

超重元素探索実験に於ける He ガス発光を用いたビームプロファイルの測定

BEAM PROFILE MEASUREMENT USING HELIUM GAS LIGHT EMISSION FOR SUPERHEAVY ELEMENT SEARCH EXPERIMENT

渡邊環^{*,A)}, 鴨志田敦史^{B)}, 西隆博^{A)}, 内山暁仁^{A)}, 金子健太^{C)}

Tamaki Watanabe^{*,A)}, Astushi Kamoshida^{B)}, Takahiro Nishi^{A)}, Akito Uchiyama^{A)}, Kenta Kaneko^{C)}

^{A)} RIKEN

^{B)} National Instruments Japan Corporation

^{C)} SHI Accelerator Service Ltd.

Abstract

The newly constructed superconducting linear accelerator (SRILAC) continues to operate with the aim of discovering new superheavy elements following ever discovered 113 Nihonium, and production medical radiation isotopes At. In this experimental search for superheavy elements, due to the demand to extend the durability of the expensive Cm target as much as possible, the accelerated V beam must be adequately spread. Therefore, a He gas light emission monitor has been introduced to measure the beam width non-destructively and constantly. Since helium gas is flowing in the target chamber, the electrons of helium gas is excited by the collision with the beam. By monitoring the emitted light with a CCD camera when the excited electrons are de-excited, the beam profile can be obtained continuously. We report the measurement system and measurement results.

1. はじめに

理化学研究所に於いて、既設の理研線形加速器 RILAC (RIKEN Heavy-ion Linac) [1] をアップグレードするために、理研超伝導線形加速器 (SRILAC) [2] を新たに建設し、そのビームコミッショニングに成功した [3]。このアップグレードの目的は、森田グループが発見し、アジア初で命名された 113 番目元素「ニホニウム」 [4] に引き続き超重元素の探索と、がん治療薬として注目されている放射性同位元素 ^{211}At の製造 [5] を促進することである。現在、さらに重い 119 番超重元素の合成を目指し、RILAC と SRILAC で加速した V (バナジウム) ビームを、Cm (キュリウム) ターゲットに照射する実験を行っている。

2. He ガス発光を用いたビームプロファイル測定

2.1 RILAC/SRILAC と GARIS III

RILAC 後段と SRILAC の加速空洞群、新超重元素探索を目指す気体充填型反跳核分離装置 GARIS III (Gas-filled Recoil Ion Separator III) とがん治療用 RI 製造装置の配置図を Fig. 1 に示す。RILAC と SRILAC によって加速された V ビームは、ターゲットチェンバー内の Cm ターゲットに照射される。Cm ターゲットは、静止状態ではビームによる熱エネルギーで一瞬のうちに溶けてしまうので、直径 30 センチの円盤の外周に薄い膜状にした Cm ターゲットを用意して、その円盤を毎分 3000 回の速さで回転することによって、同じ場所に大量のビームが照射されない工夫が施されている。ここで GARIS III は、目的とする超重元素を、入射ビームやバックグラウンドとなる粒子から、高効率・超低バックグラウンドで分離する重要な働きを担う。GARIS III は電磁

石で超重元素の進路を曲げて選別するので、質量が同じ超重元素でも電荷が違えば軌道が変わってしまい、収集する事ができない。この問題を解決するために、ヘリウムガスを充填する事により電荷の平均値が一定の値に定まり、ターゲットからどのようなイオン価数で飛び出してきても、目的とする超重元素を収集する事が可能となっている。一方 Cm ターゲットは高価で貴重なため、可能な限りターゲットの耐久性を延ばす必要がある。

2.2 GARIS III のターゲットチェンバー

ビームが狭い範囲に集中すると、Cm ターゲットの劣化が速くなるので、ターゲット内に収めつつも十分に広

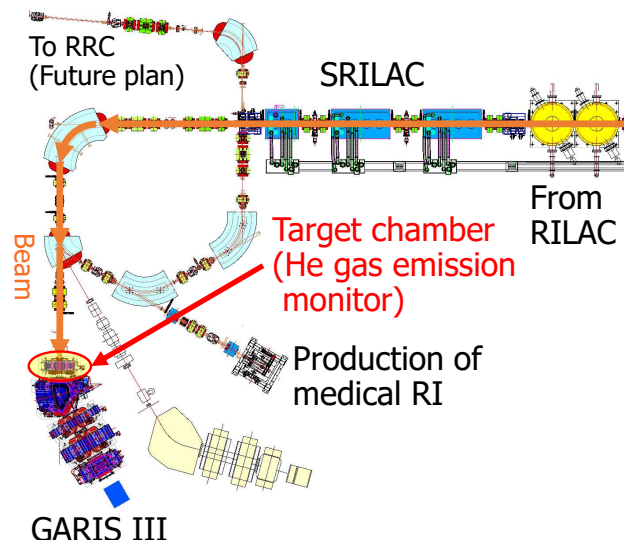


Figure 1: Schematic drawing of the RIKEN Heavy-ion Linac (RILAC), the upgraded Superconducting Linac (SRILAC), GARIS III, and the beam line dedicated to production of medical RIs.

* wtamaki@riken.jp

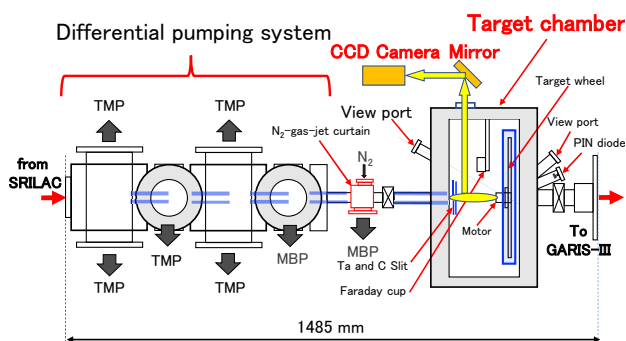


Figure 2: Schematic drawing of the differential pumping system and the target chamber for the GARIS III. The beam comes from the left side and hits the Cm targets. Since helium gas is flowing in the target chamber, the electrons of helium gas is excited by the collision with the beam. By monitoring the emitted light with a CCD camera when the excited electrons are de-excited, the beam profile can be obtained continuously.

げる必要がある。ターゲットチャンバーとその近傍の装置の概要を Fig. 2 に示す。ここで、ビームは紙面左側から差動排気システムを通り、ターゲットに照射され、GARIS III へと導かれる。差動排気システムでは、チャンバー内にバッフルと称する電極が上下左右に設置されており、またターゲット直前に設置されたカーボンスリットによってビームを絞っている。また、ターゲットチャンバーの上流と下流にはそれぞれビューポートがあり、ターゲットへのビーム照射の様を CCD カメラで常時監視している。さて、GARISIII に導入しているヘリウムガスは、ターゲットチャンバー内にも漏れ出ており、差動排気システムを通して排気されている。ビームが通過する際にヘリウムガスと衝突すると、ヘリウムガスの電子が一旦励起され、脱励起する際に光を発する。この

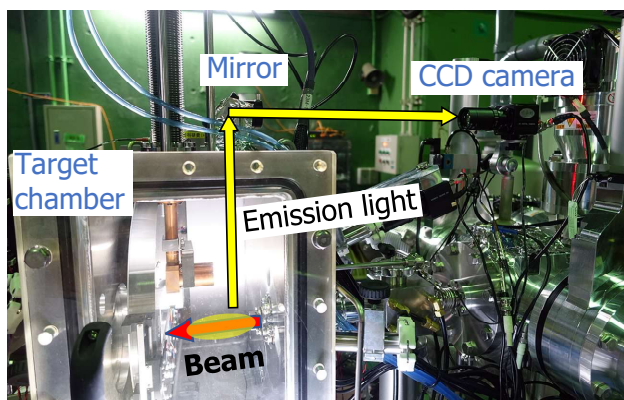


Figure 3: Due to the extremely high radiation dose near the target, the image sensor for the CCD camera deteriorates. In order to avoid this deterioration, the CCD camera does not directly receive the light, but the light that has passed through the viewport is reflected by the mirror, and the image is observed by the CCD camera that is located far from the target.

Table 1: Electrical Specifications of the Lens, CCD Camera and Video Server.

Lens for CCD Camera	
CCTV* Lens	For 1/3 or 1/4 inch sensor
Focus	Focal length 6-60 mm (Variable)
Iris	Manual F1.6
CCD Camera	
Model No.	SHL-019#
Effective pixels	NTSC 768 × 576
Electrical shutter	1/50 ~ 1 sec
Gain control	0.25 / 0.50 / 0.75 / 1.00 (Adjustable)
VIDEO Server	
Model No.	AXIS Q7404
Chanel number	4
Video compression	H.264 (MPEG-4 Part 10/AVC) Motion JPEG
Resolution	720×480 ~ 176×120
Frame rate	30 frames/s
Processor	ARTEPEC-3×4
Memory	Main 128MB×4, Flush128MB×4
CCTV*	Closed Circuit Television

特性を利用して、CCD カメラでこの光を常時監視することにより、ビームのプロファイルを非破壊で得ることが可能となった。

ターゲットチャンバーの写真を Fig. 3 に示し、これより He ガス発光モニターを HeLM と称する。これらは実験ユーザーによって製作されている。ここで、He ガスによる発光を受光するため、ターゲットチャンバー上部には受光窓を設けている。実験時のターゲット付近は、極めて高い放射線量の環境下であり、CCD カメラの受光素子は実験の経過とともに劣化する。HeLM で使用している CCD カメラは、CMOS 素子を搭載した一般的な小型監視カメラであるので、放射線による劣化を最小限に抑えるため、光が受光窓を出た直後にミラーで反射し、ターゲットから離れた場所に設置している CCD カメラで観測している。しかしながら、このシステムでも放射線損傷は避けられず、約二カ月前後で CCD カメラ本体を交換している。レンズは脱着可能なので、新しい CCD カメラに交換後再利用をしている。CCD カメラによって観測された発光の像は、アナログケーブルを利用してビデオサーバーに入力され、デジタル化された画像データをコントローラーが取得している。CCD カメラとビデオサーバーの仕様を Table 1 に示す。

2.3 LabVIEW と Web API による画像取得・解析プログラミング

ビデオサーバーで取得した画像を解析するために、ビデオサーバーに用意されている Web API (Application Programming Interface) を利用しローカルマシンから画

像の取得を行うことにした。ビデオサーバへの API アクセスおよび画像の保存は C++ の OpenCV ライブラリを用いて実装し、約 1 秒ごとに画像の取得を行うことで、ある程度のリアルタイム性を確保することができている。

画像の解析プログラムは、HeLM コントローラー内に LabVIEW によって構築されている。上記の Web API によって取得した画像データは、LabVIEW によって読み込み、ハードディスク内に 1 分毎に保存をしている。LabVIEW には、工業分野などで行われる目視検査の作業を自動化するため、画像処理アプリケーションを開発するための "Vision 開発モジュール" がある。このモジュールには、対話式に結果を画面上で確認しながら画像処理のアプリケーションを開発できるソフトウ

ア "NI Vision Assistant" が含まれており、このソフトウェアを用いて HeLM の画像解析のプログラムを構築した。具体的には、過去に測定した He ガス発光の画像を用いて、1 ステップずつ対話式に処理してその結果を確認しながら、望む処理と合っているか確認、という手順でプログラムを作製する。これにより、最終的な処理が確定すれば、それを LabVIEW の VI に変換し、メインのプログラムの中にサブ VI として組み込んでいる。NI Vision Assistant を用いることにより、短期間でプログラムを完成することができた。

上記プログラムのフロントパネルと測定された He ガス発光画像の解析結果を Fig. 4 に示す。ターゲットの詳細については、現時点では公開できないため、これ以降長さのディメンジョンを pixel とすることを予めご了承頂きたい。ここで、上下の画面は同じフロントパネル内にあるが、ページの選択によって表示を切り替える。上画面では、(a) ビーム進行方向に積分した発光強度の横方向分布とガウスフィットの結果、(b) He ガス発光の画像、(c) ガウスフィットした結果の 1σ や中心からのずれ、(d) フィットする範囲の選択 (マニュアル、直接数値入力) を示している。ビームの進行方向に向かって輝度を積分した結果が、ビームの横方向のプロファイルを表しており、ガウスフィットした 1σ をビーム幅と考えている。下画面では、上記ガウスフィットした 1σ の履歴を、上から 1 分、1 時間、1 日の 3 スケールで示し、変化の具合が一目瞭然に解るようにしている。実験ユーザーが要求するビーム幅 1σ の最大と最小の閾値を設定すれば、その値を外れた場合には、関係者に警告を自動メール送信する機能も付加している。尚、この He ガス発光の画像上には、既に放射線劣化の跡が斑点となって現れている。

仁科加速器研究センターの RI Beam Factory (RIBF) に於いては、加速器の運転や制御のために大規模な実験用機器を運用する分散制御システムソフトウェア環境 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System [6]) が導入されている。EPICS は、Channel Access (CA) という通信プロトコルにより、サーバーとクライアントのネットワーク通信を行っている。ここで、Input Output Controller (IOC) は、制御システムの制御対象機器と CA 通信のネットワークを接続する EPICS の重要なソフトウェアを担い、ネットワーク上 Process Variable (PV) と呼ばれるデータを提供する。He ガス発光の解析で得られた情報は、この PV に格納される。ただし、LabVIEW 側である HeLM のコントローラーは、EPICS 専用の LAN とは分離されているため、プロキシサーバーを通して、HTTP クライアントという手法により双方のデータの受け渡しを行っている。

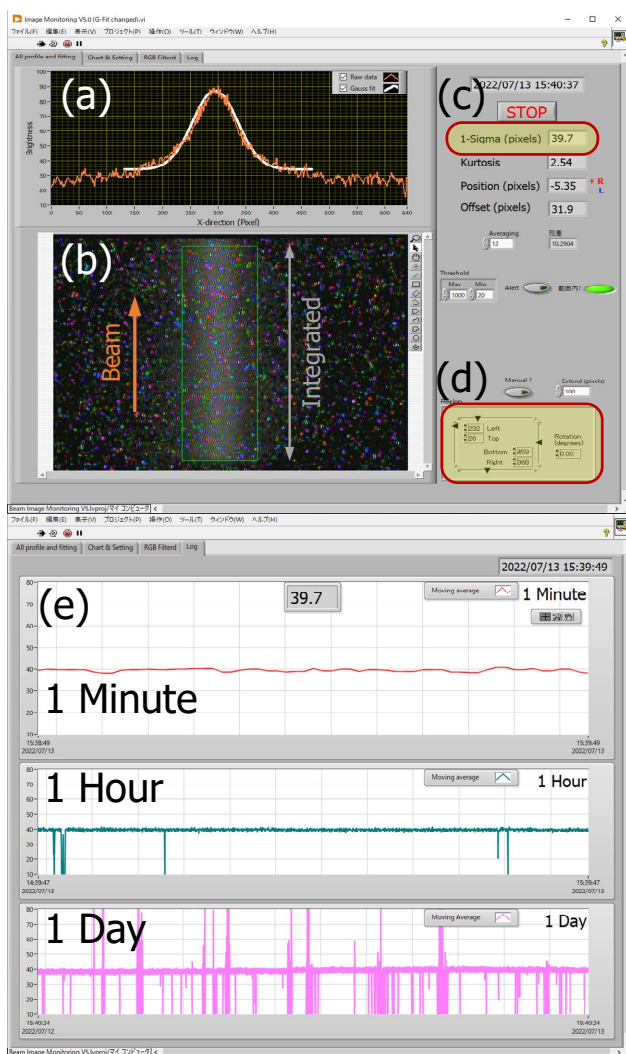


Figure 4: The front panels programmed with LabVIEW. (a) The result of integrating the brightness in the direction of travel of the beam and the result of Gauss fit, (b) image of He gas emission, (c) value of Gauss fit 1σ and the deviation from the center, (d) selection of the fitting region (manual, direct numerical input) and (e) Record of the Gauss fit 1σ .

3. HeLM による測定とビーム光学系の計算による考察

BeLM による測定とビーム光学系の計算を用いた、2022 年 6 月 29 日の加速器運転の考察を行う。29 日早朝、実験ユーザーより HeLM によるビーム幅が調整前の 37 pixels から 31 pixels まで減少しているため、ビーム光学系の再調整の依頼を受けた。ビーム幅を拡げながらも、かつビームの通過効率が十分になるようなビーム

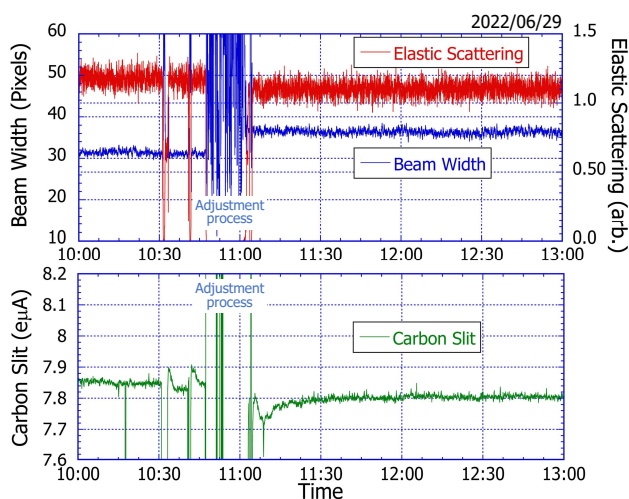


Figure 5: Measured results of the elastic scattering (red line), beam width measured by the HeLM (blue line), and current of carbon slit (green line).

光学系の計算 [7] を実施し、その計算結果を基に調整を行った。Figure 5 は、上から順に、ビーム強度に比例する弾性散乱強度のユーザー測定値 (赤)、HeLM 測定によるビーム幅 (青)、カーボンスリットの電流値 (緑) の測定結果を示している。ここで、10 時 45 分～11 時にビーム光学系の調整を実施している。この調整により、ビーム幅を 31 pixels から調整前の 37 pixels に戻すことができた (Fig. 5 の青線を参照)。上流 (e11) とターゲットチャンバーでのファラデーカップで測定した電流の比率を通過効率とすると、調整によって 97% から 94% に減少している。Figure 5 に於ける赤線は、実験ユーザーの弾性散乱の強度の履歴であるが、同様な減少を示している。同図の下段のプロットは、ターゲット直前に設置したカーボンスリットの電流値を示しているが、同様に減少している。カーボンスリットに当たった電流値の測定では、この測定結果に示されている通り、ビーム照射直後は一時強度が上がったのちに徐々に下がっていくという特性がある。照射中は He ガスが漏れてきているので、どのような物理プロセスが起こっているかは定かではなく、この測定値は参考程度にしている。

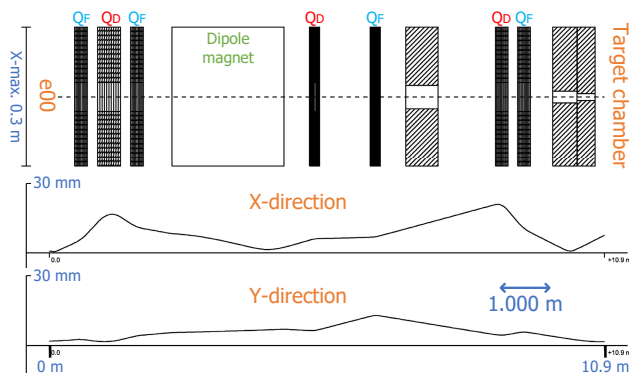


Figure 6: Calculated result of the beam envelope from e11 to target chamber.

ターゲットチャンバーまでのビーム光学系の計算結果を Fig. 6 に示す。ここでは、最上流に設置してあるワイヤースキャナーを用いて Q スキャン法によってエミッタンスやツイスパラメータを求め、そこから転送行列を計算し、ターゲットで最適な条件となる光学系をシミュレーションしている。最後差動排気を通した上でスポット幅を広くするため、標的直前でビームがクロスしている。さらに、He ガス発光モニターで測定したビーム幅を観測しながら、最下流から 2 つ目の四重極磁石の磁場を微調整しながら最適化を行った。このように、HeLM によるビーム幅の測定とビーム光学系の計算を合わせることで、ビームのより精密な制御が可能となり、HeLM と弾性散乱の測定結果は定性的に一致していることを確認している。

4. 結論

新規に建設した超伝導線形加速器 SRILAC に於いて、超重元素探索実験に於いては、ターゲット近傍にヘリウムガスを流しているが、ビームとの衝突によって励起された電子が脱励起する際に発せられる光を CCD カメラで常時監視し、ビームのプロファイルを得ている。この手法は、非破壊で常時測定できる優位性がある。測定やフィッティング等の解析は LabVIEW によってプログラミングされ、大規模な EPICS 制御システムと共有化することにより更に有用な情報となっている。この HeLM による測定とビーム光学系の計算を合わせることで、ターゲットでのビームのより精密な制御が可能となった。

謝辞

超重元素探索実験に関する詳しい情報を提供頂いた、羽場 宏光氏、森本 幸司氏、加治 大哉氏に、CAD データを提供頂いた渡邊 裕氏に感謝致します。

参考文献

- [1] M. Odera *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Sec. A, vol. 227, pp. 187 – 195, 1984. doi:10.1016/0168-9002(84)90121-9
- [2] N. Sakamoto, Journal of Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 17, No.2, 2020, pp. 70-79.
- [3] N. Sakamoto *et al.*, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sept. 2020, Online, pp. 679-683; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/FRPP/FRPP05.pdf
- [4] K. Morita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 103201.
- [5] H. Haba, Drug Delivery System 35, No.2, 114-120 (2020).
- [6] Experimental Physics and Industrial Control System; <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [7] T. Nishi *et al.*, Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sept. 2020, Online, pp. 116-119; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/TH00/TH0008.pdf