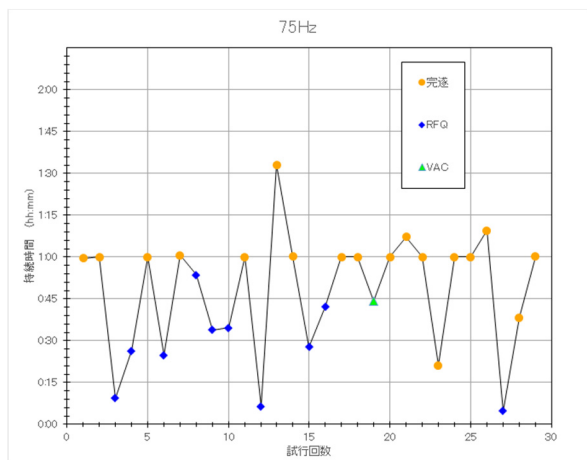


Figure 3: The results of stability evaluation.

66.7 Hz, 75 Hz での運転安定性評価試験の結果を Fig. 3 (a), (b), (c)にそれぞれ示す。50 Hz は平均電流 1.4 mA、66.7 Hz は 1.8 mA、75 Hz は 2.1 mA に相当する。50 Hz では後半に照射試験が行われたため、短時間での完遂が多くなっている。66.7 Hz と、75 Hz の試行 10 回目までについては、前述の Quick Recovery が 1 秒後の立ち上がりとなっていたために、完遂率が悪く RFQ でのダウンが目立っている。75 Hz の 11 回目以降“高速” Quick recovery が正常に働いている。75 Hz の 10 回目まで、完遂率は 40%であるが、11 回目以降は 74%となっている。“高速” Quick recovery の効果によるものと考えている。11 回目以降で失敗したものは RFQ 4 回、真空 1 回である。真空についてはターゲット前の BT ラインの真空圧力上昇によるもので、この付近に設置予定のターボポンプの購入が遅れ、排気装置なしの状態であるのが原因であり、今年度中には購入に漕ぎ付け問題を解消したい。RFQ については今後のコンディショニングの進捗により減少することを期待しているが、冷却系の冷却能力の限界に近い領域に差し掛かって、温度制御が発振する事象が発見されており、これらの改善によりより安定性の向上ができないか追究が必要である。完遂率 74%という値はまだ十分とは言えないが、75 Hz、平均電流 2.1 mA という運転条件は、今後の運転の標準条件となる可能性を持ったといえる。

3.2 100Hz 運転トライアル

2019 年 2 月に繰り返し 100 Hz での最初の運転試験を行った。Figure 4 にこの時のビーム電流変化を示す。緑色の線が、中性子生成標的直前の電流モニター値を示している。ビーム加速開始後はビーム幅を 400 μ sec とし、徐々にビーム幅を上げながら最終値 920 μ sec に到達したのち、30 分以上 2.8 mA を保っている。安定性評価試験としては 45 分を目標値としていたが、RFQ の I/L の発報による停止で終わっている。Figure 5 にパルス幅が 920 μ sec になったときの中性子生成標的直前の電流モニターの波形を示す。このパルスを含む 1 msec 間の平均電流値は 24.5 mA となっている。2017 年頃は、ビーム電流を上げた場合には数秒で、RFQ の I/L が発

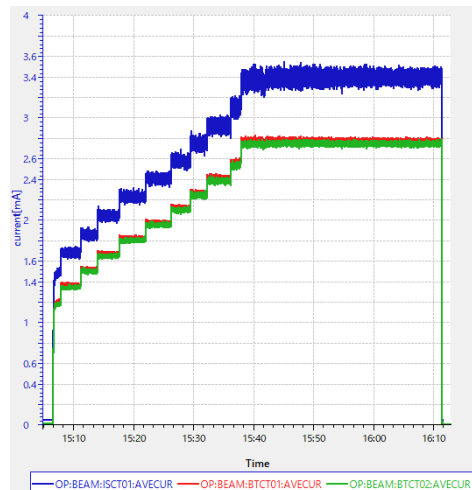


Figure 4: Beam current trend of the first 100 Hz trial. A green line shows the current in front of the neutron-generation target.

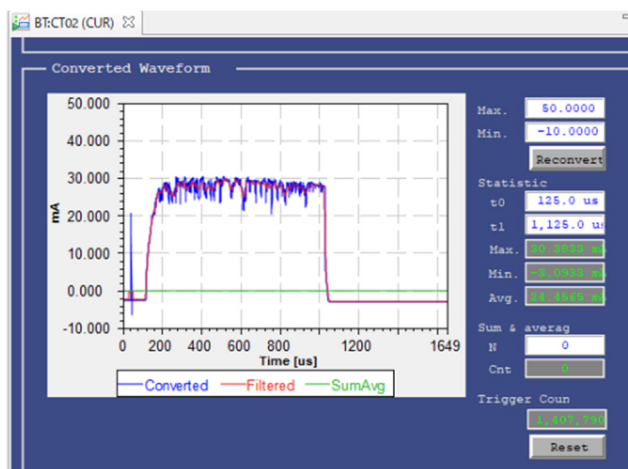


Figure 5: The Waveform of the CT (current transformer) in front of the neutron-generation target.

報して落ちていた状況であったので、最初の運転試験でいきなり30分以上も運転できるようになったということは、大きな進歩であると考えます。

4. トラブル事例

この1年の運転で経験したいくつかのトラブル事例について報告する。

4.1 MEBT PMQ3 アラインメントエラーとビームロス

昨年7月頃から、DTL 下流付近からその直後の90度偏向電磁石出口付近にかけてビームロスが問題となっていた。ロスモニターの出力波高が、2倍近くになっており、電磁石、空洞高周波、イオン源などの再調整を繰り返したが、波高は元に戻らなかった。RFQの冷却方法を変えたことによる、空洞の歪みも疑われたが、切り分けは現実的でなかった。結果としては、RFQ出口とDTL入口の間にあるPMQ(永久磁石四重極)が傾いて設置されていることが原因であった。アラインメントの修正後、ロスモニターの波高は7月以前のレベルに無事戻った。固定されて動かないはずという思い込みにより、原因究明まで半年以上かかってしまった。Figure 6に発見時の様子を示

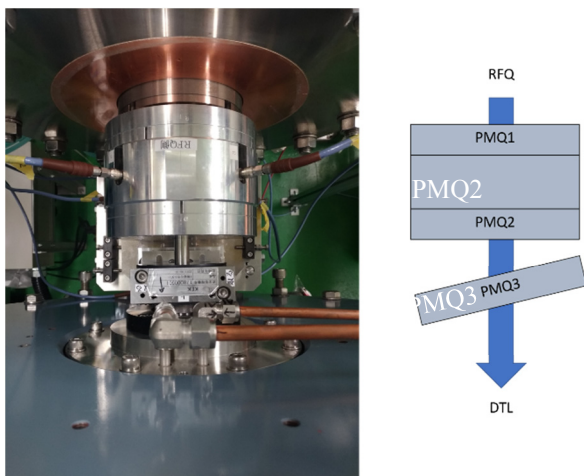


Figure: 6 A misaligned PMQ (left). Its exaggerated schematic drawing is shown in right.

す。よく見ると磁石の1つが斜めになっているのがわかる。

4.2 クライストロン用高圧電源故障

100 Hzでのビーム試験を行った翌朝、75 Hzで高周波による空洞のコンディショニング中にクライストロン用高圧電源の故障が発生した。症状は直流による高圧コンデンサの充電はできるが、そこからパルスを作れないというものである。少なくとも回路としてはIGBTによるパルスの切り出しをさせるためのゲート電圧が生成できていないことが判明している。Figure 7に故障が明らかになった基板の写真を示す。故障発生時は年度末であり、修理の予算が確保できないことから、メーカーへの修理依頼は4月に入ってから行われ、現在韓国のメーカーへパルス発生部が納められたオイルタンクごと送り返して修理を行っているところであるが、ビーム運転再開の予定は現在のところ未定である。

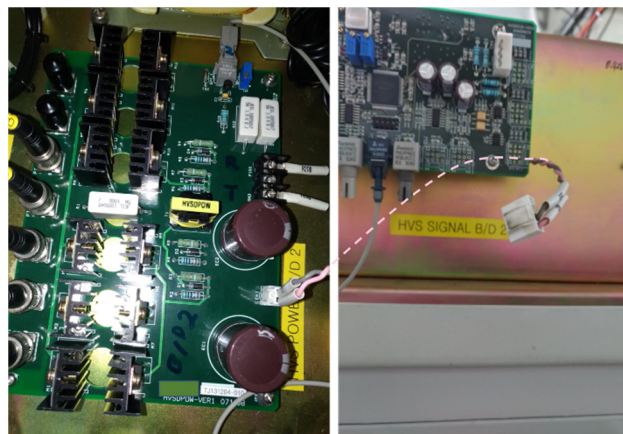


Figure 7: A damaged gate power board (left) and a soot-blackened connector from the board (right).

4.3 イオン源制御用 PLC 故障

iBNCTのイオン源は現在では加速器室に隣接するイオン源室に存在しているが、以前は加速器室内に存在していた。そういった歴史的経緯から、イオン源の制御ラックは加速器室内のMEBT横の壁際に置かれたままになっていた。おおむね安定して稼働していたが、数か月に1度程度の通信途絶が起こり、再起動で対処を行っていたが、昨年7月頃より、内部で稼働しているLinuxシステム用のコンパクトフラッシュの読み書きに異常発生し、新品と交換しても、2か月程度で読めなくなる事象が連続して発生した。加速器室内の中性子発生量が増えていることが原因であると考え、簡易的にポリエチレンによるシールドも設置をしていたが効果が見られなかったため、高圧電源の故障による停止期間を利用して、制御ラックをイオン源室に移動した。今後は同様の事象は起こらないと期待するが、平均ビーム電流をさらに増加させていく予定であるので、加速器室に設置せざるを得ない他の電子機器には注意が必要である。

5. 運転統計

現在までのiBNCTの運転積分電荷量をFig.8に示す。この1年については2月以降運転停止中であるので、ほぼ半年分の蓄積となるが、約1000 Cの電荷を標的まで

加速し、全積分量は 3000 C に迫っている。

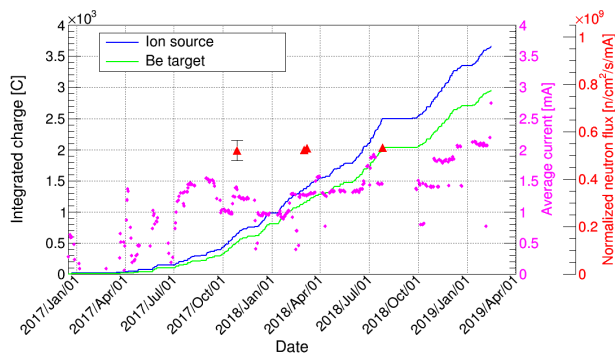


Figure 8: History of integrated charges and average current. A blue line shows integrated charge at the ion source, a green line shows the integrated charge at the target. Pink markers show maximums of the average current in 5 minutes. Red triangles show normalized neutron flux.

6. まとめ

iBNCT 加速ににおける昨年度からの改良について報告を行った。RFQ の冷却水水路の並列化により流量を 1.5 倍以上確保した。また Quick recovery を仕様通りに動作させることで、ビーム運転の完遂率が向上したことも確認し平均ビーム電流 2.1 mA の条件で、直近では 74% の完遂率となった。繰り返し 100 Hz での試運転では、30 分以上にわたり平均で 2.8 mA のビームの加速が行えることを示した。PMQ アライメントの狂いや、中性子によるイオン源制御系の故障については対応が実施済みとなった。今後のビーム運転の再開はクライストロンの高圧電源の故障修理の進捗状況にかかっている。

謝辞

iBNCT 加速器運転に際し、筑波大学病院関係者の皆様および、J-PARC 加速器の皆様には日頃からご協力ご支援いただいております。この場を借りてお礼申し上げます。

株式会社 ATOX の故大内利勝氏には生前 iBNCT プロジェクトに対して多大なる御尽力を戴きました。ここにこれまでの感謝のお礼を述べるとともに、ご冥福をお祈りいたします。

参考文献

- [1] Masaharu Sato *et al.*, "iBNCT 加速器の現状報告", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan. August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, pp.1350-1354.
- [2] H. Suzuki *et al.*, "PLC control of J-PARC Low Level RF System, Proceedings of the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, Wako, Japan, Aug. 1-3, 2007, pp. 513-515.