Present Status of HIMAC, NIRS

Izumi Kobayashi^{A)}, Yasuo Honda^{A)}, Mitugu yamamoto^{A)}, Mitsuji Wakaisami^{A)}, Yuusei Kageyama^{A)},

Toshinobu Sasano^{A)}, Kenichi Ichinohe^{A)}, Masahiro Kawashima^{A)}, Yoshinobu Sano^{A)},

Eiichi Takada^{B)}, Yoshiyuki Iwata^{B)}, Shinji Sato^{B)}, Masayuki Muramatsu^{B)}

^{A)} Accelerator Engineering Corporation

KA building 3-8-5 Konakadai, Inage-ku, Chiba-shi, 263-0043

^{B)} National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8555

Abstract

Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba, HIMAC, at NIRS has been in operation for more than 15 years since the first patient treatment in June 1994. The Present Status is reported. Emphasis will be on operational aspects of cancer therapy application and research (physics and biology) with ion beams.

HIMAC加速器の現状

1. はじめに

放医研の重イオン加速器HIMACは順調な治療及 び生物・物理実験ビーム供給を続けている。特に重 粒子線がん治療は良好な治療成績を収めている。 2008年度までの運転状況の報告と、さらにHIMAC では高精度な治療の研究開発の為に次世代重粒子線 照射システムの建設、より安定で低維持費を目的に 高効率小型入射器の移設を進めている。その取り組 みについて報告する。

2. 現運用の説明

HIMACにはイオン源が3基設置されており、各々 が別の3種類のイオンビームを供給出来るように なっている。図1に示すように線形加速器にて加速 されたビームは、中エネルギービーム利用室 (MEXP)、上主加速器(USY)、下主加速器(LSY)に分 かれ、高エネルギービーム輸送系(HEBT)を経てタ イムシェアリング運転により、各治療室や実験室へ と運ばれる。



図1 HIMAC全体図

2.1 登録患者数の推移

昨年度までの登録患者数は図2に示すとおり4500 名を超え、現在までに5000名を超えている。



患者数は年々増加しており、現在、年間700名近 くの治療を行っている^[1]。

2.2 運転状況

HIMACの主な運転スケジュールは、図3の通り で月曜日にほぼ隔週でメンテナンス及びR&D、火曜 日から金曜日の昼間は治療供給、月曜日から金曜日 の夜間及び土曜日は生物・物理工学研究に供給を続 けている。年に10回程度、土曜日~月曜日朝8:00ま での実験供給もある^[1]。



HIMACでは、加速器の運転モードを治療、実験、 供給、調整、待機、故障、停止の7モードに分類し て、ビーム核種・エネルギー・使用室が変更された 場合に時間の記録をして運転状況を毎月集計し、 モード別の時間を把握している。2008年度の運転状 況を図4に示す。この図から入射器の再現性、安定 供給、主加速器の供給とHEBTの治療、実験を合わ せた時間がほぼ同じことから無調整で供給出来てい ることが言える。



図4 2008年度運転状況

2.3 治療供給

治療供給で使用される炭素線のエネルギーは、上 主加速器が290,350 MeV/u、下主加速器が290,400 MeV/uのみであったが、サイクロトロンの陽子線で 行われていた眼治療が、HIMACの炭素線で開始さ れるに伴い、2001年4月からは垂直140 MeV/u、2005 年9月からは水平170 MeV/uも利用されるようになっ た。現在治療用として上主加速器では140,290,350 MeV/u、下主加速器では170,290,400 MeV/uでの治 療供給を行っている。さらに照射野の広い患者にも 対応できるように現在治療運用に向けて430MeV/u の照射野、深部線量等のビーム測定を行っている。

2.4 実験供給

共同利用実験ではHからXeまで様々な核種に対応 している。主な加速イオン種を図5に示す。加速イ オン種は治療供給を含めるとCが約64%を占める。 次にAr(5.4%)、Fe(6.5%)と続く。He, B, C, Oについ ては、ほぼ施設制限最大強度にて供給している。 今年度からは実験者のニーズに合わせて新しい核種 としてTi, Geなどの供給も予定されている。



図5 加速イオン種

2.5 治療供給イオン源別供給実績

イオン源の供給運転比率は図6の通りである。 ECRの使用比率が57%を占めるのは、治療専用とし て炭素イオンを生成しているからである。図7が示 すとおり、PIGは治療用のバックアップと実験用の He, Si等のイオンを供給している。HEC(18 GHz ECR)は、実験用のAr, Kr, Fe, Xe等の重いイオンを 供給している。







2.6 故障統計

総運転時間に対する故障の比率は表1で示す通り 2004年度~2008年度で約0.1~0.3%の間で推移して いる^[1]。非常に故障率は低いが、HIMACは治療装 置なので故障による長時間の停止は出来る限り起こ らないようにする必要がある。しかし治療開始より 15年も経過すれば、経年劣化による供給障害が増え ることが予想される。表1を見てもその傾向は見ら れない。これは装置の細かな部品にも気を配り、経 年時間を考慮した部品の交換、消耗品の予備品確保、 生産中止による供給不可部品に関しては代替品の選 定、予備器による動作試験等を行い予防保全に取り 組んでいる結果といえる。定期点検、隔週点検の対 応によって多くの故障原因をフォローしている。し かし、年に数回は1時間を超す供給障害が発生する。 昨年度の主たる故障原因は電源の故障と冷却水の漏 水である。供給中に障害が起こった場合には、いか に早く復旧できるかを考慮しながらも次に起こらな いためには故障の原因追求のために発生現場の確認 を念入りにする必要がある。状況を見ながら臨機応 変に対応することが重要と考える。

年度	治療	実験	供給	調整	待機	故障	計	故障率
2004	3097:14	4378:28	13920:27	3303:41	3702:35	32:34	28434:59	0.11%
2005	3070:27	4661:20	14001:47	3202:00	2921:43	35:12	27892:29	0.13%
2006	3458:46	4547:25	14040:54	3201:21	2926:45	81:54	28257:05	0.29%
2007	3391:20	4673:45	13902:29	3121:24	3036:19	23:35	28148:53	0.08%
2008	3175:07	4582:41	13540:09	3275:39	3977:54	36:28	28587:58	0.13%

表 1 2004~2008年度故障統計(INJ·SYN·HEBT合計)

3. HIMACの今後

3.1 次世代重粒子線照射システム

現在、HIMAC棟に隣接した場所に、治療エリア (仮称)が建設されている。図8のようにシンクロ トロン上リングより、水平・垂直の固定ポートを有 する治療室2室と回転ガントリーに供給される。 新しい技術として、3次元スキャニング法の開発が 進んでおり、コリメータレスの高精度照射、変動標 的に対応した照射が実現する。既存の治療室にはな い回転ガントリーも建設を予定しており、多門最適 化による線量集中性の向上とそれによる治療成績の 向上、患者位置決め、治療照射時の患者負担の軽減 が見込まれる^[2]。スケジュールは2010年春に建屋 完成、2010年秋に1ビームライン完成、2011年に1 ビームライン治療開始予定となっている。



図8 HIMAC次世代重粒子線照射システム完成予想図

3.2 高効率小型入射器の移設

HIMACは治療開始から16年目を迎え、装置の老朽 化も無視できない状況にある。3台のイオン源や二 重シンクロトロンリングを有するなどバックアップ 体制も整っているが、唯一線形加速器部分だけは二 重化されていない。そこで放医研が16年度より2ヶ 年計画で重粒子線がん治療装置の小型化に関する研 究として開発した高効率小型入射器をHIMACへ移 設し、第2入射器として利用すべく整備を進めてい る。高効率小型入射器をHIMACへ組み込む事で装 置の二重化が更に進み、より安定した治療ビーム供 給が見込まれる。高効率小型入射器と既存装置の比 較、現在までの移設の状況と今後のスケジュールに ついて報告する。 3.2.1 既存入射器との比較

大きさとしては図9で示すとおり、全長約1/7 の小型化、消費電力量は約1/10程度になりコスト 面でも大きな利点がある。



イオン源は写真1で示す。放医研で開発された全 永久磁石型ECRイオン源の設計を基本としており、 C⁴⁺を供給する為に特化されている。表2の通り、 必要な磁場を全て永久磁石で得ている点に大きな特 徴がある。このことから従来必要であった電磁石電 源や冷却機構が全く不要となるため、大幅な製作コ スト及び維持費削減に繋がっている。また運転にお いては調整パラメータが少なく、且つ安定であるた め、医療用加速器のイオン源として多くの魅力的特 徴を有する^[3]。



写真1 小型ECRイオン源

表 2	小型ECRイ	オン	~源と	:既存ECR	イオ	トン	「源の」	北較
-----	--------	----	-----	--------	----	----	------	----

	比較項目	小型	既存
イオン源	設置面積	2.0m ²	36.6m ²
	加速ギャップ	無し	有り(24kV)
	引き出し電源(供給時)	30kV	24kV
	ミラー電磁石 材料	永久磁石	電磁石
	電力	0A	600A×2
	絶縁トランス容量	3kVA	125kVA
	末端ビーム強度(安定時)	390µA	600µA

写真2に示す小型RFQ線形加速器は4ベイン構造 を持つRFQである。表3で示すとおり、小型化のた め比較的高い200 MHzの共振周波数が選ばれた。 RFQの入射エネルギーはECRからRFQまで加速 ギャップを設けないことから、既存ECRより引き出 し電圧を高くし、30kVの引き出し電圧を採用した。 これに相当するRFQの入射エネルギーは10 keV/uで ある。一方、出射エネルギーは共振器全長が約2.5m 以内となるよう、約608 keV/uに決定した。これによ り共振器は一体のタンクにより製造された^[3]。



写真2 小型RFQ線形加速器

表3 小型RFQ線形加速器と既存RFQの比較

	比較項目	小型	既存
RFQ	入射エネルギー	10keV/u	8keV/u
	出射エネルギー	608keV/u	800keV/u
	共振周波数	200MHz	100MHz
	質量電荷比	1/1~1/3	1/2~1/7
	共振器全長	2.5m	7.36m
	共振器直径	0.42m	0.80m
	所要電力	120kW	186kW

APF方式IH型DTLはIH型共振器を用いたドリフト チューブ線形加速器を写真3に示す。入射エネル ギーは表4で示す通り、RFQの取り出しエネルギー と等しく608 keV/uである。一方、取り出しエネル ギーは、①共振器の小型化②シンクロ入射エネル ギーを出来る限り小さく③4価炭素ビームが炭素 フォイルを通過する際に6価に変換されるストリッ ピング効率が9割以上となる。この3つの要素の兼ね 合いから4.0 MeV/uに決定された^[3]。



写真3 APF方式IH型DTL

	比較項目	小型	既存
DTL	入射エネルギー	608keV/u	800keV/u
	出射エネルギー	4.0MeV/u	6.0MeV/u
	共振周波数	200MHz	100MHz

出射エネルギー	4.0MeV/u	6.0MeV/u
共振周波数	200MHz	100MHz
質量電荷比	1/1~1/3	1/2~1/7
共振器全長	3.4m	23.87m
		(9.7+7.2+6.9)
共振器直径	0.44m	2.55m
所要電力	360kW	2.7MW+1.4MW
		(0.97+0.93+0.86)

表4 APF方式IH型DTLと既存DTLの比較

3.2.2 現在までの移設状況と今後のスケジュール

移設状況と今後のスケジュールを表5に示す。 2007年度より高効率小型入射器移設の検討を開始した。設置場所は線形加速器室としたが、限られた空間に設置するため2階建プラットホームを設置し、2 階には高周波増幅器一式を据え付けた。イオン源も 縦型として2階に設置。2009年3月までにイオン源からIH型DTLまでの設置が完了している。

今後の予定として、2009年8月にイオン源、低エ ネラインの電源・制御装置の接続を終えるとIH型 DTL出口までのビーム出し試験が出来る状態になる。 2010年度には移設が完了し、治療コースへ供給可能 となる。

2007 年春	高効率小型入射器移設検討開始
2008年3月	RFQ・IH-DTL 移設(RF 系真空引き開始)
2008 年 8 月	2 階プラットホーム据付
	RF 系アンプの設置
	受電・冷却水・制御の接続
	(RF 通電 ·調整開始)
2009 年 3 月	イオン源・低エネライン据付
2009 年 8 月	イオン源・低エネライン電源・制御接続
	ビーム出し試験開始(IH-DTL 出口まで)
2010 年 3 月	出射ラインの据付、電源・制御接続
	上位計算機の改造、(制御室からのリモート操作可)
2010 年 8 月	治療コースへ供給可能

表5 移設状況と今後のスケジュール

4. まとめ

HIMACでは、老朽化に対する既存装置の維持の 強化、新しい技術によるより安定且つ安全な装置を めざして取り組んでいる。

参考文献

- [1]Y. Honda et al., "Present Status of HIMAC, NIRS", the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan(2006) WP04-p.90
- [2]K.Noda "New Treatment Facility Project at HIMAC", Radiological Sciences Vol51
- [3]Y.Iwata "Performance of a compact injector for heavy-ion medical accelerators"Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572 (2007) 1007-1021