

氏 名 橋本 義徳

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大乙第 146 号

学位授与の日付 平成 17 年 9 月 30 日

学位授与の要件 学位規則第 6 条第 2 項該当

学位論文題目 酸素分子ガスシートを用いたビームプロファイルモニターの
開発

論文審査委員 主 査 教授 平松 成範
教授 黒川 眞一
助教授 春日 俊夫
教授 町田 慎二
教授 森 義治（京都大学）
主任研究員 野田 耕司（放射線医学総合
研究所）

論文題目：酸素分子ガスシートを用いたビームプロファイルモニターの開発

HIMACシンクロトロンにて、酸素分子ガスシートターゲットを用いた非破壊型のビームプロファイルモニターを開発した。ガスシートターゲットは、幅85 mm、厚み1.3 mm (FWHM) であり、密度は、圧力換算で、 1×10^4 Pa である。HIMACシンクロトロンのベース真空度は、 10^{-8} Pa 台であるが、このガスシートによつての汚染はほとんどない。HIMACシンクロトロンでは、カーボンビームを典型的ながん治療に用いるが、ビームは、6 MeV/u で入射され、290-430 MeV/u まで加速される。バンチあたりのビーム強度は、 2.5×10^8 である。そのビームにて、バンチ間隔時間内(100 ns)で2次元で非破壊型のビームプロファイルの計測に成功した。

非破壊的かつ高速のビーム診断ツールは、イオンシンクロトロンにおけるビームオペレーションとビームダイナミクスの研究から、特に要求が高まっている。しかし、高速のビームプロファイル計測を、特にHIMACシンクロトロンのようなビーム強度が低く、かつ超高真空領域のシンクロトロンやストレージリングなどにおいて、非破壊で行うことは、一般的にはかなり難しい。通常は、ビームと残留ガスとの衝突で生成される電離イオンもしくは電子を検出しているが、高速のビームプロファイル検出には、残留ガスの圧力が高いか、ビーム強度が高いこと、もしくはその両者が必要条件となるためである。

このような困難に打ち勝つために、ひとつのアイデアが導入された。それは、ガスターゲットを用いることにより、電離イオン数を増すことである。そのようなモニターは、過去にCERN で開発され、一つはナトリウム、他方はカーボンを用いたガスターゲットであった。それらは、高い電離イオン効率を有したが、バンチ時間程度での高速の計測は、実現されなかった。

そこで、十分にこれらの加速器環境と過去の到達点を考慮した上で、装置開発の目的を、2次元の実像ビームプロファイルをバンチ時間内で計測できることに要約した。その理由としては、次を挙げる。

- (1) 世のイオンシンクロトロンのビームプロファイル計測は、残留ガスを用いたタイプをはじめ、ほとんど1次元に射影した計測しか行われていないが、バンチ内粒子の空間密度分布構造を調べるには、本来の姿である2次元の実像で見ることが必要である。
- (2) 加速器のビームの高品質化にともなつて、ビーム不安定性の研究と対策が数多く行われているが、バンチ形状の変化や、瞬時にビーム強度が減少する現象には、できるだけ短時間で実バンチ形状を調べることが、その原因解明に有益な情報をもたらす。

目標の実現に向けて、ガスターゲット密度を十分に高め、かつ高感度な検出系を用いた。本論文では、その開発過程とその詳細な考察、そして、典型的なビームプロファイル計測結果をまとめた。本開発の要旨を以下6点にまとめる。

- (1) ノズルビーム法とパルス化(パルス幅120 μ s)をあわせて、シンプルなガスターゲット発生装置を開発した。真空排気系は、4段の差動排気系を、各1000L/s のTMP (一部IP) で構成し、4段の真空絶縁度として、 5×10^{-5} を得た。ノズルビーム発生部は、連続体と分子線という

流体としての扱いの大きくことなる境界であり、シミュレーションが困難な領域であるために、ノズルとスキマーの形状、大きさ、位置関係を変えて、実験的に最適な組み合わせを求めた。本装置では、ノズル径が1.5 mm、スキマースリットが $2.0 \times 3.0 \text{ mm}^2$ でその距離6 mm 程度で最大の分子線強度を得た。

- (2) ガスターゲットは、圧力換算にて、 $1 \times 10^4 \text{ Pa}$ 相当の高密度を実現した。これは、分子線密度に換算して $3 \times 10^{19} \text{ molecules/sr.s}$ となった。ターゲットサイズは、平坦部分として幅85 mm、厚み1.3 mm (FWHM)、長さ73.5 mm (時間換算で100 μs) となった。世の分子線発生装置は、ペンシルビーム型が主流であるのに対して、このような高密度化されたシート状分子線装置は、おそらく類を見ない存在となった。また酸素分子ビームは、10 K 程度まで冷却されたことを、分子線のパルス波形の計測と、酸素分子の収束実験にて検証した。運動量広がりには、 $\pm 10\%$ 程度と推定した。
- (3) 酸素分子が、スピン1及び磁気モーメント(2 Bohr-magneton)を持つことに着目し、永久磁石を用いた周期的な不均一磁場を発生する酸素分子ビームの収束装置を開発した。これを用いてガスシート発生装置内を走行する酸素分子ビームの収束を行い、ガスターゲット密度を2倍に増強することができた。偏極イオン源等での粒子の収束に用いられる回転対称の6重極磁石とは異なり、平面ビームの収束装置として、これも世に類を見ない開発となった。収束磁石は、磁極ギャップの大きなところでの球面収差の影響は残るものの、それも含めて設計どおりの収束機能であることを実験的に明らかにし、可変の焦点距離は、735 m/s 相当の速度をもつ酸素分子ビームに対し、10~35 cmを実現した。
- (4) ビームプロファイル検出系では、2段構成のMCPのアノードに、80 ns の時間で高速に光が減衰する、 $\text{Y}_2\text{SiO}_5: \text{Ce}^{3+}$ を材質とするイメージスクリーンを用いた。ターゲットで発生した電離イオンを最大ゲイン 1×10^6 での荷電増幅を行い、スクリーン上に実2次元ビームプロファイルを映像化させた。またこのビームプロファイルイメージをIIT (最大ゲイン 1×10^4) を付けたCCDカメラでゲート計測することにより、さらなる高感度化を実現した。
- (5) ビームプロファイルモニターとしての精度を評価した。電離イオンの収集電場での位置ズレは、最大0.3 mm と推定した。検出限界は一概には言えないが、酸素分子ガスターゲットで発生する単位時間・単位面積当たりのイオンペア数が、 $2.9 \times 10^5 \text{ ions/mm}^2/\text{s}$ 程度であれば有意なビームプロファイルが検出できることを示した。また、検出系は、ダイナミックレンジ60の範囲にて良好な直線性をもつことを示した。空間分解能は、ビーム水平方向で0.76 mm、垂直方向で1.51 mm 以下であることを、電子冷却された微小サイズビームで確認した。ビームから見たガスシートの厚み1.84 mm(FWHM)のため、垂直方向に限り、この厚み分の計測誤差が付け加わるデメリットも示した。
- (6) 実際のビーム計測では、HIMAC の典型的なガン治療ビームであるカーボンイオンビームを用いて、ビーム強度が $2.5 \times 10^8 \text{ ppb}$ 、ビームエネルギーが6-430 MeV/u のとき、2次元の実ビーム像をバンチ時間内である100 ns のIITゲート時間で計測することに成功した。

電子冷却された重イオンビームに対しても、クーリング過程のプロファイルをクリアに計測することができた。本装置の診断技術を用いることによりHIMACでのビームダイナミクスに関わる研究、特に不安定性に関する有意なデータ提供が行われるようになったことも示した。

論文の審査結果の要旨

橋本義徳氏の学位申請論文は、シンクロトロンノのビーム軌道を横切って45度に傾けた酸素分子によるガスシートを形成し、荷電粒子ビームがガス分子を電離して生ずるイオンを電場によってイオンコレクターに収集し、イオンの分布を画像化して観測することで、2次元のビームプロファイルが高速で観測可能な、プロファイルモニターの開発に関するものである。シンクロトロン等では、リング中を周回しているビームの空間的プロファイルを非破壊的に観測することは極めて重要であるが、これまで定常的に使用できる十分な性能のモニターを実現することは困難であった。このようなモニターとしては従来から、ビームによる加速器中の残留ガスのイオン化で生ずるイオン分布を観測することが行われて来たが、ビーム強度が低い場合には実用にならず、またイオン化領域が広いために空間分解能が低く、さらに1次元に投影されたプロファイルしか得られないと云う難点があった。1980年代頃からCERN及び Novosibirskにおいてシート状あるいはペンシルビーム状のガスジェットをリング内に噴射することで、電離イオン密度を高めた非破壊プロファイルモニターが開発されたが、ミリ秒程度以上の計測時間を必要とし、ビームバンチ内構造を観測することはできていない。これらは1次元の観測のみであったり、ガスジェットをパルス化するためにレーザー照射を行ったり、ジェットをスキャンしたりと、大がかりな装置であり装置の運転、維持管理が大変であったこともあり、現在まで実用に供されているものはNovosibirsk のペンシルジェットのみである。

そこで、橋本氏は放射線医学研究所の重粒子線シンクロトロンHIMACにおいて、 10^9 ppp以下の低強度の重イオンビームのプロファイル観測に十分な性能を有する、パルス状のガスシート式プロファイルモニターの開発を行った。氏は、真空系の設計及びシート状のガスジェット生成のためのノズル、スキマー、スリットの設計に関して、マッハ数、分子線速度、分子線温度、ノズルとスキマーの最適な相互配置及び寸法等について詳細な議論を重ねるとともに、多くの基礎実験に基づいて最適なガスジェット発生装置を設計し、それを実現している。更に、ガスシート・ジェットの厚さを更に薄くするために、マルチポール・ウィグラーと同様の永久磁石を用いた多極磁石により発生する磁場勾配が、酸素分子の磁気モーメントに及ぼす力を利用した収束系を極めて精緻に設計し、これにより酸素分子のシートビームを薄く絞ることに成功している。また、ガスシートの測定についても細心の注意が払われ、シートの信頼性も十分なものである。以上の申請者の並々ならぬ努力により、他に類を見ない時間幅 0.1msec (空間長 73.5mm)、厚さ1.3mm、幅85mm、圧力換算密度 1×10^{-4} Pa の均一なパルス・ガスシートを加速器の中で実現したことは、氏の実力と研究に対する情熱を伺わせ、驚嘆に値するものである。また、イオン収集電場が加速器に及ぼす影響、コレクターに達するイオン密度分布に及ぼす影響、またビームの空間電荷場がイオン分布に及ぼす影響等を詳細に検討し、それらを十分に低いレベルに抑えている。

完成した装置はHIMACの電子ビーム冷却されたArイオンビームのプロファイル計測にて評価され、最小ビームサイズは水平方向 0.76mm、垂直方向 1.51mmであることが観測された。これはイントラビームスキヤタリングより予想される最小ビームサイズと矛盾せず、分解能はこれ以上であることが示されている。更にHIMACビームに対して本装置の高速性を生かしたビーム計測の例がいくつか示されており、入射から加速終了に至る時々刻々のビームサイズの断熱減衰、x-yカップリングのチューン依存性やビーム電流依存性等、興味深いビームの挙動がみごとに観測されている。

以上のように、極めて高度の技術を要するパルス・ガスシートによるビームプロファイルモニターを、周到な計算と実験に基づいて見事に完成し、それらを最大漏らさず記述した論文には、橋本氏の並々ならぬ実力と見識の深さ及び情熱が伺われ、審査員一同感じ入った次第である。以上より総合研究大学院大学、高エネルギー加速器科学研究科、加速器科学専攻の博士論文に十分

値するものと判断し、審査員全員一致にて合格と判定する。なお、本研究は日本加速器学会より平成17年度技術貢献賞を受賞していることを付記する。長年に渡る研究成果を丹念にまとめた本論文は、まさに論文博士の真骨頂といえるであろう。