

iBNCT 加速器の現状報告 2023

STATUS OF THE iBNCT ACCELERATOR IN 2023

杉村 高志^{#,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)}, 南茂 今朝雄^{A)}, 方 志高^{A)}, 福井 佑治^{A)}, 福田 将史^{A)}, 二ツ川 健太^{A)},
三浦 太一^{A)}, 熊田 博明^{B)}, 田中 進^{B)}, 松本 孔貴^{B)}, 大場 俊幸^{C)}, 名倉 信明^{C)}, 豊島 寿一^{D)},
小栗 英知^{E)}

Takashi Sugimura^{#,A)}, Takashi Obina^{A)}, Chikashi Kubota^{A)}, Toshikazu Kurihara^{A)}, Hitoshi Kobayashi^{A)},
Masaharu Sato^{A)}, Takanori Shibata^{A)}, Akira Takagi^{A)}, Kesao Nanmo^{A)}, Zhigao Fang^{A)}, Yuji Fukui^{A)},
Masafumi Fukuda^{A)}, Kenta Futatsukawa^{A)}, Taichi Miura^{A)}, Hiroaki Kumada^{B)}, Susumu Tanaka^{B)},
Yoshitaka Matsumoto^{B)}, Toshiyuki Ohba^{C)}, Nobuaki Nagura^{C)}, Toshikazu Toyoshima^{D)}, Hidetomo Oguri^{E)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} University of Tsukuba

^{C)} NAT Corporation

^{D)} ATOX Co., Ltd.

^{E)} Japan Atomic Energy Agency

Abstract

The Ibaraki Neutron Medical Research Center is conducting research and development aimed at implementing Boron Neutron Capture Therapy (BNCT), one of the particle beam cancer treatment methods. The treatment machine (iBNCT001), which is being developed jointly by industry, government, and academia, led by the University of Tsukuba and the High Energy Research Organization, began nonclinical trials in the fall of 2021, and all of the initially planned trials were completed in December 2022. Physical measurement tests and other tests necessary before the start of clinical trials were conducted in parallel with the non-clinical trials, and all of these were completed in February 2023. Although there were some problems with the accelerator during this period, it did not affect the schedule of the nonclinical trials and fulfilled its responsibility to supply the beam. Relatively major troubles during this period included a semi-burnout of the ion source solenoid due to an operational error and a diode failure in the output section of the voltage droop compensation circuit of the klystron modulator power supply.

As for the performance of the accelerator, the long-awaited vacuum modification of the RFQ section was completed. This report describes the operation status of the accelerator described above.

1. はじめに

iBNCT は陽子線形加速器とベリリウム製の中性子発生標的を組み合わせた加速器中性子源を製作し、中性子線とホウ素薬剤を使ったがん治療法であるBNCTの実証を目指して進めているプロジェクトである[1-4]。加速器の構成としては、50 keV で引き出す、ECR とカスプのハイブリッドイオン源に 3 MeV RFQ と 8 MeV DTL を組み合わせ所定のビームエネルギーを得ている。加速されたビームは輸送系を通り中性子発生標的直前の拡大系でビームサイズを拡大させエネルギー密度を下げた状態で、ベリリウムターゲットに衝突する。ベリリウムターゲットで発生した中性子はモデレータにより減速し、治療に Figure 2 に示すように現在使用中の中性子発生標的 2 号機の積算電荷は 2023 年 6 月に 4400 C を超えた。この 1 年間での積算電荷量は 1100 C となる。ビーム運転時間が 150 時間であることから年間のビーム平均電流としても 約 2mA となっている。[1100(C)/150(時間)/3600(秒/時間)=2(mA)]。適切な~10keV 程度のエネルギーとなって、患者に照射されることになる。現在まで平均電

[#] takashi.sugimura@kek.jp

流 2 mA の陽子ビームを使って治験に向けた準備を進め、2022 年 12 月には、予定していた非臨床試験をすべて終了し、2023 年 2 月には臨床試験前に必要とする物理測定試験をすべて終了することができた。本報告では主に昨年度以降の運転状況や発生したトラブル、改良について報告をおこなう。

2. 運転統計

2.1 ビーム運転

Figure 1 にこの 1 年間の RF 印加時間と、ビーム運転時間の推移を示す。1 年間の総和は RF 印加時間が 850 時間、ビーム運転時間が 150 時間となっている。昨年度についてはそれぞれ 1200 時間と、221 時間となっているので減少傾向であるが、これは加速器のコンディショニングを常時行う必要がない程度には加速空洞が安定してきたので、節電のため運転時間を減らすことが可能になったことによるものである。

Figure 2 に示すように現在使用中の中性子発生標的 2 号機の積算電荷は 2023 年 6 月に 4400 C を超えた。この 1 年間での積算電荷量は 1100 C となる。ビーム運転時間が 150 時間であることから年間のビーム平均電流と

しても約 2mA となっている。[1100(C)/150(時間)/3600(秒/時間)=2(mA)]。

Figure 3 に非臨床試験、物理測定試験を含めた、ユーザー照射実験の際に加速器要因による、ビーム停止がなかったか、あるいは、クイックリカバリーと呼ぶ極短時間

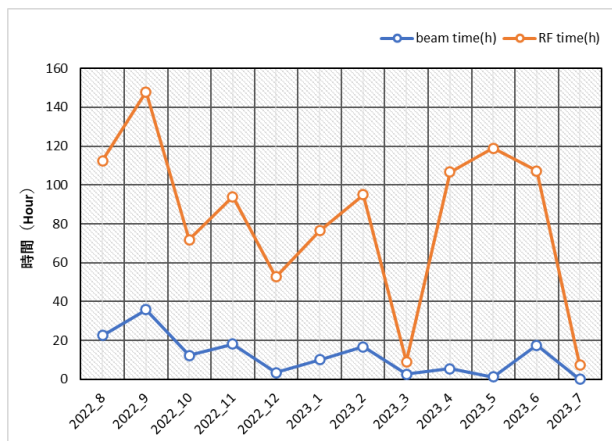


Figure 1: Monthly operation hours in the last 12 months.

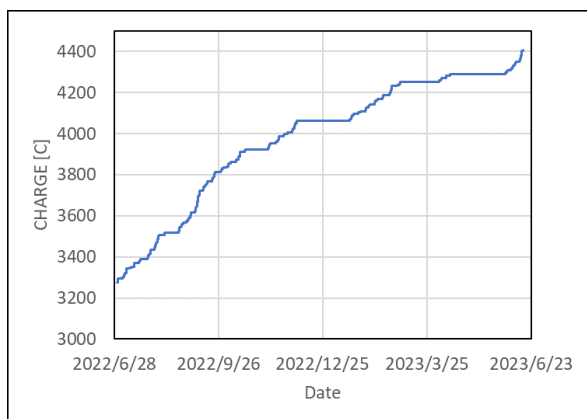


Figure 2: Accumulated beam charge on the target over the past 12 months.

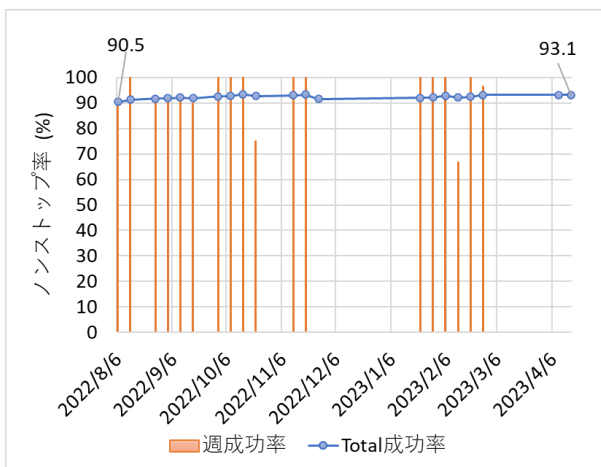


Figure 3: Weekly nonstop rate of user beam time (orange bar) and total nonstop rate for user time (light blue line).

でのビーム復旧(たいていは 1 秒以下)に成功した場合(以下、ノンストップという)の割合の週ごとの変化を示す。水色線は統計区間全体でのノンストップ率の遷移を示し、オレンジ色のバーはその週のノンストップ率を示す。この 1 年全体で見ればユーザーへのビーム供給において 93.1%の実験でノンストップを達成しており、偶然にも昨年の加速器学会報告とほぼ同じ結果となった(注:昨年の学会開催時期のずれにより一部統計区間の重複あり。)。加速器の停止が実験の失敗と等価でないことは明記しておく。追加の照射を行えばそれで事足りるかどうかは、実験の性質に依存するものであるため、加速器の統計としては、勘案せずに、ノンストップ以外は失敗として扱っている。

クイックリカバリーのきっかけとなる RF のインターロックの月ごとの発報回数と、RF の印加時間をインターロックの発報回数で割ったもの(以降、MTBF と呼ぶ)を 2022/7/1~2023/6/30 の期間についてプロットしたものを Fig. 4 に示す。2023 年 5 月に発報回数が増大しているが、これはその前月に RFQ の真空周りの改造作業を行った後のコンディショニングを行ったことによもので、6 月にはほぼ元通りに落ち着いている。

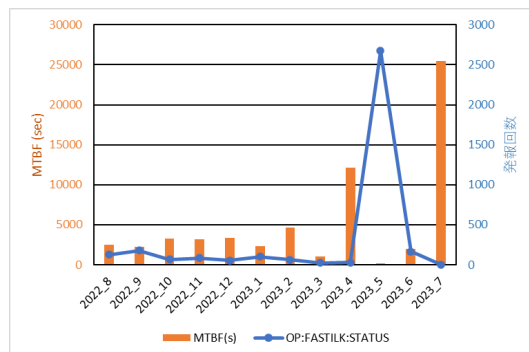


Figure 4: Trend of number of RF fast interlock in every month (light blue line) and MTBF (orange bar).

2.2 非臨床試験・物理測定試験

iBNCT は 2023 年度秋からの治験開始を予定しており、その前段階として 2021 年 11 月から非臨床試験を開始した。最大耐量試験、小核試験、一般毒性試験の照射を 2021 年度中に行い、続く 2022 年度に入ってから、細胞照射試験や、マウスによる有効性試験を実施し 2022 年 12 月にあらかじめ計画していたすべて完了した。ビーム照射時間の累積は 2021 年に 14 時間、2022 年に 40 時間であり、この間、非臨床試験において加速器トラブルなどによる試験条件の逸脱は一度もなかった。

中性子の強度分布などの治験開始前に必要な物理測定試験についても、非臨床試験と並行して実施し、2023 年 2 月には、予定していた測定をすべて完了することができた。

3. Upgrade

3.1 RFQ 真空ダクト改造

RFQ にはいくつかのイオンポンプが直接 RFQ の固定チューナーポートに取り付けられている(Fig. 5 左)。イオンポンプは稼働を始めて 10 年近く経過しており、不安定な挙動を示すものを交換したいと考えていたが、交換には RFQ(と DTL)の大気開放が必要であり、開放後 RFQ のコンディショニングに時間がかかることを憂慮し、次回大気開放して作業をするときにバルブを取り付けてそれ以降、RFQ の大気開放をせずに真空のメンテナンスができるように改造しようと計画をしていた。この 4 月によ

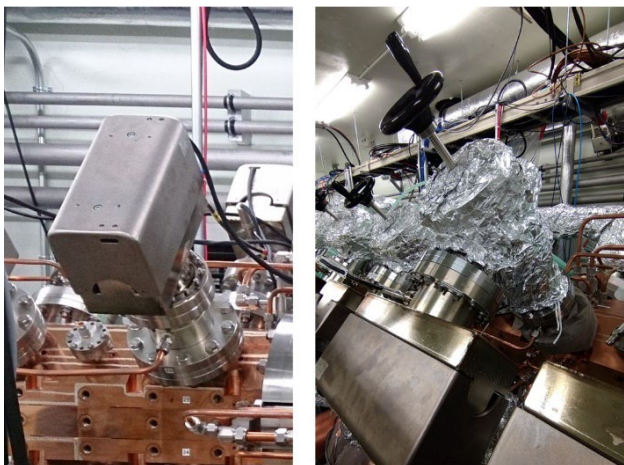


Figure 5: Ion pumps directly connected to the RFQ body (left). Ion pumps connected to the RFQ body via angle valve (right).



Figure 6: A large water pump for normal operation and small one for standby operation in a night.

やくこの計画を実施することが出来た(Fig. 5 右)。今後イオンポンプのメンテナンスを行いたいときにはバルブを閉じて真空系を切り離してから作業を行えるため、短時間で作業を終えることが出来、ビームタイムへの影響を少なくできるものと期待している。

3.2 冷却水夜間用ポンプ増設

iBNCT では昼間は必要に応じて RF 印加あるいはビーム照射を行い、夜間には加速器は停止状態で置いておくのが通常となっている。翌日加速器の立ち上げ時間が短縮できるように夜間にも加速管の冷却水を循環させて加速管の温度をある範囲に保つようになっているが、そのためにかかる電気代が、運転経費の中でかなりの割合を占めていることが問題となってきた。加速管冷却水ポンプは初期の 5.5 kW から現在では 22 kW まで増強されてきており、流量が増えたことで、温度変化が小さくなり加速器の安定化に貢献してきたが、その分消費電力も増加したことになる。夜間の停止時には水が循環してさえすればよいので、初期に使っていた 5.5 kW の小さなポンプを復帰させ現在の 22 kW ポンプと並列につなぎ、夜間の停止時と昼間の運転時でポンプを切り替えて運転することで夜間の消費電力を抑えようとするものである(Fig. 6 参照)。

4. トラブル対応

4.1 標的付近真空リーク

中性子発生標的の周辺部には中性子の反射材としてアルミのブロックが配置されているが、これらが標的を通じて標的上流にあるアルミボルトで結合された真空ダクトに荷重をかけている状態になっていた。このため、ビームによる加熱、冷却が繰り返されることで、アルミボルトの締結が緩み真空リークに至る事象が過去に何度か発生しており、昨年の学会においてリーク現象が確認され様子見をしていることを報告していた。様子見は 2023 年 6 月まで続けていた。それまではビーム照射後圧力が上昇することがあっても、たいていの場合において翌朝には 10^{-7} Pa 台には復帰していたのだが、6/15 以降、 10^{-4} Pa 台にとどまり以前とは違う様相を示すようになった(Fig. 7 参照)。アルミのねじ山を潰さないように 8.5 Nm まで増し締めを実施したが、リークが十分に止まり切ってい

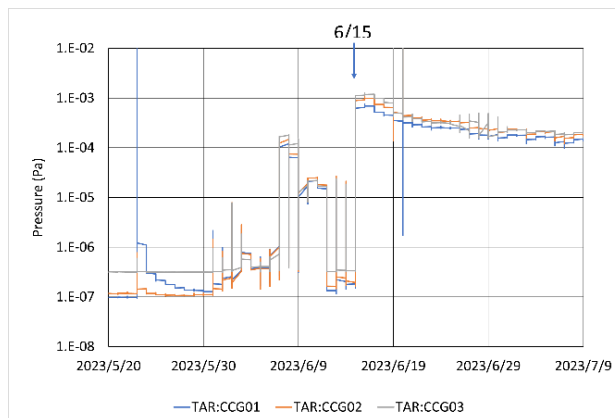


Figure 7: Trends of pressure near the target.

ないことが分かっている。しかしこれ以上増し締めすることには、慎重にならざるを得なかったため、少しずつビームを出しながら様子を観察しているところである。解決にはタクトの構造の見直しが必要であり、現在検討中である。

4.2 クライストロン高圧電源故障

クライストロン用のモジュレーター電源は大容量高圧コンデンサに蓄えた電荷を半導体スイッチで切りだしてパルスを作り出しているが、電荷の放出に従いコンデンサの電圧が低下すること(droop)は避けられない。そこで、droop 補償回路をコンデンサに直列に接続し、パルストップの電圧を平坦に保っている。

droop 補償回路の出力端に負荷と並列に入っているサージ保護用のダイオードとバリスタが故障し出力端子間が導通状態になるトラブルが発生した(Fig. 8 参照)。素子の予備品と交換することで無事に復旧できた。ダイオードは同一品を短時間で購入することが困難であったため、予備品があったことは幸運であった。



Figure 8: Broken varistors and diodes of droop compensation circuit.

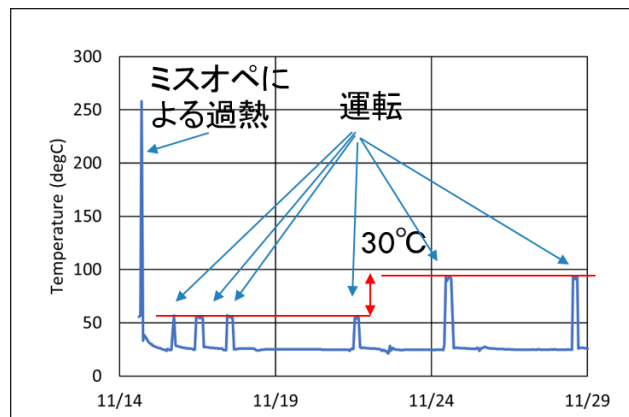


Figure 9: Temperature trend of the solenoid coil body. Since Nov. 24, when the coil was replaced, the temperature during operation has been higher, at about 90 °C.

4.3 イオン源ソレノイド過熱

イオン源ソレノイドコイルに通電したままソレノイドの冷却水を停止させてしまうミスオペレーションが発生した。約 25 分後に通電停止をした時のコイルの表面温度は 266 °C (Fig. 9 参照)であった。このコイルは銅のコイル線材と銅の冷却水パイプを伝熱率の高いエポキシ材料で固めたもので、エポキシの性質から、耐熱温度はそれほど高くない。冷却が十分に行われている場合には問題はないのだが、今回のように冷却水がない場合には破滅的結果となる(Fig. 10 参照)。冷却水のインターロックは用意していたつもりであったがコメントアウトされ、機能していなかった。このようなミスが重なってコイルのショートという事態になってしまった。コイルを取り出して調べたところ、ショートしたのは抵抗比で端から 6%の所とケースの間であることが判明した。同一の予備品はなく、少しパラメーターの違う別のコイルは新品のものがあったのだが、次のビーム供給までに交換してビームパラメーター調整をやり切れるか不安であったので、とりあえず、この加熱されてしまったコイルの 94%の方に通電できる状態に配線を手直してその週の実験を乗り切った。翌週もそのまま使っていたところ、コイルの電源電圧が通常 51 V かかるべきところが 36 V に下がったため、完全に故障したと判断し、別のコイルに交換することにした。ショートしたコイルと新しいコイルは巻き線数が違うので電流値を変更する必要があったが、実測した電流値と磁場の関係から、元のコイルの磁場に合わせた電流値を設定するだけで、ほぼ元のビームを再現することが出来た。冷却水の圧損が大きい仕様のため流量が取れず、使用時のコイル温度が 30 °Cほど上昇し 90 °C程度になっているので、



Figure 10: Black resin material can be seen seeping through the gap in the case of the damaged coil on the far side. The coil in the front side is a new one.

PASJ2023 TWSP13

樹脂配管の接続部での漏水を心配している。

4.4 RF 立体回路からの漏れ電波

324 MHz の RF が漏れている可能性について前回の学会で報告をしたが、その後の進捗については、今回まとめた発表 [5]がなされるので、詳細についてはそちらを参照されたい。

5. まとめと今後の予定

筑波大学と、KEK を中心とした産官学のプロジェクトである iBNCT は東海にある実証機で治験を行うことを目指し準備を進めてきており今年中に治験を開始する予定となっている。非臨床試験は 2022 年 12 月に完了し、その他必要な物理測定試験も 2023 年 2 月に完了した。この 1 年間での運転時間は例年よりやや少なめの RF 運転 850 時間、ビーム運転 150 時間となった。順調に非臨床試験をはじめとする BNCT 関連の試験へのビーム供給をこなしてきた。ノンストップ達成率は 93.1%となった。

今後は、治験開始に向けた準備を進めていく予定である。

参考文献

- [1] M. Sato *et al.*, “iBNCT 加速器の現状報告”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 1350-1354.
- [2] T. Sugimura *et al.*, “iBNCT 加速器の現状報告 2019”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 1210-1214.
- [3] M. Sato *et al.*, “iBNCT 加速器の現状”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online, Aug. 9-Aug. 12, 2021, pp. 585-589.
- [4] T. Sugimura *et al.*, “iBNCT 加速器の現状報告 2022”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, online (Kyushu University), Oct. 18 - 21, 2022, pp. 1148-1151.
- [5] M. Sato *et al.*, “iBNCT 加速器における 324 MHz 高周波漏洩対策”, presented at the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Aug.29-Sep.1, 2023.