

極低運動量移行電子弾性散乱による陽子半径測定のための電子ビームラインの構築

CONSTRUCTION OF ELECTRON BEAMLINE FOR THE MEASUREMENT OF PROTON RADIUS BY ULTRA-LOW Q VALUE ELECTRON ELASTIC SCATTERING

武藤俊哉[#]、青柳泰平、柏木茂、鹿又健、齊藤寛俊、須田利美、高橋健、塚田暁、長澤育郎、南波和希、南部健一、二宮慎吾、日出富士雄、本多佑記、三浦禎雄、濱広幸

Toshiya Muto[#], Taihei Aoyagi, Shigeru Kashiwagi, Ken Kanomata, Hiroto Saito, Toshimi Suda, Ken Takahashi, Kyo Tsukada, Ikuro Nagasawa, Kazuki Nanba, Kenichi Nanbu, Shingo Ninomiya, Fujio Hinode, Yuki Honda, Sadao Miura and Hiroyuki Hama

Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University

Abstract

At Research Center for Electron Photon Science (ELPH), Tohoku University, we have developed to determine the proton charge radius by low-energy electron scattering under the lowest-ever momentum transfer. The precious electron scattering experiments, which may impacts to “Proton Radius Puzzle”, requires high duty and high quality electron beam with energy spread $\Delta p/p < 0.1\%$, beamsizes at target $\sigma < 1\text{mm}$ on various beam energy (~several tens MeV). Low energy high power electron linac at ELPH has provided high duty, high power electron beam with various beam energy, but the quality is not enough for precious electron scattering experiments. We designed new beamline to provide low energy spread beam by using beam slits at dispersion sections. In this paper, we reports design work of electron scattering beamline and results of emittance and energy spread measurement.

1. はじめに

μ 水素原子分光で測定された陽子荷電半径と電子分光、電子散乱で測定された荷電半径が一致しないという陽子半径パズルと呼ばれている問題がある。しかしながら過去の電子散乱実験による半径は解析モデル依存性がある。そこで東北大学電子光理学研究センター(ELPH)ではモデル依存性を排除した電子弾性散乱実験を計画している。高精度の電子散乱実験を行うためにはエネルギー可変、高デューティサイクルで 0.1% 以下のエネルギー分散が電子ビームに要求される。そこで ELPH にある最大エネルギー 70MeV の低エネルギー電子ライナックを用いることを計画している。この電子ライナックのビーム輸送系を改造して今までの放射性同位体(RI)製造の運転と電子散乱実験を両立するビームラインの設計を行った。電子散乱実験ではビームラインに設置された二つのエネルギー分散部にある二つのビームスリットを用いてエネルギー分散を要求の 0.1% にコリメートする。本発表では ELPH における電子弾性散乱実験の概要とそれを実現するためのビームライン設計とライナックから現在供給されている電子ビームの性能評価の結果を報告する。

2. 陽子半径問題

2.1. Proton Radius Puzzle

陽子は宇宙を構成する物質の基本粒子であり陽子とそれを原子核とする水素は現代物理学にとって重要な

[#] muto@lns.tohoku.ac.jp

研究対象である。約一世紀以上の現代物理学の中で陽子は中心的な研究対象であったが陽子の全てがいまだに理解されているわけではない。

近年、陽子のもっとも基本的な物理量の一つである電荷半径が「Proton Radius Puzzle」としてネイチャー誌[1]やサイエンス誌[2]の表紙を飾っている。電子散乱や水素原子分光で決定された電荷半径と電子を μ マイナス粒子に置換した μ 水素原子分光から決定された電荷半径が大きく食い違っているのである[3]。これが“Proton Radius Puzzle”である。その原因は現在でも不明である。

2.2. 電子散乱

電子散乱は陽子や原子核の構造を解明する上で最も優れた方法であり、電子は電磁相互作用のみで原子核と相互作用するために反応機構に不定性がなく実験データから陽子や原子核内部の電磁構造をあいまいさなく明らかにできる[4]。

電子散乱はシンプルな実験である。加速された電子ビームをターゲットに照射し散乱電子のエネルギーと散乱角度を測定するだけである。電子散乱を特徴づける運動学変数は 4 元運動量移行 Q^2 のみで

$$Q^2 = q^2 - \omega^2 = 4E_e E_{e'} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

ここで q は 3 次元運動量移行、 ω はエネルギー移行、 $E_e E_{e'}$ は散乱前後の電子のエネルギー、 θ は散乱角度である。詳しくは参考文献[5]に譲るが電荷半径は電荷形状因子 $G_M(Q^2)$ の $Q^2=0$ での傾きで定義されるので電荷半径を高精度に測るためには電荷形状因子 $G_M(Q^2)$ を非

常に小さい Q^2 で測定する必要がある。このような非常に小さい Q^2 で測定するためには低エネルギー ($E_e < 100$ MeV) で様々なエネルギーの電子ビームが容易に供給できる電子加速器が必要でありこの目的に ELPH の低エネルギー大強度電子リニアックは合致しているのである。

しかしながら電荷半径の精密測定をするためには $G_M(Q^2)$ の系統誤差を 10^{-3} 以下にすることが要求される。つまり、電子ビームにおいても 10^{-3} ($=0.1\%$) 以下のエネルギー精度が必要となる。また散乱電子をとらえるスペクトロメータの性能からターゲットでの電子ビームサイズ $\sigma \leq 1$ mm、広がり角 $\sigma' \leq 5$ mrad にする必要がある。

3. 大強度電子リニアックのビーム性能

低エネルギー大強度電子リニアックは東日本大震災で被災した 300 MeV リニアックの部品を集積して再構成した電子リニアックであり[6]、各種メンテナンスは行っているものの主要なコンポーネントは 50 数年前の 300 MeV リニアック建設時のものをそのまま使用している。しかしながら現在でも 300 Hz の高繰り返し、平均電流 120 μ A でビーム出力 7 kW という大電流を供給できる。しかしながら主要な用途である RI 製造においてビームの質に対する要求は低く、平均電流が十分であれば問題はなかったため過去においては電子ビームの性質について十分に調べられてこなかった。近年、Q スキャン法によってエミッタンスの測定が行われた[7]が主に使用される電子エネルギー 50 MeV の場合のみであった。陽子半径測定実験では 20~60 MeV と広範囲のエネルギーを使用するために今回予備実験として電子エネルギーを変えた時のエミッタンス測定を行った。同様に電子散乱で重要であるエネルギー分散についても測定した。

3.1. エミッタンス測定

電子エネルギー $E_e = 20, 30, 40, 50, 60$ MeV の時のエミッタンスを Q スキャン法により測定した。典型的な例として $E_e = 20$ MeV の時の Q スキャンの結果を Figure 1 に示す。

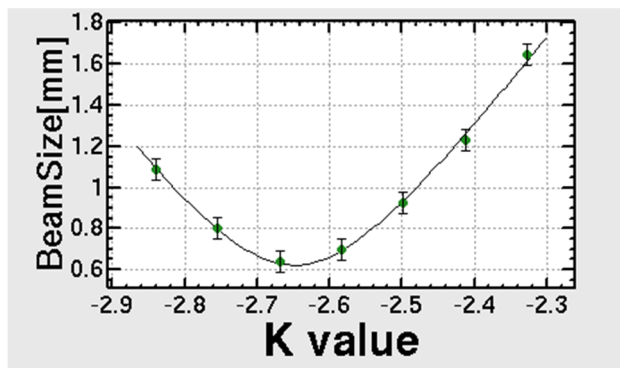


Figure 1: The result of Q-scan measurements with $E_e = 20$ MeV. In this case, horizontal normalized emittance was measured $\epsilon_n = 42 \pm 2$ mm·mrad.

測定結果を Table 1 にまとめる。測定結果からわかるように各エネルギーでエミッタンスや Twiss パラメータの値がかなり違う。今までのデータの蓄積がないためにこれらの測定値が定常的に出ているのかその日の状態によるのか判断することは現時点ではできない。したがって今後もデータを蓄積していく必要があると考える。

3.2. エネルギー分散の測定

高精度の陽子半径実験を行うためにはエネルギー分散を 0.1% に抑えなければならない。次節で述べるようにスリットを使うことでエネルギーの選別を行うことを考えているが現状どのようなエネルギー分散のビームが来ているのかを知っておく必要がある。そこで加速された電子ビームを 90 度偏向する分散部に設置したスクリーンモニターでエネルギー分散の測定を行った。スクリーンでのディスプレイは 0.797 m である。通常の RI 製造の時のセッティングの時のスクリーン像を Figure 2 に示す。

Table 1: Results of the emittance measurement. Twiss parameters show at exit of the last accelerating structure which is entrance of beam transport line.

E_e [MeV]	ϵ_{nx} [mm·mrad]	ϵ_{ny} [mm·mrad]	β_x [m]	α_x	β_y [m]	α_y
20	42 ± 2	37 ± 3	1.71 ± 0.2	-1.76 ± 0.2	3.98 ± 0.6	-1.56 ± 0.2
30	44.8 ± 0.1	66 ± 5	1.917 ± 0.002	-0.0840 ± 0.0001	7.0 ± 1	-2.52 ± 0.4
40	64.2 ± 0.1	91 ± 6	3.183 ± 0.001	-1.1625 ± 0.0003	8.7 ± 2	-1.76 ± 0.3
50	40 ± 3	64 ± 6	5.8 ± 1	-1.31 ± 0.3	12.1 ± 3	-2.90 ± 0.7
60	77.3 ± 0.4	65 ± 5	6.789 ± 0.006	-1.361 ± 0.001	4.2 ± 2	-0.59 ± 0.2

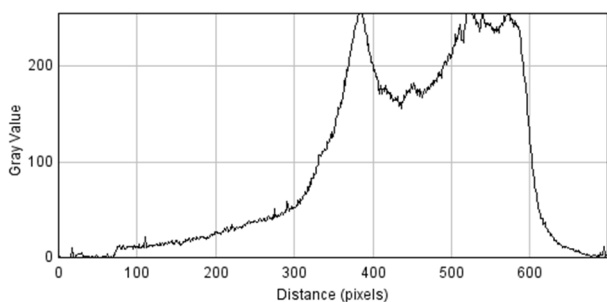


Figure 2: The energy spread at RI production. 1 pixel = 0.112 mm.

Figure 2 からエネルギー分散は全幅で約 3.5%あることが分かった。通常 RI 製造ではエネルギー分散に注意してではなく平均電流を最大にするようなチューニングを行っているのでこのようなビームが実験室に導かれていることが分かった。一方、電子散乱実験では RI で要求される大電流は必要なく多くても通常の 1/100 程度の $1 \mu\text{A}$ で十分であることがわかっている。また通常のセッティングでは電子銃直下のプレバンチャーの電圧が過剰でオーバーバンチングしている可能性が示唆されていた。そこでプレバンチャーの電圧を PALMERA で求めた最適値まで下げてからエネルギー分散を測定しながら加速器のチューニングを行った。チューニング後のエネルギー分散のプロファイルを Figure 3Figure に示す。

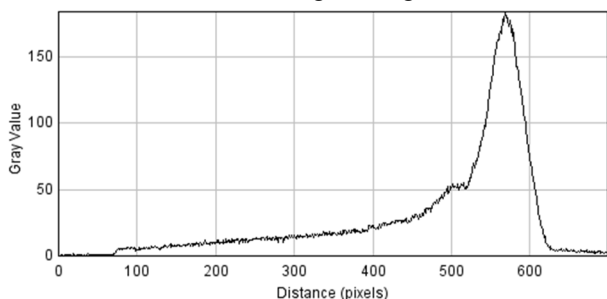


Figure 3: The energy spread after beam tuning.

Figure 2、Figure 3 からわかるように明らかにエネルギー分散が改善しているのがわかる。この時のエネルギー分散は 0.315%(RMS)であった。またビームの透過率も RI 製造時の 90%と大きく悪化はしていない。しかしながらショットごとのエネルギーの変動が 1%程度と大きいことが分かったので今後クライストロン等の安定化を図っていく必要があることが分かった。

4. 電子散乱用ビームラインの設計

電子散乱用のビームラインの設計にあたって最初に考えなければならないことは低エネルギー大強度電子リニアックは電子散乱専用になるわけではなく今までの RI 製造等の照射実験が変わりなく行えるように整備する必要がある。また実験室の配置上電子散乱用のビームラインのビームダンプを置ける位置はほぼ一意に決まってしまう。そこで現在の RI 製造のターゲットシステムを 3.5 m 下流に移して空いたスペースに偏向電磁石を入れて電子

散乱ビームラインに電子ビームを導けるようにすることにした。偏向電磁石で付いたディスページョンを消すためにもう一台の偏向電磁石を入れることとしビームダンプの位置との関係から 2 台の偏向電磁石の偏向角を 60 度としトータル 120 度偏向されて電子散乱ターゲットに導かれる。ビームラインの全体図を Figure 4 に示す。

最初に述べたように陽子半径実験では電子散乱ターゲットでビームサイズ 1 mm 以下、エネルギー分散 0.1% のビームが要求される。前節の測定からわかるように電子リニアックから出てきた電子ビームのエネルギー分散はこの要求を満たさない。そこでエネルギー分散を絞るために分散部でスリットを用いることを考えた。実験室でのバックグラウンド軽減のために二つの分散部で二段階にビームを絞ることとした。まず 90 度分散部のスリット 1 で 0.2% 程度までエネルギー分散を絞ってから実験室の 120 度分散部のスリット 2 で要求値の 0.1% まで絞り込む。

設計した光学系を Figure 5 に示す。光学計算は SAD[8]を用いた。初期パラメータとして $\alpha_x = \alpha_y = -2.5$ 、 $\beta_x = \beta_y = 10 \text{ m}$ を用いた。スリットでのエネルギーの選択性をよくするためにスリットでの水平ベータ関数を絞っている。またビームパラメータが変化したとしても最初の 4 台の 4 極電磁石でマッチングが取れることを計算で確認している。

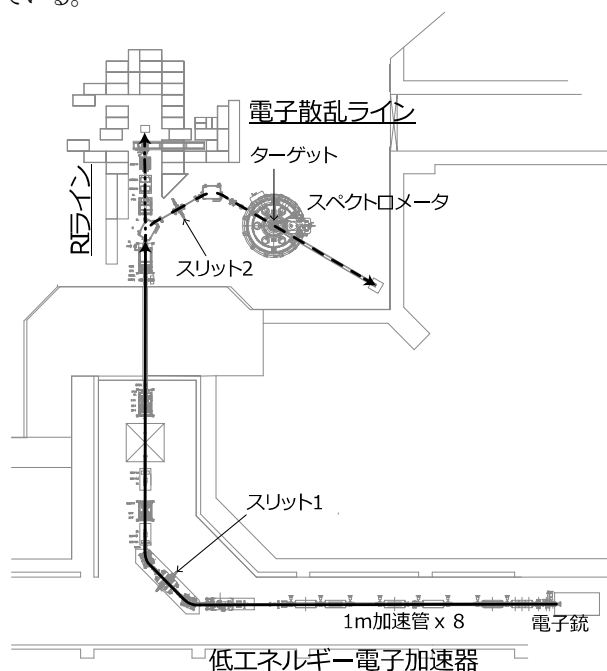


Figure 4: The layout of low energy high power electron linac. The electron beam, which is accelerated by eight 1m accelerating tube, passes through 90 degree dispersion section to experimental room. For RI production, the electron beam goes straight to irradiated target in experimental room. For electron scattering experiment, beam bends by 120 degree dispersion section, then goes to scattering target.

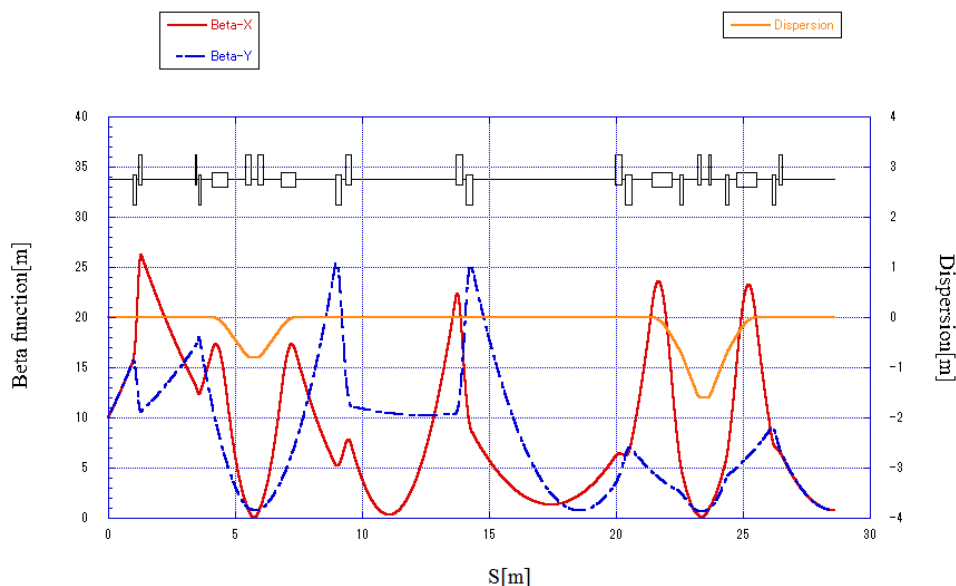


Figure 5: Optics for electron scattering. This shows from last accelerating tube.

スリットでのエネルギー選択が機能しているかを確認するためにトラッキングを行った。エネルギーは最も条件が厳しい 20 MeV の時で規格化エミッタンス $\epsilon_{nx,y} = 50 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、エネルギー分散は厳しい条件として全幅 3%をとった。スリット1(SL1)の幅 $1.586 \text{ mm} = 0.2\%(\Delta p/p)$ 、スリット2(SL2)の幅は $1.596 \text{ mm} = 0.1\%(\Delta p/p)$ にセットした。

結果を Figure 6、Figure 7 に示す。Figure 6 からわかるようにエネルギー分散が $\Delta p/p = 0.032\%$ (RMS) に選択できていることがわかる。スリットの透過率はこの場合でも初期分布の 3%程度あり電子散乱に十分な電流量が取れていることがわかる。スリット 2 を調整して $\Delta p/p = 0.1\%$ (RMS) になるように広げれば更なる電流増加もできる。また Figure 7 からビームサイズが両方向とも 1 mm に絞れていることが確認できた。

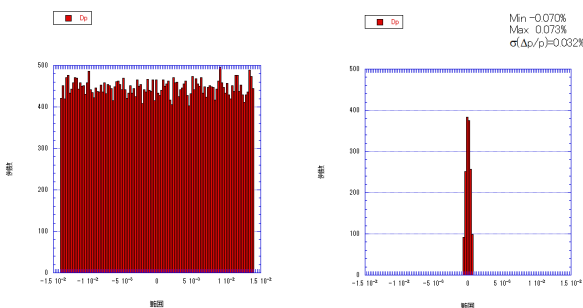


Figure 6: Tracking results. Left: Initial energy distribution 3% (Full width). Right: Energy distribution at the target.

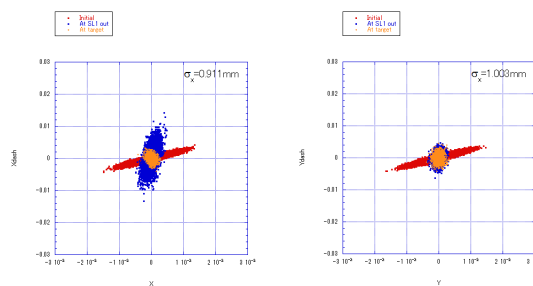


Figure 7: Tracking results. Left: Horizontal phase space distribution. Right: Vertical phase space distribution. Beam sizes are $\sigma = 1 \text{ mm}$ at target on both direction.

5. 現状

以上の設計をもって現在ビームラインの構築を行っている。すでに RI 照射部とそれに付随するシールドの移動、RIビームラインのための新規の4極電磁石の据え付けが終了しており10月からの共同利用に向けての準備は整いつつある。また60度偏向電磁石の製作も終了しており実験室に据え付けた。電子散乱用ビームラインに使用する4極電磁石の製作の準備が進められており今冬までにすべてのビームラインコンポーネントが整う予定になっている。

6. まとめ

陽子半径精密測定に向けたビームラインの設計を行った。通常の共同利用実験と共存する形で電子散乱実験が行える準備を整えた。光学計算から要求値の $\Delta p/p \leq 0.1\%$ 、 $\sigma_{x,y} \leq 1 \text{ mm}$ を達成できることが確認できた。現在ビームラインを構築中である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H06340(代表:須田利美)、18K13553(本多佑記)、の助成を受け推進している。

参考文献

- [1] R. Pohl, A. Antognini, F. Nez, F. D. Amaro, F. Biraben, J.M. Cardoso, D. S. Covita, A. Dax, S. Dhawan, L. M. Fernandes, A. Giesen, T. Graf, T. W. Hänsch, P. Indelicato, L. Julien, C. Y. Kao, P. Knowles, E. O. Le Bigot, Y. W. Liu, J. A. Lopes, L. Ludhova, C. M. Monteiro, F. Mulhauser, T. Nebel, P. Rabinowitz, J. M. Dos Santos, L. A. Schaller, K. Schuhmann, C. Schwob, D. Taqqu, J. F. Veloso and F. Kottmann, *Nature* 466, 213 (2010).
- [2] A. Antognini, F. Nez, K. Schuhmann, F. D. Amaro, F. Biraben, J. M. Cardoso, D. S. Covita, A. Dax, S. Dhawan, M. Diepold, L. M. Fernandes, A. Giesen, A. L. Gouvea, T. Graf, T. W. Hänsch, P. Indelicato, L. Julien, C. Y. Kao, P. Knowles, F. Kottmann, E. O. Le Bigot, Y. W. Liu, J. A. Lopes, L. Ludhova, C. M. Monteiro, F. Mulhauser, T. Nebel, P. Rabinowitz, J. M. dos Santos, L. A. Schaller, C. Schwob, D. Taqqu, J. F. Veloso, J. Vogelsang and R. Pohl, *Science* 339, 417 (2013).
- [3] C. Carlson, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 82, 59 (2015).
- [4] T. Deforest and J. D. Walecka, *Adv. Phys.* 15, 1 (1966).
- [5] 須田利美 *et al.*, “低エネルギー電子散乱による陽子電荷半径測定”, *加速器学会誌* Vol.15, No.2, 2018.
- [6] K. Nanbu *et al.*, “東北大学電子光理学研究センターの加速器の現状”, *Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagoya, Japan, Aug. 3-5, 2013, pp. 381-384.
- [7] K. Takahashi *et al.*, “60MeV 電子ライナックを用いた光核反応による RI 製造のための照射 γ 線プロファイル測定”, *Proceedings of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Tsuruga, Japan, Aug. 5-7, 2015, pp. 395-399.
- [8] <http://acc-physics.kek.jp/SAD/SADHelp.HTML>