

神奈川県立がんセンターにおける重粒子線治療の現状

PROGRESS REPORT OF CARBON THERAPY IN KCC

竹下 英里^{#,A)}, 蓑原 伸一^{A)}, 草野 陽介^{A)}, 山田 聡^{A)},
古川 卓司^{B)}, 水島 康太^{B)}, 原 洋介^{B)}, 早乙女 直也^{B)}, 丹正 亮平^{B)}, 皿谷 有一^{B)}, 野田 耕司^{B)}
Eri Takeshita^{#,A)}, Shinichi Minohara^{A)}, Yohsuke Kusano^{A)}, Satoru Yamada^{A)},
Takuji Furukawa^{B)}, Kota Mizushima^{B)}, Yousuke Hara^{B)}, Naoya Saotome^{B)},
Ryohei Tansho^{B)}, Yuichi Saraya^{B)}, Koji Noda^{B)}

^{A)} Kanagawa Cancer Center

^{B)} National Institute of Radiological Sciences

Abstract

As part of the Kanagawa “Challenge-10-year strategy to cancer” it was decided in March 2005 to establish a carbon-ion therapy system at the Kanagawa Cancer Center (KCC). After about 10 years of this decision, construction of the main building for the acceleration and treatment devices has been started and completed in October 2014. Various treatments for cancer, which include the present photon LINAC for the radiation therapy, will be provided to patients in cooperation with our cancer center hospital. In addition, we will combine a compact dissemination treatment system of carbon-ion therapy to the pencil beam 3D scanning technique designed by the National Institute of Radiological Sciences (NIRS). From December 2015, the treatments were started as a clinical trial. The real treatments have been performed from February 2016 as advanced medical care. In the next step, we plan to treat the lung and the liver cancer using the respiratory gated irradiation technique. In this paper, we report the status of our facility and the progress on the commissioning of the respiratory gated irradiation at KCC.

1. はじめに

神奈川県立がんセンター(KCC)では2005年に重粒子線治療装置の導入が決定し、約10年後の2014年10月に重粒子線治療施設(i-ROCK)が竣工を迎えた。i-ROCKはKCC病院棟に隣接しており、光子線治療を含め外科的切除や化学療法を交えた、患者毎に最適かつ総合的ながん治療を提供する場として県内外から注目を集めている。2015年12月には臨床試験としての治療を開始し、翌2016年2月からは先進医療での治療照射を始めた。現在は、治療室2(水平・垂直コース)および治療室1(水平コース)を用いて治療を行っているが、残る治療室3および治療室4についても来年度初頭の稼働を目指し装置コミッショニングを実施中である。肺や肝臓などの呼吸性移動をとまなう部位については、患者の呼吸波形に同期して照射する、いわゆる呼吸同期照射を採用する。呼吸同期照射では、呼吸波形の取得手法や、治療計画時にその動き量をマージンとしていかに考慮するかなど、さまざまなシステム含んだ総合的なコミッショニングが必要となる。以下、施設全体の現状を報告するとともに、呼吸同期コミッショニングの結果を示す。

2. 2015/2016年度上半期運転実績

2.1 日々の運転体制

装置全体(入射器・MEBT・シンクロトロン・HEBT・照射室内機器)は朝6時半に一括操作により立ち上げが開始され、本体室や各部屋の見回り点検を実施したあとシンクロトロンの運転パラメータやビーム強度の再現性など

を順に確認する。室内機器も同様に目視点検を実施し、照射室へのビーム導入が可能となった段階でデイリーQAを実施する。以下にデイリーQA項目を示す。

- 全エネルギー11種について、照射室アイソセンタにおけるビーム位置のズレを測定。2mm以上のズレがあった場合には、上流に設置してあるステアリング電磁石を用いて補正。
- ビームエネルギーに変化がないことを確認するため、基準とするエネルギーについて飛程を測定。前日に比べて大きなズレがないことを確認。
- 線量の日毎による変化を補正するため「日替わりの校正定数」を測定。前日に比べて大きなズレがないことを確認。

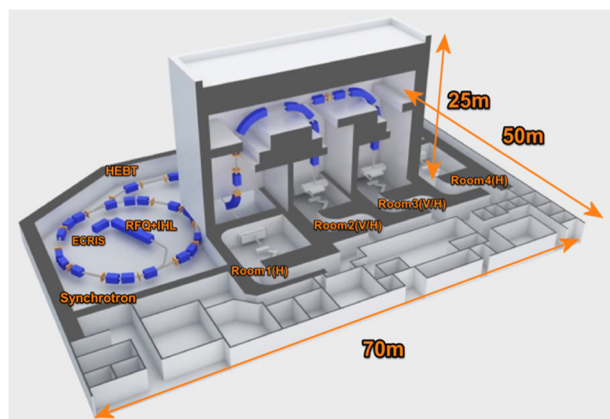


Figure 1: Layout in i-ROCK; There is a catwalk connected to the radiation therapy area directly.

[#] takeshita.e@kcch.jp

- 校正定数を更新した上で三次元照射を実施し、絶対線量に大きな変化がないことを確認。合わせて、ビーム遮断やエネルギー変更含め、照射機器全体としての動作に問題がないかを確認。

2.2 各治療室の稼働状況

当センターは Figure 1 に示すように治療室1, 4(水平ポート)、治療室2, 3(水平・垂直ポート)の4治療室から構成されている。実際の治療時間は患者の固定=位置決めで8割強が費やされるため、加速器1台に対して複数の治療室を配置するのは昨今の粒子線施設においては一般的であるが、全ての治療室に水平ポートが配備されている施設は少々珍しい。これは、治療する部位や重粒子線治療プロトコルを鑑みた場合に水平ポートの利用率が多くなる、といった統計的推測に基づいている。当センターの治療装置がフル稼働した暁には、年間880人の患者を受け入れることが可能となる。

治療ビームのエネルギー変更は、放医研にて開発された可変エネルギー運転方式[1,2]を採用しており、照射システムからの要求に応じて治療照射中に数秒の速さでエネルギー変更が完了する。また、各治療室へのコース切替時間は約20秒程度で、臨床側からの要求に応じて自由度の高いスケジュール調整が可能となっている。さらに、フラットトップを延長する事で長時間ビームを周回状態で保ち、任意のタイミングで出射可能とするフラットトップ延長運転方式[1,2]を採用し、出射デューティが向上しているため、呼吸同期照射についても高効率化された治療が実現可能である。

Table 1: Operating Time in i-ROCK

Treatment Room No.	2015FY 2015/12~	2016FY (1 st half)
TR1	-	85 hr
TR2	69 hr	152hr
Acc.	430 hr	820 hr

Table 2: Patient Number From 2015/12 to 2016/07

Tumor type	Patient number
Prostate	64
Bone and Soft Tissue	3
Head and Neck	1
Lung	1
Total	69

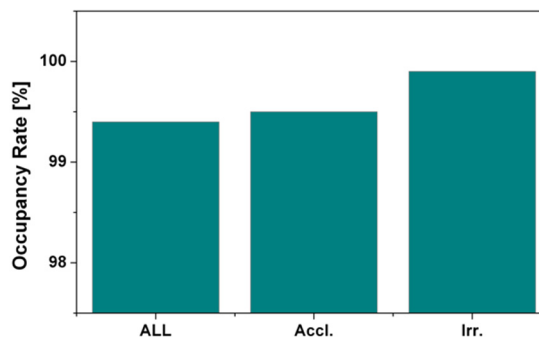


Figure 2: Occupancy Rate in 2015FY.

Table1 に、2015 年度および 2016 年度上半期における各治療室の稼働時間を示す。治療室への供給時間に比べ、加速器の運転時間が大幅に長くなっているのは、治療後の患者 QA や、他治療室におけるコミッションング時間の割合が多いためである。また、治療システム全体の稼働率は Figure 2 に示す通り概ね 99.5%近くを保っており、施設立ち上げ時には良好な滑り出しと言える。本年度からは治療室1の運用が開始され、これまで臨床試験を含めた総治療患者数は約 70 名に及ぶ (Table 2)。

2.3 日々の装置再現性

スキヤニング照射においては、シンクロトロンから出射されたビームの影響が直接線量分布に寄与するため、装置の安定度を含め、ペンシルビーム自身の位置・サイズ・時間構造(スピル)の安定性を日々、ないしは週毎に確認しなくてはならない。Figure 3 に示すのはシンクロトロン内の周回ビーム粒子数のトレンドデータであり、日毎に1割程度の変動はあるものの一定量で落ち着いているのが分かる。例えば、図に示した周回粒子数で一般的な前立腺がんを1回照射する場合、再度シンクロトロンへの入射が必要になるのは多くて2回、おおよそ3周期で1回の照射が完了する(～1分)する。つまり、周回ビーム粒子数が1割程度変動したところで照射時間への影響はほぼないと言える。

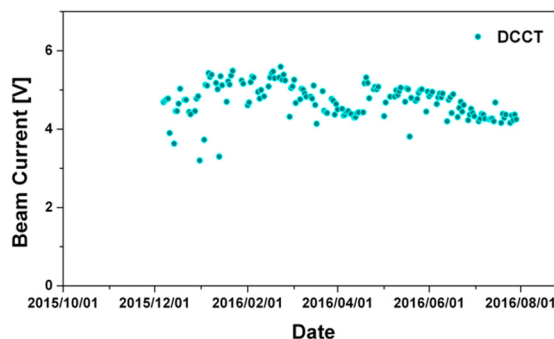


Figure 3: Daily trend of the circulating beam intensity measured by DCCT.

次に、照射システムの安定性について示す。前述 2.1 の通り絶対線量を日毎に補正するため、QA ファントムを用いた測定結果から「日毎の校正定数」を決定している。この校正定数は同日の治療で使用される重要データの

1つであり、校正定数測定後には3次元照射を用いた絶対線量の確認も同時に行っている。Figure 4-a)は校正定数のトレンド、Figure 4-c)は3次元照射を用いた線量測定結果のトレンドを表している。途中 2016/05 頃に大きな差異が認められるが、これは測定に用いている平行平板型電離箱の年間保守(=第三者機関による絶対線量校正)によるものであり、差異が1%未満であることから治療への影響はないと判断した。また、絶対線量のみならず、治療ビームのエネルギー変動を監視するため、飛程も毎日測定して確認を行っている。Figure 4-b)は飛程トレンドを示したものであり、 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内に収まっていることが分かる。

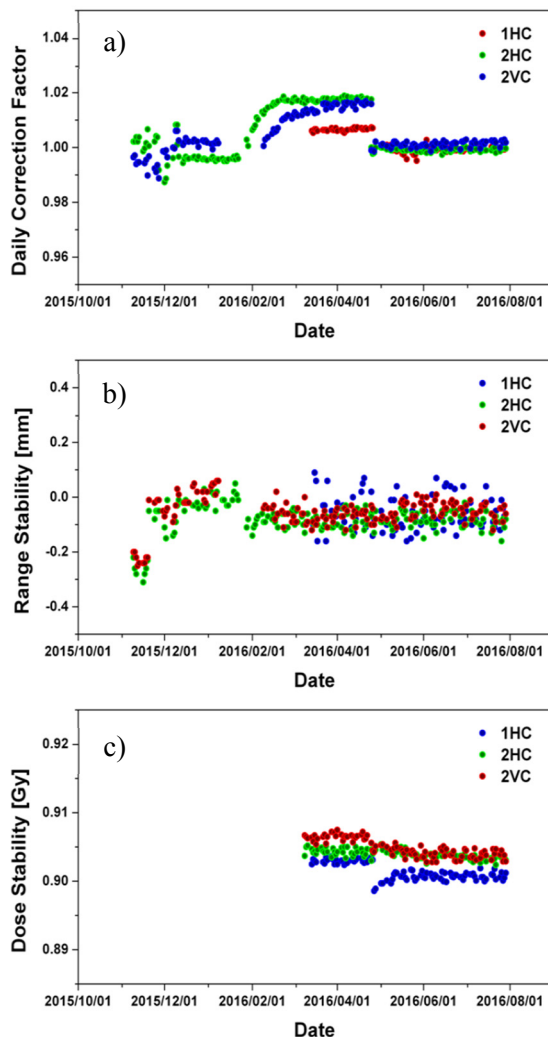


Figure 4: Trend data for the daily stability measured by QA phantom. a) shows the daily trend of correction factor for the dose. b) is the range stability on 290MeV/u. c) shows the dose stability of 3D irradiation field.

3. 呼吸同期照射コミッショニング

呼吸同期照射とは、患者の呼吸波形を常時監視し、臓器の動きがある閾値以内に入った時のみビームを照射する技術である。スキューニング照射は動的な照射野形

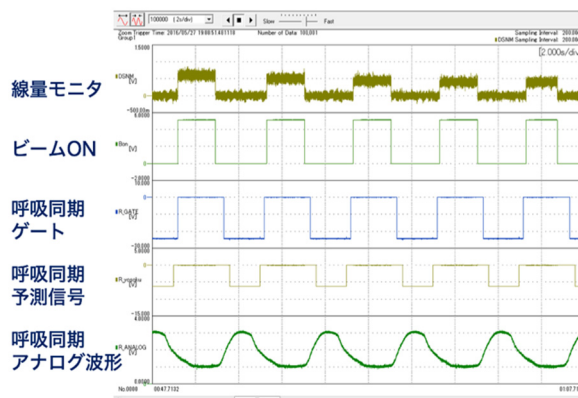


Figure 5: Signal data for the control system using the respiratory gated irradiation technique.

成技術であるがゆえに、腫瘍の動きとスキャンする動きが干渉を生み、塗りムラが生じる事で線量分布が劣化する可能性が懸念されてきた。そこで、放医研では、スキューニングの高速化と、ビーム強度を照射中に変化させる位相制御リスクニング法の開発によって呼吸同期照射の実現に至った[3]。さらに、位相制御リスクニング法によって、少ないリスクニング回数でも線量分布劣化を防げることを事前にシミュレーションで証明しており、実際の治療照射に於いても十分効果を得られる事が分かっている。これらの実績を踏まえ、当センターでは、放医研で開発された呼吸同期照射方式を全面的に採用した。以下、コミッショニング結果について示す。

3.1 照射装置動作検証

患者の呼吸波形監視用ツールとして、安西メディカル社製の体外センサ検知型の呼吸同期システムを用い、照射装置との組合せ試験を実施した。照射は実際の治療を想定し、呼吸同期照射に関わる各種パラメータ(リスクニング回数、平均呼吸周期、ゲート幅など)を適宜指定した上で行った。Figure 5 は各信号の出力波形であり、上から順に、線量モニタ出力、ビームオン、呼吸同期ゲート、呼吸同期予測信号、呼吸のアナログ波形、を示している。これら全ての信号について動作検証し、ビームの遮断時間も含めて規定範囲内に収まっていることを確認した。

3.2 線量分布検証

動作検証が済んだのち、任意の呼吸波形を使った線量分布検証を実施した。測定では、一次元の駆動天板に二次元型線量モニタを設置し、実際の呼吸波形にしたがってモニタ全体を駆動させながら呼吸同期照射を実施した。Figure 6 に線量分布の測定結果を示す。波形の周期は約 4 秒、動きに対する呼吸同期のゲート幅は全幅 4mm とした。図中の緑が駆動ファントムを動かさなかった場合の測定結果、黄色が呼吸同期照射を実施した際の測定結果である。結果から分かる通り、辺縁の部分で多少の線量差異が見られるものの、中心部の線量には全く変化が見られず、塗りムラが生じるようなことは一切起きていない。辺縁が滲む影響については、照射したいターゲット範囲を広めに設定すれば問題はなく、これまで拡大照射法で行われてきた手法を適応すれば良

い、という結果を、当センターにおいても改めて確認することができた。

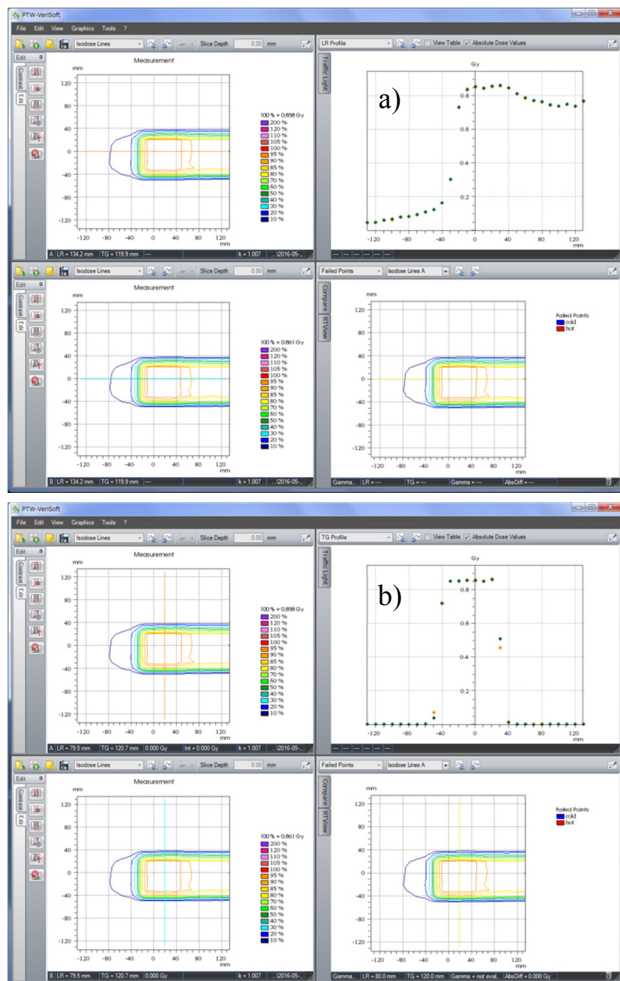


Figure 6: Dose distribution measured by 2D dose monitors using the respiratory gated irradiation. a) is depth dose and b) is lateral dose results.

4. 今後

当センターでは 2015 年 12 月の治療開始以来、大きなトラブルにも見舞われず順調なスタートを切っている。今後、前立腺がんのみならず、保険適応のある骨軟部腫瘍や、難治性の高い頭頸部がん、さらには呼吸性移動のある臓器(肺、肝臓、膵臓)も含めて適応部位の拡大を図っていく。症例拡大につれ治療件数も増加する見通しであり、治療システム全体のさらなる安定性や高効率化が望まれる。よって、残る2つの治療室も今年度中には整備を完了し、来年度以降の患者受け入れ体制の強化を図る。

参考文献

- [1] T. Furukawa *et al.*, Med. Phys. 34 (2007) 1085.
- [2] Y. Iwata *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 572 (2007) 1007.
- [3] T. Furukawa *et al.*, Med. Phys. 37 (2010) 4874.