

がん治療用加速器 HIMAC の運転状況

成田克久^{A)}、佐野悦信^{A)}、小林千広^{A)}、山本 貢^{A)}、富樫智人^{A)}

近藤貴律^{A)}、川島祐洋^{A)}、高田栄一^{B)}、取越正己^{B)}、山田 聡^{B)}

^{A)} 加速器エンジニアリング株式会社 〒263-0043 千葉県千葉市稲毛区小仲台 2-13-1

^{B)} 独立行政法人放射線医学総合研究所 〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

概要

独立行政法人放射線医学総合研究所のがん治療用加速器 HIMAC の運転は、1993（平成 5 年）1 月より入射器から始まり、同年 12 月の主加速器ビーム取り出しを経て、'94 年 6 月よりがん治療の臨床試行が開始された。以来 9 年間余り順調にビーム供給を続け、装置全体としては 10 年を経過している。ここでは HIMAC のビームを、がん治療及び生物・物理工学研究に供給している現状について報告する。

1 HIMAC 年表

はじめに、表 1 に年度別の HIMAC 年表で運転経過と年度ごと、及び累計の治療人数を示す。

年度	月	イベント	治療人数
1992	3	ECR イオン生成 RFQ ビーム加速 DTL ビーム加速	*()内累計
1993	11	シンクロ He ビーム加速	
	2	シンクロ He ビーム取り出し シンクロ C ビーム加速	
1994	6	治療開始	
	10	共同利用開始	
	1	Si800MeV/u 加速	
	2	Ar650MeV/u 加速	21
1995	2	呼吸同期照射開始	83(104)
1996	4	18GHz ビーム生成	
	3	TSA 加速	126(230)
1997	7	H ₂ ⁺ 加速 Fe イオン生成	
	1	Xe ⁴²⁺ 430MeV/u 加速	159(389)
1998	4	2 次ビームコース利用開始	
	9	シミュレーション室利用	168(557)
1999	4	C 室座位治療	
	1	治療室 2E9pps ビーム利用開始	188(745)
2000			201(946)
2001	4	EC 実験開始	
	7	治療 1000 人達成	241(1187)
2002	3	照射装置 薬事対応	276(1463)
2003	9	FCN 閉無し測定	~8/8 145(1608)

表 1：HIMAC 年表

2 HIMAC のビーム運転

2.1 運転スケジュール

HIMAC の運転は、4 月から 7 月までの前期と 9 月から 2 月までの後期のマシンタイムスケジュールに沿って運転され、8 月と 3 月には装置の点検と改造等が行われる。2002 年度実績では、年間 44 週で約 5,500 時間運転している。通常、月曜から土曜日の 20 時までであるが、年間 5~10 回ほど日曜の 8 時まで運転する。又、2 週連続運転も年間数回行っている。月曜日は、調整とメンテナンスが隔週に予定されていて、調整日は新規供給ビームの調整や性能向上のためのスタディ等に使われている。[1]

週の火曜日から金曜日までの昼間は、治療に使われる。この時、エネルギーの変更が行われる。これにかかる時間は、主加速器と HEBT コースにある 2 つの治療室での軸確認を含めて約 20 分程度である。夜間と週末は生物実験と物理実験の使用するエネルギー、イオン種に変更し供給される。この変更調整は通常 1 時間程度で行われる。加速器での 2002 年度の運転状況を図 1 に示す。

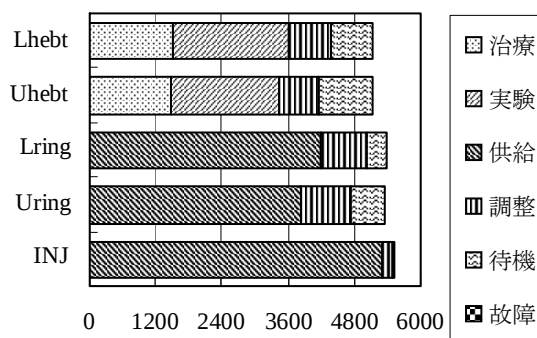


図 1：HIMAC 運転状況（2002 年度）

- 入射器は運転時間の 96%（5,500 時間に対して。以下同じ）が供給に充てられている。
- シンクロトロンからの供給は、上リング 71%、下リング 77%の時間である。
- 調整には、隔週の R&D の時間や、治療日のエネルギー変更（上 140、290、350MeV/u、下 290、400MeV/u）及び夜間実験用の調整時間が含まれている。
- 治療時間（29%）は線量測定等でのビーム使用時間や患者の位置決め時間を含んでいる。
- 上 HEBT での実験供給は 38%で、生物実験及び一部の物理実験が行われている。
- 下 HEBT での実験供給は 41%で、二次ビーム（¹¹C 等）の利用を含む。

2.2 加速イオン種

治療（臨床試験）は、カーボンビームのみで行われているが、共同利用実験はカーボン以外のイオンでも運転される。その範囲は、H、He から Fe、Kr、Xe に亘る。イオン種の変更はパラメータ既知の場合、約 1 時間で行われ主に実験供給となる。新規のイオン種についてはビーム調整を随時行っている。入射器で 2002 年度に運転されたイオン種の時間を図 2 に示す。

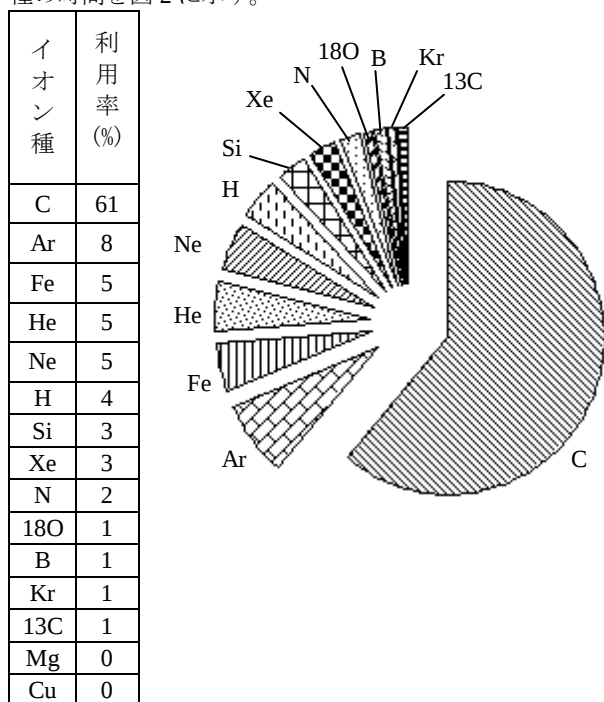


図 2：入射器で運転されたイオン種

HIMAC には各イオン種を供給するために、10GHzECR、18GHzECR、PIG の 3 台のイオン源が設置されている。上リング、下リング、及び中エネルギービームコースの 3 者に、それぞれ別のイオン種を供給出来るように入射器のタイムシェアリング運転（各イオン源に別々のタイミングを与えて運転）を行っている。タイムシェアリング運転による 2002 年度のイオン源稼働時間は延べ 7750h となっている。その内 C での治療・実験利用は延べ 4780h で、その他のイオン種は実験での利用である。

HIMAC で加速されている主なイオン種の代表的な供給エネルギーと粒子数を表 2 に示す。表内 () は加速最大エネルギーとそのエネルギーでの取り出し実績を示す。

イオン種	エネルギー (MeV/u)	入射 (μA)	周回粒子数 (pps)	取り出し (pps)
H	230	340	1.0E10	7.5E9
He	230	500	2.0E10	1.6E10
C	430	530	2.8E9	2.0E9
Ne	600	990	1.6E9	8.5E8
Si	490 (800)	90	6.8E8	4.4E8 (2.2E8)
Ar	500 (650)	190	3.4E8	2.7E8 (1.2E8)
Fe	500 (600)	90	2.1E8	1.3E8 (5.3E7)
Kr	500 (630)	35	6.0E7	1.9E7
Xe	400 (470)	55	9.3E7	2.8E7

表 2：イオン種別粒子数

3 治療用ビーム供給

治療で用いられるビームは、標的の浅深・大小に応じて、エネルギーや振幅の度合いを変化させる一方、複数回に亘る同じ患部への照射では同じビームの供給が求められる。

また、複数回の照射は連続した日程で行われることが望まれるので、予定外のビーム停止は極力避けねばならない。従って、異なる条件のビームを速やかに、再現性よく、且つ安定に供給する運転が求められる。

3.1 現在の再現性と調整迅速化への展望

HIMAC でのエネルギー変更は、直流電磁石の初期化のみを行いパターン電磁石の初期化は行っていない。また、エネルギー変更後の輸送系のビーム軸も治療室手前のモニターで SAVE されているビームモニター波形と比較して、変化が無ければステアリング等の調整も無く波形確認のみで、治療室内モニターでは±1.0mm 以内に入っている。

HIMAC には、2.2 加速イオン種の節で述べた 3 台のイオン源がある。治療供給には主に 10GHzECR が使用され、10GHzECR のメンテナンス時などの場合には PIG が使用される。10GHzECR に異常発生が予測される場合はタイムシェアリング運転により、PIG を準備しておくことでタイミングを切り換えるだけで供給が可能となる。

しかし、PIG でイオン生成する場合は、10GHzECR と比べてガスの消費量が多く、他の 2 台のイオン源で供給されるビームを再結合によって 10～20%程度減少させる場合があるためその都度、ビームの減少分を増やす調整を行っている。

現在、PIG ではガスの消費量を抑えるためガスパルシングを検討中で、再結合を抑え、他のビームに影響が出ないようにできる。

3.2 ビームに影響を与え得る諸要因と対策

①冷却水（負荷系）：HIMAC では、月曜日が休日の場合も火曜日の 10:00 より治療があるため、加速器機器を 8:30 以前から立ち上げるが、図 3 に示すように 290MeV/u のエネルギーで立ち上げた場合、電磁石系の冷却水は安定するまでに約 2 時間かかる。そのために気温の低い日や冬場には冷却水の温度を上昇させる対応策として、HIMAC の最大エネルギーである上リング 600MeV/u、下リング 800MeV/u で運転することにより冷却水の温度が約 40 分ほどで安定するようになる。

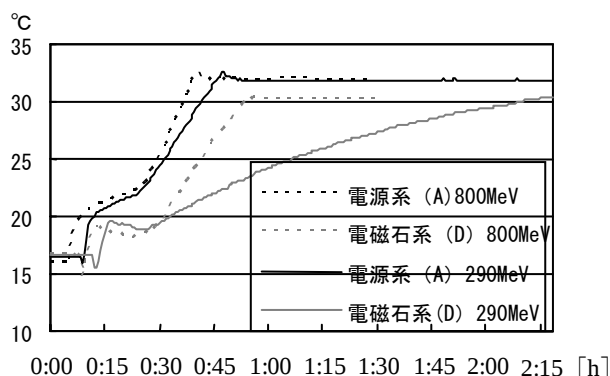


図 3：立ち上げエネルギーによる冷却水温度

②受電電圧の変動：図4にBQ電源のトランス受電電圧を示す。24時間のビーム変動として電力の受電変動（図4破線円内）も加速ビーム（主に実験供給時）に影響を与えることがある。

図5と図6は、今年4月に調整したパターンで見られた実験供給開始21:00と深夜1:00前後のビームのDCCT波形と取り出したビームの波形の例である。深夜にトランスの受電電圧が変化して、電源の動作状態を変えたために、リングの偏向電磁石（BM）のフラットトップにオーバーシュートが起こり、ビーム漏れ（図6白破線内）が発生している。

このような漏れは、治療用ビームでは、特に呼吸同期照射や開発中の積層原体照射に障害となるので、設定パターンの再調整等によって、このビーム漏れを抑えた。また、高エネルギーでの実験等にも対応するため、BM電源のアクティブフィルター強化を実施した。

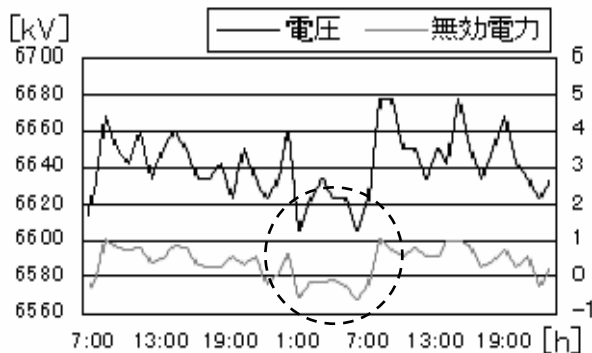


図4：BQ電磁石用トランス受電

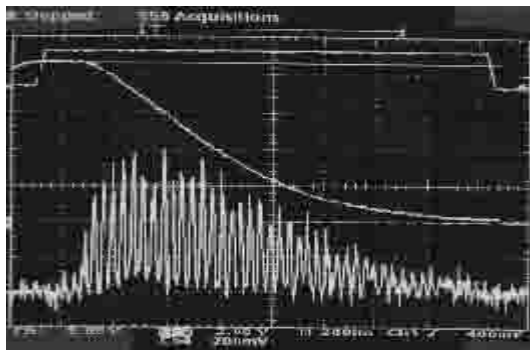


図5：実験供給開始21:00のビーム波形

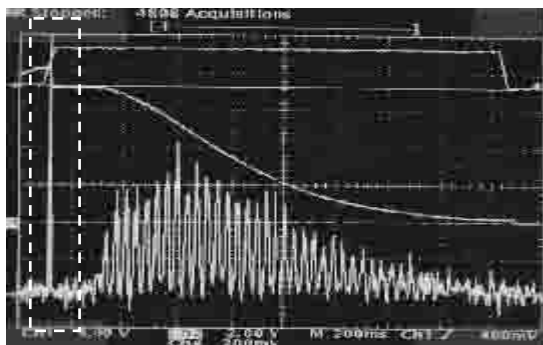


図6：深夜1:00のビーム波形

4 部品、回路素子のメンテナンス

HIMAC では隔週のメンテナンスを行っているが、大きな改造や修理を行う時間がない。そのため半年ごとの定期点検までの治療期間中は安定にビームを供給するため、故障が発生しないように些細な問題であっても十分な対処をすることが必要となる。

HIMAC 運転当初から電磁石電源などのトランスや制御素子からの熱による破損等が発生させないために、冷却水流量、冷却 FAN 停止の有無などを週例点検（隔週）の項目に入れて点検を行い、問題があればその都度、流量調整や冷却 FAN の交換を実施している。

冷却水フローメーターセンサーは消耗部品として扱わざるを得ないが、カプラーやバルブでも摩耗が発生しているので、調査・交換対象としている。

さらに冷却 FAN については 5 年前から停止が目立つようになったため、定期点検時に数ブロック（5～6 回）に分けて交換を行い、ほぼ全数交換を終了している。

ここ 2～3 年くらいで制御系、電源、その他の制御回路の素子など、消耗品における経年変化による劣化で故障・焼損が発生している。現状では部品交換などで対応できるトラブルのため交換予備品があればすぐに復旧できる。

最近の制御系トラブルとしては、基板故障、制御装置内の小型直流電源、マグネットコンタクトの故障が発生している。その原因として、通常のコンデンサ劣化、接触部の劣化以外に、イオン源等での放電による素子破損、素子の劣化による停電からの復帰時の突入電流での破損、等があげられる。

電源盤などは数量も多く即座に対応しきれないものが多いため、定期点検時にコンデンサやリレー等と共に順次交換を行っている。

5 謝辞

HIMAC の運転・運用に際し、指導・助言を頂いた放医研加速器物理工学部の皆様へ、また、常に運転・維持、ビーム安定供給に取り組んでいる加速器エンジニアリングの先輩、及び同僚に感謝する。

6 参考文献

- [1] C.Kobayashi et al., "OPERATION OF HIMAC AND CANCER THERAPY", WAO2001 Proceedings (CERN-2001-002), pp214-219.