

ビーム導入時間計測システム

大江修司^{A)}、勝間田匡^{A)}、岩田宗磨^{A)}、本多保男^{A)}、伊佐英範^{A)}、
取越正己^{B)}、高田栄一^{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

がん治療のための炭素ビームの室内への導入時間を、多線比例計数箱を利用して測定するシステムを開発した。従来のビームシャッターが開いた時間を計測する方式では、ビームを出射していない場合、または強度を落とした導入でも、経過時間に沿った計測しかできなかった。本システムでは、多線比例計数箱を電離箱領域で使用し、測定した導入粒子数を時間に換算し、導入時間を監視している。ビーム強度の強弱に応じて導入時間も積算されるので、安全管理上有意義な、より精度の高い時間計測ができるようになった。

1 はじめに

1993年に世界初のがん治療用重粒子線加速器として建設された放射線医学総合研究所の HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) では、1994年から臨床試験が始まり現在までに約1600名の患者の治療が行われてきた。

その治療照射に際して、漏洩線量の総量を規定値以下にする為に、治療室内へのビーム導入時間の管理が必要である。当初は導入ビーム強度の上限を 3.6×10^8 [particles per second(pps)] と設定し、常に上限値でビーム導入していることを前提に、シャッターを開けている時間をビーム導入時間として計測していた。現在では、導入ビームの総量を規定する方法で管理している。このためには、照射時のビーム強度の情報が必要不可欠である。この情報は常時計測可能な多線型のビームプロフィールモニタ(準非破壊型ビームモニタ、以下 SND[1]) の信号を積分することで得る。尚、導入時間の管理は週単位で行っている。

SND は治療ビーム監視の一環として設置されており、ビームに大きな影響を与えることなく、かつ、強度が $10^8 \sim 10^{10}$ [pps] のダイナミックレンジで計測できる点で都合が良い。

本報告では、準非破壊型ビームモニタ並びにビーム導入時間計測システムとこれらの動作特性や、実運用上の問題点などについてまとめる。

2 システム構成と計測モード

導入時間計測システムは既存の制御システムとはできるだけ独立なものとした。ビームシャッターの動作信号や SND の信号は専用のケーブルで制御室に集められる。計測システムの構成を図1に示す。

導入時間計測システムは、主に3つのパターンで計測を行う。1つは従来通りシャッターの開閉のみを監視し、開いた時間を積算する OPEN 時間計測。次は、ビーム強度の強弱をオペレータが判断し、対応する計測モードを手動で

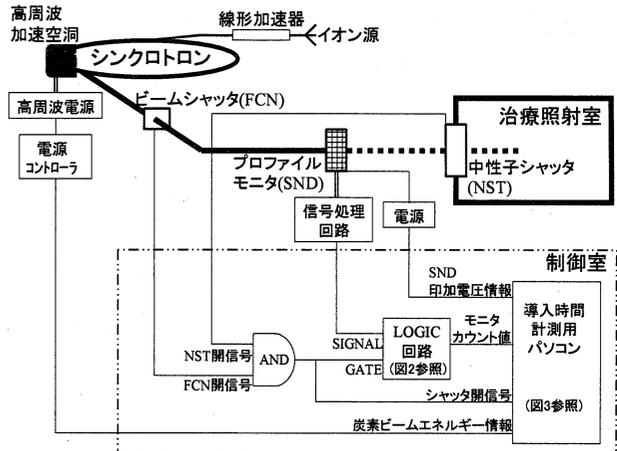


図1: システム構成

切替える USUAL/FAINT 時間計測(許容最大強度の 1/100 以下は FAINT、それ以外は USUAL モード)。最後に、SND のデータを積分して得られた導入粒子数から時間換算を行う換算時間計測である。

2.1 OPEN 時間・USUAL/FAINT 時間計測モード

OPEN 時間計測モードは、シャッターの開閉信号を元に、計測機器の内部クロックで計測を行う。シャッターの開閉情報は、シャッターが閉じた状態か否かを接点信号で得る。

USUAL/FAINT 時間計測モードは、炭素以外のイオン種ビームの導入時間計測について一般化したモードであり、生物実験室等に用いられているが、ここでは説明を割愛する。

2.2 換算時間計測モード

換算時間計測では SND のデータを必要とし、図2に沿って計測用 PC に入力される。

SND の信号処理回路は、シンクロトロン主偏向電磁石のフラットトップ区間に射出されたビームについて、ワイヤー出力信号を積分し、フラットトップ終了から 13ms 以内に積分値に比例した電圧のアナログ出力を行なう。信号処理回路内の積分コンデンサ容量 C は 1.5×10^{-7} [F] であり、センサー内で誘起された電荷 Q [C] とすると、出力パルス波高 V [V] は、

$$V=Q/C \quad (1)$$

で与えられる。その信号を V/F コンバータを用いて波高 10[V] 当たり 1[MHz] のパルス信号へと変換する。

例えば、290MeV/u の炭素イオン (C^{6+}) 1個が通過した場合、SND 中で約 5.3×10^{-16} C の電荷を誘起する。式(1)より、アナログ信号の波高は 3.5×10^{-9} [V] となり、V/F コン

バータを通して 3.5×10^4 [Hz] のパルス信号へと変換される。この関係を用いてパルスカウント値からビーム強度を求めることができる。

2.3 システム構成

V/F コンバータには、ビームシャッタ (FCN) と中性子シャッタ (NST) が同時に開状態のときだけ出力するようにゲート信号を入力している。

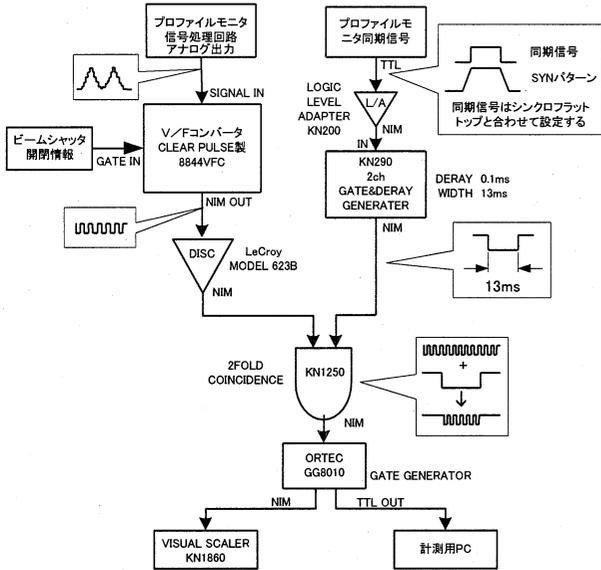


図 2: プロファイル信号の流れ

シャッタの開信号やモニタ積算値等の計測データは計測用 PC に入力され、National Instruments 社の LabVIEW5.1 により作成したプログラムで解析される。LabVIEW5.1 は Microsoft 社の Windows OS がインストールされた一般的な PC 上で動作する。

計測プログラムの処理フローを図 3 に示す。

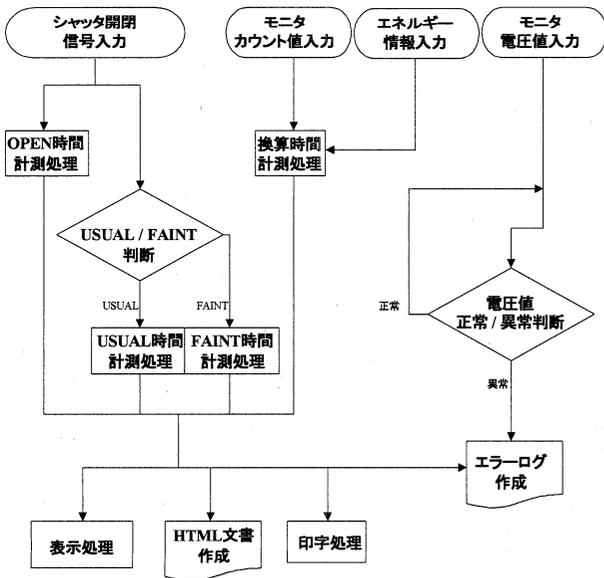


図 3: 計測プログラム処理フロー

2.4 センサー

SND は、真空ダクト内に挿入して使う窓付き多線比例計数箱として設計されたもののワイヤー部を直接大気中に晒して、電離箱領域で動作させて使用している[1]。ビーム窓を持たないためビームは $\phi 20, 50 \mu\text{m}$ の 2 種類のワイヤーとの衝突によってのみ散乱を受ける。ビームを $\sigma = 7\text{mm}$ のガウス分布として、シミュレーションにより衝突の影響を評価した。その結果、約 10% の粒子がワイヤーにより散乱を受け、そのうち約 5% が元の分布外に広がる。また、散乱粒子はワイヤー断面の通過距離に比例したエネルギー損失を受ける。その平均値は約 1.2MeV と評価された。これによる飛程の損失は 0.1mm 以下であり、現在の治療照射法では無視できる量である。散乱の影響は、下流のビームライン上のモニタ等による散乱に重畳され、実際の影響は検出できない。治療ビームへの影響が小さいことから、このモニタを準非破壊型 (Semi Non-Destructive) と呼んでいる。SND のプラトー曲線を図 4 に示す。印加電圧 -300~-1000V でほぼプラトー領域が得られ、-1100~-1200V からガス増幅効果が現れ始めることが分かる。動作電圧は -1000V とした。

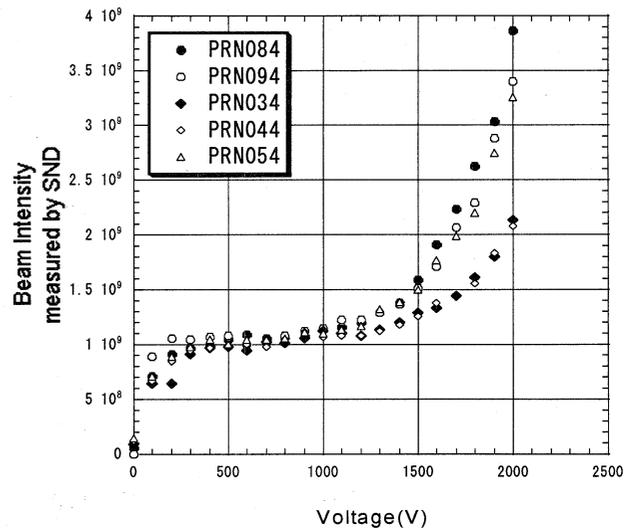


図 4: SND プラトー曲線

SND は空気中で使用するため、電子親和性の強い酸素により、強いイオン再結合が予想される[2]。再結合の影響をみるために SND の約 2m 下流の平行平板電離箱[1]と同時に強度測定した。SND は平行平板電離箱での測定値に比べ、炭素ビーム強度 2×10^9 [pps] に対して約 85~95% の検出効率を示した。この値は強度 3×10^7 [pps] から 2×10^9 [pps] の間でほぼ安定していた。このことから、イオンの初期再結合の影響はあるものの、一般的再結合の影響は小さいと考えられ、平行平板電離箱と同様に使用できる[3]。個々の SND について炭素ビームに対し、エネルギー毎に検出効率を求め、補正に使用している。SND のノイズは炭素ビーム強度で $1 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$ pps 相当あり、このためビーム調整時の強度 3×10^8 [pps] では約 1% の過大評価となる。しかし、ビーム導入時間の観点から言えば、治療強度の 1/10 程度であり、全体の利用時間への影響は 1% 程度である。ノイズなどによる低強度側での過大評価は許容している。

3 運用、実績

3.1 運用

換算時間計測は、治療室へ導入される炭素ビームのみに限定している。SNDのプラトー領域がおおよそ-300Vから始まっていることから、これ以下の印加電圧では正常に強度測定できないとして、状況をオペレータに警告しエラーログを残す。また、計測ソフトウェアには、計測データを表示・印字するだけでなく、HTML文書にまとめて、Web上に公開する機能も備えた。これにより、遠隔での導入時間の確認が可能となった。

ビームエネルギー情報は、主加速器RF周波数を主加速器制御卓表示器経由で取得する。この表示器でビームエネルギーを識別し、接点信号として出力する。エネルギーに応じて1カウント当たりの換算時間が変わってくるので、異なる換算係数を用いて計測している。換算係数はビーム調整パラメータが変更になった場合は測定し直す。

換算時間は、従来の上限強度(基準強度とする)であった 3.6×10^8 pps で導入した場合の時間として表す。1週間毎に基準強度のビームでAVC(A室垂直コース)とCHC(C室水平コース)は11時間、BVC(B室垂直コース)とBHC(B室水平コース)は9時間までのビーム導入が許可されている。シンクロトロン室の最大ビーム強度である 2.0×10^9 pps で1分間ビーム導入したとすると、換算時間は5分33秒となる。

例えば、ビーム取り出し周期が3.3秒の場合、290MeV/uの炭素ビーム(強度は 2.0×10^9 pps)を、実時間(OPEN時間)で3.3秒間(1パルス分)室内に導入したとすると、換算時間は、

$$3.3 \times (2.0 \times 10^9 / 3.6 \times 10^8) \approx 18.3[\text{秒}]$$

となる。このときにSNDのパルス計数値が770カウントだったとすると、

$$770 / 18.3 \approx 42.0[\text{カウント/秒}]$$

となり、これを換算係数としている。この係数は各ビームコース(SNDの個性による)及び各エネルギー(ビームの電離能が変わる)によって異なる。

計測システムの運用方法は、毎週日曜日24:00にリセットして、1週間単位で照射ポートごとに積算した時間が許容時間を越えないように管理している。図5に計測時間の表示例を示す。中央の時間が計測時間で、右の時間が制限時間である。

UPPER ITEMS	CURRENT VALUE	STANDARD VALUE
FCN15	30:16:40	168:00:00
AVC	3:57:44	11:00:00
BVC	0:51:45	9:00:00
BIO(Usual)	9:55:11	17:30:00
BIO(Faint)	3:51:13	50:00:00

図5: 計測時間表示画面

3.2 実績

治療照射において、肝臓がんや肺がんに対しては呼吸同期モード[4]での治療となる。呼吸同期モードでは患者の呼吸タイミングとビーム取り出し可能なタイミングが一致している時のみビームを照射する。治療の間ビームシャッターは開状態であるため、両タイミングの一致する率が低いと、実際にビーム照射されなくてもOPEN時間が増加する。

図6にOPEN時間と換算時間(積算)の比較の実例を示す。前述の通り、導入時間はビーム強度を 3.6×10^8 ppsとして規格化を行った。OPEN時間に比べて、換算時間は半分程度であり、この主な原因は呼吸同期モード照射にあると考えられる。なお、この内15%位はビーム調整時間である。

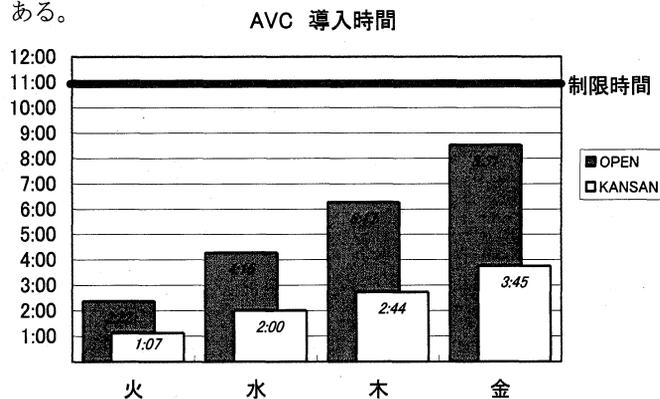


図6: OPEN時間と換算時間の比較

4 まとめ

これまで過大評価していた治療室内へのビーム導入時間を、ビーム強度に応じた時間計測方法を採用して、より正確な時間計測が可能となった。また、ビーム調整を微弱強度ビームで行うことにより、ビーム調整時間を事実上、無視できるレベルに下げることができる。このことはより有効なビームの室内導入を可能にしたと言える。

5 謝辞

放医研加速器物理工学部の皆様には、本システムを稼働させるに当たって、多くの指導、助言を頂いた。心より感謝申し上げます。また、日々のデータ取り等は加速器エンジニアリングのオペレータ員の尽力によるもので、感謝申し上げます。

参考文献

[1]M. Torikoshi, et al., Beam monitor system for high-energy beam transportation at HIMAC, Nucl. Instrum. Meth. A 435(1999)326-338.
 [2]G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement" 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., 1989.
 [3]J. W. Boag, "Ionization Chamber," Radiation Dosimetry Vol. II, F. H. Attix and W. C. Roesch, Eds., Academic Press, New York 1966.
 [4]S. Minohara, et al., Respiratory gated irradiation system for heavy-ion radiotherapy" Int J Radiat Oncol Biol Phys 2000;47:1097-1103.