

iBNCT 加速器の現状

STATUS OF THE iBNCT ACCELERATOR

杉村 高志^{#A)}, 内藤 富士雄^{A)}, 小林 仁^{A)}, 栗原 俊一^{A)}, 佐藤 将春^{A)}, 赤木 智哉^{A)}, 熊田 博明^{B)}, 田中 進^{B)}, 大西 貴博^{B)}, 大場 俊幸^{C)}, 名倉 信明^{C)}, 大内 利勝^{D)}, 櫻山 久志^{D)}, 山之内 諒^{D)}, 藤倉 昇平^{E)}, 高崎 栄一^{A)}, 穴見 昌三^{A)}, 三浦 太一^{A)}, 本田 洋介^{A)}, 帯名 崇^{A)}, 福田 将史^{A)}, 宮島 司^{A)}, 二ツ川 健太^{A)}, 方 志高^{A)}, 南茂 今朝雄^{A)}, 福井 佑治^{A)}, 高木 昭^{A)}, 柴田 崇統^{A)}, 池上 清^{A)}, 堀 洋一郎^{A)}, 魚田 雅彦^{A)}, 佐藤 吉博^{A)}, 嶋本 眞幸^{A)}, 丸田 朋史^{A)}, 劉 勇^{A)}, 川村 真人^{A)}, フェン チウ^{A)}, 長谷川 和男^{F)}, 三浦 昭彦^{F)}, 篠崎 信一^{F)}, 千代 悦司^{F)}

Takashi Sugimura^{A)}, Fujio Naito^{A)}, Hitoshi Kobayashi^{A)}, Toshikazu Kurihara^{A)}, Masaharu Sato^{A)}, Tomoya Akagi^{A)}, Hiroaki Kumada^{B)}, Susumu Tanaka^{B)}, Takahiro Onishi^{B)}, Toshiyuki Ohba^{C)}, Nobuaki Nagura^{C)}, Toshikatsu Ouchi^{D)}, Hisashi Sakurayama^{D)}, Ryo Yamanouchi^{D)}, Shohei Fujikura^{E)}, Eiichi Takasaki^{A)}, Shozo Anami^{A)}, Taichi Miura^{A)}, Yosuke Honda^{A)}, Takashi Obina^{A)}, Masafumi Fukuda^{A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Kenta Futatsukawa^{A)}, Zhigao Fang^{A)}, Kesao Nanmo^{A)}, Yuji Fukui^{A)}, Takagi Akira^{A)}, Takanori Shibata^{A)}, Kiyoshi Ikegami^{A)}, Yoichiro Hori^{A)}, Masahiko Uota^{A)}, Yoshihiro Sato^{A)}, Masayuki Shimamoto^{A)}, Tomofumi Maruta^{A)}, Yong Liu^{A)}, Masato Kawamura^{A)}, Qiu Feng^{A)}, Kazuo Hasegawa^{F)}, Akihiko Miura^{F)}, Shin-ichi Shinozaki^{F)}, Etsuji Chishiro^{F)}

^{A)} KEK, High Energy Accelerator Research Organization

^{B)} University of Tsukuba

^{C)} Nippon Advanced Technology CO., LTD.

^{D)} ATOX

^{E)} University of Tokyo

^{F)} JAEA/J-PARC

Abstract

The proton linac, which consists of the 3-MeV RFQ and the 8-MeV DTL, in the Ibaraki Neutron Medical Research Center has commenced official operations in February 2017. It is used for production of the intense neutron flux for the Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). Various improvements in subsystems have been introduced on the linac in the past year. Average beam current of 1.39 mA has been achieved as a result. The status of the accelerator is summarized in this report.

1. はじめに

茨城県いばらき中性子医療研究センターでは、8 MeV 陽子加速器と Be 標的を用いて中性子を発生させ、BNCT (ホウ素中性子捕捉療法) を用いたがん治療の研究を行うことになっており、加速器の建設及び調整を進めてきた[1]。

2017 年 1 月には放射線発生装置の施設検査に合格し、2 月からは放射線施設使用を開始した。

この加速器は RFQ と DTL の 2 個の空洞を持ち、1 つのクライストロンから高周波電力を分配して供給している。これらの空洞の基本設計は J-PARC リニアックの RFQ2 号機及び DTL と同一であるが、BNCT のために要求される中性子強度を達成するために、平均電流で 2 mA 以上のビーム電流が要求されている。そのためにはビーム繰り返し最大 200 Hz、ビームパルス幅最大 910 μsec と、J-PARC での運転実績に比べ、Duty factor が非常に大きい状態で運転されることが大きな相違となっている。ま

た、将来病院内に設置することを想定し冷却水の流量を減らすために、加速管内での冷却水の温度上昇を 10 °C 程度まで許容するという挑戦的な排熱設計を採用していることも大きな特徴の一つといえる。

ビームの安定供給に関し治療サイドからは患者一人当たりの治療時間 (約 1 時間) は安定に運転できることを要求されており、現在、主なビーム中断の原因となっている空洞のトリップに関して真空装置の増強と空洞のコンディショニングによる改善を図っているところである。

ここでは、8 MeV 陽子加速器施設の現状について紹介する。

2. マルチカスプイオン源

昨年、放電トラブルにより、軸上磁場イオン源から、以前使用していたマルチカスプイオン源に戻した後、課題であった、プラズマ点弧の安定化に取り組んできた。その対策の一つとして、イオン源ソレノイド磁場の延長があげられる。それ以前のソレノイドは全長が 81 mm で、プラズマチャンバー内の全域をカバーするには短い形状で

[#] takashi.sugimura@kek.jp

あり、RF 入力部付近には軸磁場を十分に発生することができなかつた。新規に全長が 162 mm のソレノイドを製作し、置き換えを行った。これにより、RF 入力部付近における磁場の欠損部をなくすることができるようになった。3次元電磁界解析ソフトウェア CST によるシミュレーションの結果では、電子閉じ込め時間は、 2.6×10^{-7} sec から 3.0×10^{-6} sec へと 1 桁程度大きくなることが示されている [2]。また、点弧に当たっては、 H_2 ガスとともに Ar ガスを一時的に導入することで点弧を安定化させるを行っているが、これらの操作を制御スクリプトで行うことで、安定化、時間短縮を実現することができた。

現在のところ、スクリプトを実行することで、誰でもプラズマ点弧を行うことができるようになった。スクリプトの開始から、ビームの発生を確認し、Ar ガスのバルブを閉じるまでの時間は、2 秒間(典型値)である。

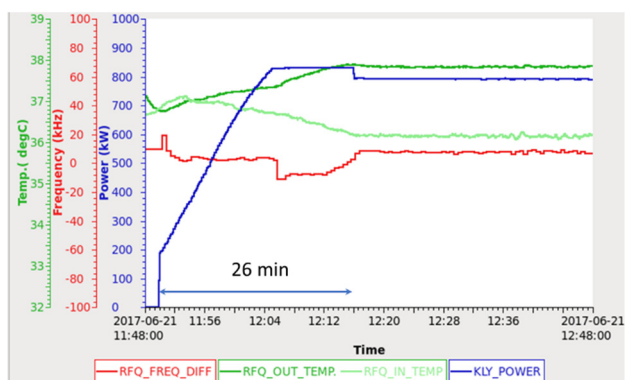


Figure 1a: A trend display of script control method. A blue line shows klystron output power. A red line shows a RFQ resonant frequency difference from 324 MHz. Green lines show an inlet water temperatures and an outlet. The control script starts at 11:49 and ends at 12:15.

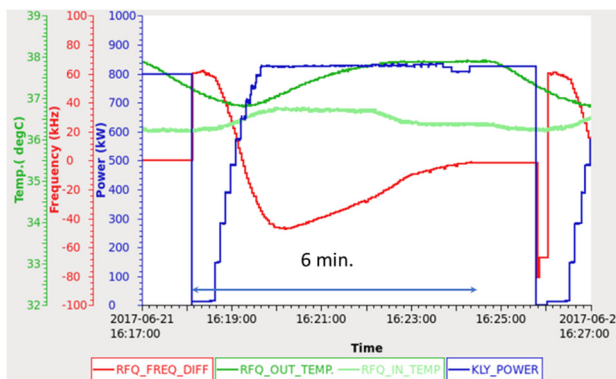


Figure 1b: A trend display of frequency modulation method. The method starts at 16:18 and ends at 16:24.

3. LLRF (Low-Level RF)

昨年、加速空洞の RF 制御に J-PARC で開発された LLRF を導入した。J-PARC では RFQ や DTL といった

単一空洞あるいは SDTL などのように非常に RF 特性の似た 2 つの空洞をそれぞれ 1 つの LLRF で制御して空洞 RF の振幅と位相の安定化を実現しているが、iBNCT では 1 本の Klystron 出力を分割して、RFQ と、DTL という Q 値など RF 特性の全く異なる空洞に供給しており条件が大きく違う。このため制御パラメーターの設定は J-PARC とは異なっている。また、iBNCT の加速管の冷却は将来病院に導入することを考慮し、冷却水流量をできるだけ減らし、加速管の入り口と出口での冷却水温度差を 10 °C 程度まで許容する設計となっている。このため、RF の投入開始から定格電力到達するまでの温度変化による共振周波数のずれが、可動チューナーを持たない RFQ では無視できないほど大きくなり、RF の投入には何らかの手法が必要になる。現在 iBNCT では主に 2 種類の方法を試みている。1 つはスクリプト制御により冷却水温度の入口と出口の平均が、常に一定の温度になるよう制御された条件下で、入力電力をゆっくり増加させ、熱平衡状態にできるだけ近い条件を守りつつ、定格電力まで到達させるやり方であり、Figure 1a に示した場合には RF の印加開始から 26 分後に定格状態に到達している。もう一つは、DTL のチューナーを RFQ の共振周波数に合わせるように制御しつつ、LLRF での出力 RF の周波数を DTL の共振周波数に変調させて、比較的短時間(数分程度)で、定格電力まで投入して最終的に温度が目標温度に近づいたときに周波数を 324 MHz に固定する方法であり Figure 1b に示した場合には 6 分で、定格状態に達している。前者は主に空洞のコンディショニングの際に利用しており、後者は実際のビーム利用の際にダウンタイムをできるだけ短縮する目的で利用することを目指し調整を行っている。

4. RFQ

iBNCT の加速器運転時におけるインターロック (I/L) 発報のかかなりの部分は RFQ の RF の反射過大である。すでに述べたとおり、iBNCT では冷却水量が少なく、I/L 発報により、RF が停止した際の温度変化が大きい。そのため、発報直後に I/L をリセットして RF の投入を試みても (LLRF 制御 PLC に組み込まれた Quick recovery 機能 [3])、共振周波数のずれにより継続できないことが多くの場合にみられる。この場合には、電力を下げて RF を印加し、そのうち定格電力まで上げるという手順が必要となり、中断時間の長さがビーム供給運転では問題になっている。RF の再開の方法については前章で述べたが、RFQ での放電を少なくする対策についてこの章で述べる。

4.1 空洞コンディショニングの履歴

iBNCT は 2016 年 12 月に放射線発生装置の施設検査を受け、翌 1 月に合格したが、この施設検査に先立ち 11 月から現在に至るまで、空洞のコンディショニングを適宜行ってきている。Figure 2 に 2 月から 7 月までのコンディショニングの履歴を示す。縦軸は 1 日の最大持続時間を示している。3 月までは順調に最大持続時間が伸びているが、4 月後半以降不調がしばらく続いた。不調の始まりは 4/19 にあった停電であった。停電は 2 秒ほどで

復電したものの、真空系のモニターが復旧した時には空洞内の真空は 1 Pa 程度であった。これ以降、制御系の復旧などを行って、ビーム運転を試みたが RFQ の RF 反射の I/L 多発により、安定運転ができなくなり、以前には達成できた時間には全く届かなくなった。

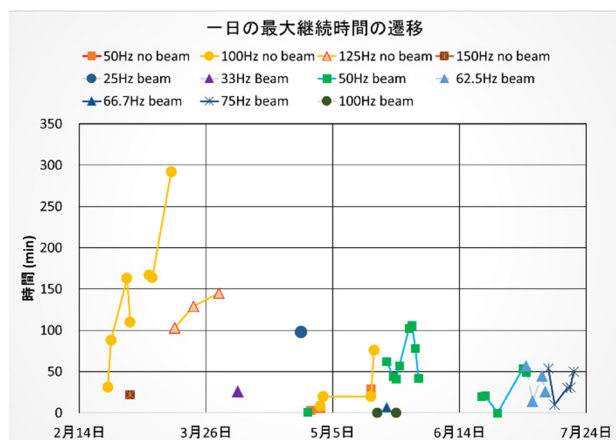


Figure 2: History of maximum duration time of a day.

4.2 RFQ 真空系強化

RFQ の不調に対して、真空系の強化を試みた。1 つは、イオン源から流れ込む水素ガスの排気速度を高める目的で、RFQ の上流部付近にターボ分子ポンプを設置した。これは不調になる前から、水素ガスへの対応として準備していたもので、設置のちょうどいい機会であった。もう一つは、RF コプラー付近の真空排気の強化のためのもので、コプラー付近の 2 つのポートに NEG ポンプを設置した。週末など運転を数日停止したのち運転を再開すると空洞が不調になることが頻発したため、J-PARC の RFQ で同様の現象が起きたときに、コプラー付近の圧力上昇が観察されていたことから、iBNCT では対策を行った。Figure 3 に NEG 増設前後の RFQ 真空圧力の比較を示す。増設後、真空圧力が下がっていることがわかる。

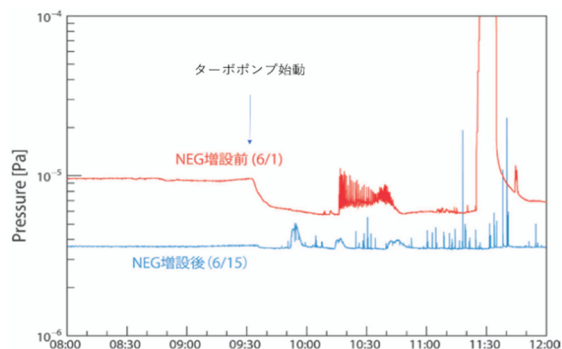


Figure 3: A comparison of vacuum pressure in RFQ between the before (red line) and the after (blue line) installation of NEG pumps.

4.3 RFQ 内面付着物

上記の真空系の取り付け作業を行った際にフランジ内面をアルコールで拭いた不織布が、黄変する現象が見られた。油によるものと考えられたため、不織布についての物質の化学分析を行った。不織布の付着物をヘキサンに溶解しヘキサンを蒸発させた後、残った有機成分にたいして赤外分光法を用いて吸収スペクトルを観測した。Figure 4 に得られたスペクトルを示す。これらのスペクトルと同様のスペクトルを持つ物質としては、切削油や自動車のエンジンオイルなどが相当する。iBNCT で使用している真空ポンプには油を使用したものはなく、付着物がどの過程、経路で混入したかは現在のところ全く不明である。

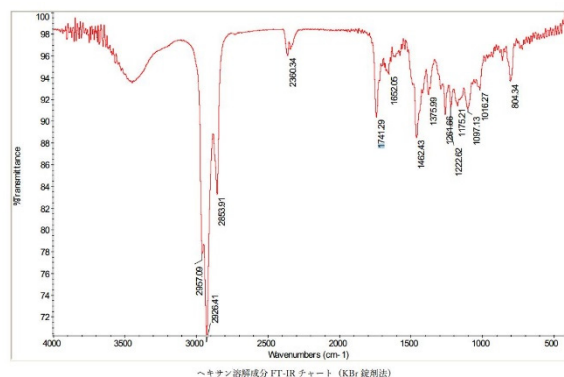


Figure 4: An infrared absorption spectrum of sample taken from inside RFQ.

4.4 Q-Mass 分析

RFQ 内面の真空の分圧を知るために RFQ の下流のポートの一つに四重極質量分析器 (Q-Mass) を取り付け、RFQ 内の分圧の観察を適宜行っている。トレンドの例を Figure 5 に示す。#12, #15, #28, #44 など炭素系のフラグメントと推定される分子の分圧が、ビーム加速時、放電時などに増加しているのが見られる。

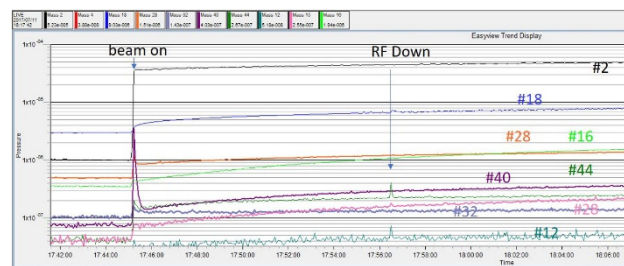


Figure 5: A graph of partial pressures during beam acceleration.

4.5 反射波形

RFQ の不調の原因を追究するためにオシロスコープ

を設置し、RF 波形を重ね書きさせて、波形を観測した。単なる空洞内での放電ではない異常波形がいくつか観察された。反射異常等を検知して I/L を発報させるユニット (VSWR メーター) の故障も考えられる状況であるので、VSWR メーターを別のものに交換して経過観察中である。観察される異常波形の種類は減ったが、現在でも観察される異常と考えられる波形の例を Figure 6 に示す。



Figure 6: Aberrant waveforms remained today. The yellow shows tank level of RFQ. The cyan shows reversed RF power (Pr) from RFQ. The magenta shows DTL tank level. The yellow-green shows Pr from DTL.

Figure 6 上段では、すべてのタンクレベルが時定数に従って減衰しており、RF の放電が起こった痕跡が見られない。中段では、RFQ 振動のタンクレベルが振動しながらほぼ時定数に添って減衰している。下段ではタンクレベルが跳ね上がり、その後急速に減衰していく様子が見える。こういった異常波形が発生する原因の追究を現在行っているところである。

5. 実標的でのビーム調整

ビームのプロファイルを測定するためにビームライン上にはワイヤースキャナーと、蛍光板が用意されているが、ビーム強度が上がってきた現在では、モニターの損傷が懸念され、気軽に使える状況ではない。そこで、ビームのプロファイルの調整には、中性子発生用の Be 標的の裏面に取り付けてある 9 本の熱電対を利用している。9 本の熱電対は 14 cm 角のターゲットの中心と、 $\phi 40$ mm、 $\phi 80$ mm の 2 個の円周上の上下左右の 4 か所に配置している (Figure 7 参照)。これらの熱電対から得られた温度上昇を強引ではあるが 2 次元のガウス関数でフィットし、平均と、分散を得て、これらをビーム中心と、広がり の指標としてビームの調整を行っている。各点の温度上昇は標的の破壊を防ぐ重要なパラメーターであり、これらを観測することと、プロファイルを測定することが同じ測定であることは、常に標的に注意が向けられるため、標的の破壊を防ぐという意味で非常に有益である。

```
== fit result (2017/04/19 11:51:20) ==
temp Diff : [ 0.6 0.7 0.4 1. 0.4 0.1 0.2 0.1]
PeakAmp : 0.86 [degC] (plot color vmax=7.0)
Center : ( -1.33, -9.83) [mm]
Size : ( 35.23, 49.31) [mm]
```

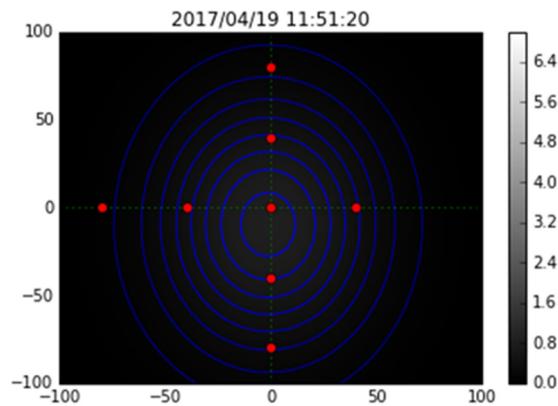


Figure 7: A example of 2D-gaussian fit and its contour plot.

6. 実験へのビーム供給

2017 年 5 月に細胞への中性子照射実験のため、ビーム供給運転を行った。この時期は停電以降の不調時期に重なっており、安定とは程遠いビーム供給であった。要求されたビームは平均ビーム 1 mA、30 分を 2 回行う

ものであったが、途中、何度かの RF I/L 発報が発生し、ビーム供給が中断された。この実験は中断の無いことが必須要件ではなかったため、実験を終えることができた。

これが iBNCT での最初の生物実験となった。この後、先に述べた改良、調整等により、最近では、ビームパルス幅 850 μsec 、繰り返し 75 Hz の条件で、平均 1.39 mA の運転を行えるようになった。Figure 8 にこの時の標的直前の CT(current transformer) モニターの波形を示す。7 月には、金箔を標的とした中性子実験を行い、平均 1 mA のビームで 50 分以上の連続ビーム照射を行えた。

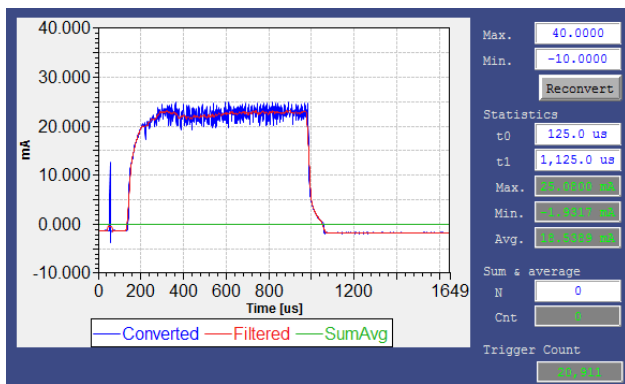


Figure 8: Waveforms from a CT installed in front of the target. A beam current exceeds 20 mA at the flat top.

7. まとめと今後の予定

iBNCT では放射線発生装置の施設検査に合格し、施設使用を 2017 年 2 月から開始し、5 月には初の生物実験へのビーム供給を行った。昨年から引き続き、イオン源のプラズマ点弧の安定化や、LLRF システムの調整、フルビーム幅でのビーム調整を行うことができるようになるなど、加速器の完成度が高まってきた。停電をきっかけとする空洞の不調に見舞われたが、現在はその原因の究明と対策を進めてきており、平均 1.39 mA のビーム出力も可能になった。今後も生物実験等へのビーム供給を行いつつ、加速器の性能向上を図る予定である。

参考文献

- [1] F. Naito *et al.*, “iBNCT 用線形加速器のビームコミッションング”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug. 8-10, 2016, pp. 1244-1246.
- [2] S. Fujikura, “BNCT 用陽子加速器開発におけるカusp 磁場 ECR イオン源の研究”, 平成 29 年修士論文, 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻.
- [3] 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.

謝辞

RFQ 内面の付着物の化学分析に当たっては、KEK 放射線科学センターの平雅文氏に多大なる御協力をいただきました。RFQ の不調に関して、J-PARC リニアックの空洞グループから様々な貴重な助言をいただきました。ここにお礼を申し上げます。