

cERL 照射ビームラインのコミッショニング COMMISSIONING OF IRRADIATION BEAM LINE IN CERL

東直*, 島田美帆, 帯名崇, 宮島司, 本田洋介, 山本将博, 中村典雄,
下ヶ橋秀典, 森川祐, 松村宏, 豊田晃弘, 吉田剛, 保住弥紹, 原田健太郎

Nao Higashi*, Miho Shimada, Takashi Obina, Tsukasa Miyajima,

Yosuke Honda, Masahiro Yamamoto, Norio Nakamura, Hidenori Sagehashi,

Yu Morikawa, Hiroshi Matsumura, Akihiro Toyoda, Go Yoshida, Mitsugu Hosumi, Kentaro Harada

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

At High Energy Accelerator Organization (KEK), the irradiation experiments are started using Compact ERL accelerator (cERL). Now, the production of ^{99}Mo , parent isotope of $^{99\text{m}}\text{Tc}$ used as medical RI and the life-time prolongation of asphalt by electron beam irradiation are considered. Last year, a new irradiation beam-line was constructed, branching from the existing circulation part. This new beam-line is required to acquire the variability of the beam-size and beam energy, reduce the beam loss and coexist with other studies conducted at cERL. These requirements are satisfied at the operation in June 2019. The first beam commissioning using this new irradiation beam-line was carried out in April 2019, and cERL passed the facility inspection, acquiring new operation objects of the RI production by electron beam and the physicochemical study. The maximum beam current is $10\ \mu\text{A}$ for both objects, and the maximum beam energy is 21 MeV for the RI production and 10 MeV for physicochemical study respectively. The first irradiation experiment with Mo and asphalt was carried out in June 2019. In the Mo irradiation experiment, the data of the dependence of RI production efficiency on the beam energy and the distribution of produced RI along the beam direction were acquired, and those would be the basis for the design of the mass-production machine. In the next operation in October 2019, the RI production with MBq-order and the irradiation to the several kinds of asphalt are scheduled, and the improvement of the operation of the irradiation beam-line is expected.

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のコンパクト ERL (cERL) は, Photon Factory (PF) に取って代わる次世代放射光源の原理実証機として 2009 年に建設が開始され, 2013 年にコミッショニング運転が始まった [1-3]. ところが, リング型放射光源においてエミッタンスが $1\ \text{nm}\cdot\text{rad}$ を切るような HMBA (hybrid multi bend achromat) ラティスが考案され, KEK はこのような情勢を鑑み, 2016 年に ERL 計画を将来光源から産業利用へと方針を転換した [4, 5].

現在 KEK では ERL 計画の産業利用目的として, 半導体リソグラフィのための EUV 光源 [6], 中赤外 FEL [7], そして医療用 RI である $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の親核種である ^{99}Mo の製造や電子ビーム照射によるアスファルトの高寿命化を検討している [8, 9]. 現在, 実際に cERL を使用して検討が進んでいるのが, Mo やアスファルトへの照射実験と中赤外 FEL である. 本稿では照射実験のために建設された照射ビームライン, 及びそれを使用した beam commissioning について説明する.

照射ビームラインの建設は 2018 年 10 月から開始され, 2019 年 4 月に照射ビームラインのコミッショニングを開始, 施設検査に合格した. 6 月の運転では試料への照射実験を行い, beam tuning, 及び試料取り出しの手順を確立した. 次の 10 月期の運転では, RI 分離試験のための MBq 級生成実験などを実施する予定である.

照射ビームラインには

1. beam-size の可変性
2. loss の低減
3. 照射エネルギーの可変性
4. 周回部運転との共存

が要求される. 1. に関して, Mo やアスファルトなど, 様々な試料に照射することが予定されており, それぞれの熱負荷に適切な beam-size で試料に照射することが必要となる. 2. に関して, 試料はターゲット・チェンバー内で照射されるが, 試料の取り出しのためにはこのチェンバーに接近する必要があるため, ビーム照射後の残留放射線量は十分低くなくてはならない. 3. に関して, 様々な試料に照射することや, RI 生成断面積のエネルギー依存性を調べるためには照射エネルギーが十分に制御できる必要がある. また, その際の energy spread 及び error が把握できている必要がある. 4. に関して, 先に述べた中赤外 FEL のための study などと, 1 日の中で運転時間を分け合う必要がある. このために, 運転の切り替えがスムーズであることが要求される.

2. 照射ビームラインの概要

2.1 これまでの cERL

Figure 1 に cERL の全体像を示す. 500 kV DC 光陰極電子銃で加速された電子ビームは, buncher でバンチ圧縮され, 超伝導の 2-cell 3 空洞からなる入射空洞で最大 5 MeV まで加速される. 入射器診断ラインと周回部 (北直線部) は偏向電磁石の励磁の有無によって軌道を振り分けることができる. 周回部モードでは, 電子ビームは 1.3 GHz の共振周波数を持つ 9-cell 2 空洞 (ML1, ML2)

* nao.higashi@kek.jp

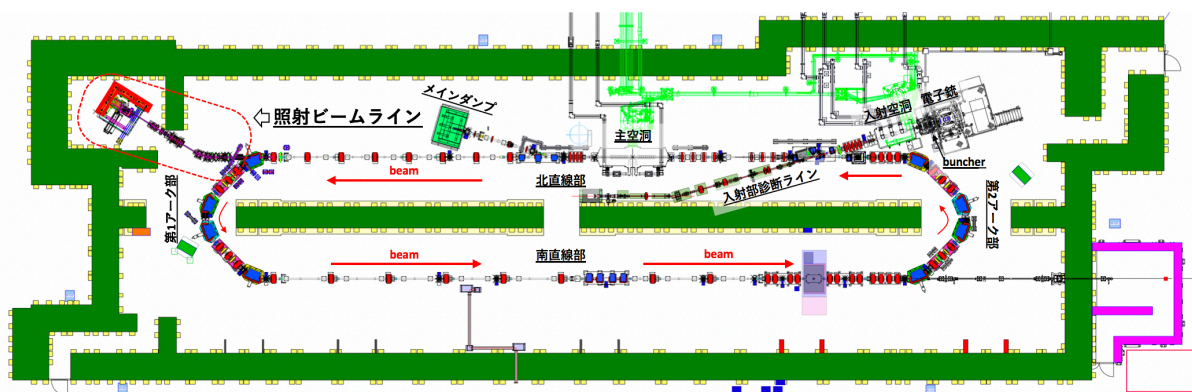


Figure 1: The whole image of cERL with the new irradiation beam line.

からなる主空洞 (ML: Main Linac) にて最大 20 MeV まで加速され、第 1 アーク部、南側直線部、第 2 アーク部と周り、北直線部に戻ってきて、再度 ML に逆位相で入射、減速 (エネルギー回収) され、Main Dump にて電子ビームは捨てられる [10].

2.2 照射ビームラインの追加

照射ビームラインは 2018 年 10 月から建設が開始され、2019 年 3 月に終了した。Figure 2 に今回建設した照射ビームラインを示した。北直線部を通った電子ビームは、第 1 アーク部の偏向電磁石を励磁しないことにより直進し、今回新たに建設された照射ビームラインに入射する。照射ビームラインに入射した電子ビームは、2つの偏向電磁石で曲げられ、これまでダンプ室と呼ばれていた空間に向かう。標的試料はヘリウム置換されたカプセルに封入され、さらに真空引きされたターゲット・チェンバーに設置され、電子ビーム照射される。ターゲット・チェンバーは上流側と Be 窓で真空が切れており、さらに周回部との間には GV が 2つ設置され、ターゲット・チェンバー内の真空が上昇した場合にはインターロックで GV が閉じ、周回部の機器、特に超伝導空洞への影響が最小限になるように保全が用意されている。ターゲット・チェンバーの後ろにはダンプが控えており、ファラデーカップ (FC) として照射ビームラインまで輸送されたビーム電流値を測定することができる。

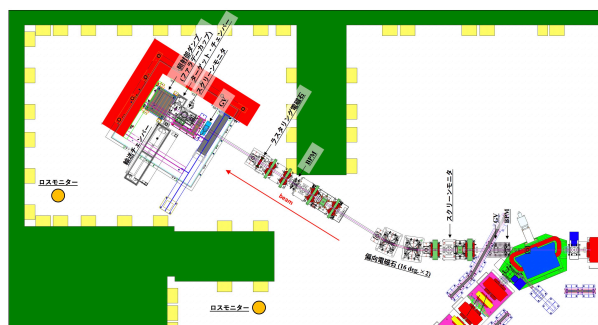


Figure 2: The layout of the irradiation beam line.

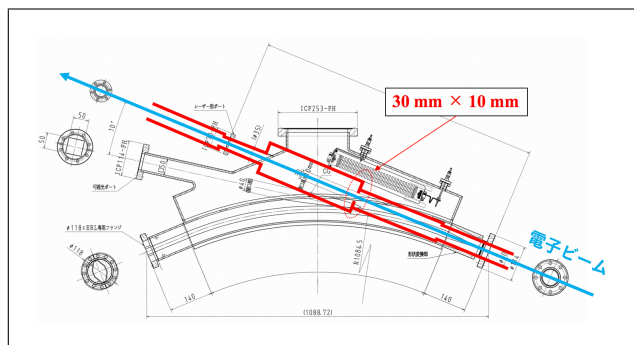


Figure 3: The existing vacuum duct placed at the first bending magnet of the first arc.

2.3 照射ビームラインの Optics 設計

照射実験は CW の平均電流で高々 $10 \mu\text{A}$, bunch charge としては 0.0077 pC と小さく、空間電荷効果は無視できる。

照射実験の optics 設計には、いくつか条件がある。今回、照射ビームラインは第 1 アーク部最初の偏向電磁石から接続されるが、既存のダクトに用意されていたレーザーアライメント用ビームポートを接続先として利用した。ここが照射ビームラインで最も狭い物理アパーチャーであり、 $30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ と、vertical に厳しい (Fig. 3)。また、試料表面での最終的なビームサイズは照射ターゲットの熱的及び真空的保護の観点から、 $1 \text{ mm} \leq \sigma_{x,y} \leq 3 \text{ mm}$ を目安に設計した。設計した optics を Fig. 4 に示す。

3. 2019 年 4 月期コミッショニング

照射ビームラインの beam commissioning は、2019 年 4 月に開始された。Mo への照射を想定し、 $p \sim 17.6 \text{ MeV/c}$ の運動量で調整を開始した。初日は 5 Hz の burst モードで照射ビームライン・ダンプへの到達を確認、電子銃下流と照射ビームラインダンプの FC 電流値の比較から、100% の輸送効率を確認した (Fig. 5)。運転後の照射ビームライン周辺のサーベイでは高々 $0.2 \mu\text{Sv/h}$ と照射ビームライン設置前と変わらず異常はなかった。ターゲット・チェンバー外側表面では CW $2 \mu\text{A} \times 4$ 分間の運転後、最大 $7.8 \mu\text{Sv/h}$ とこちらも問題になるレベルでは

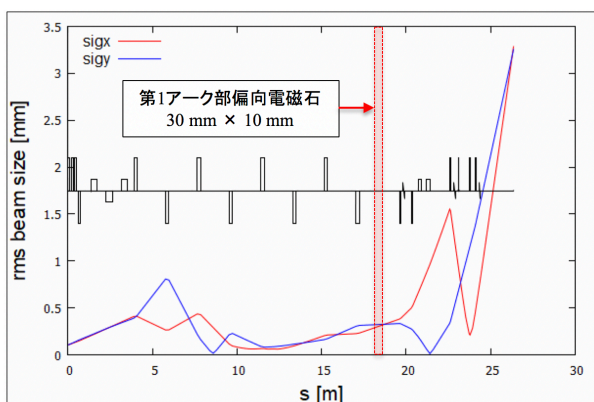


Figure 4: The beam-size of the irradiation beam-line. At the outlet of the ML2, $s = 0$ m. The vacuum duct placed at the first bending magnet of the first arc ($s \sim 18$ m) limits the physical aperture of this beam-line. The beam-size are calculated using $\varepsilon_{n,x,y} = 0.1$ mm·mrad.

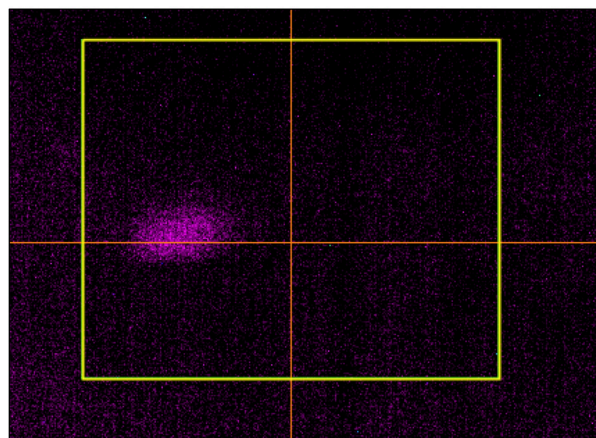


Figure 5: The beam profile at the upstream of the sample capsule. $\sigma_x \sim 4$ mm, $\sigma_y \sim 3$ mm.

なかった。

CW 運転の実施においては、コリメータを調整し、照射ビームラインにおけるロスをも最小限に抑えるようにした [11]。ロスの低減に有効であったのは入射部から周回部に合流する分散関数の大きい部分 ($\eta \sim 0.21$ m) に設置された COL2 と呼ばれるコリメータで、低エネルギー側の cut が有効であった。Figure 6 にコリメータ調整の一例を示す。青線が照射部ターゲットの FC 電流、赤と緑が照射ビームライン付近に設置されているロスモニターのレベル、黒線が COL2 の挿入位置を示す。COL2 を挿入していくとロスモニターのレベル (赤・緑) が下がっていく様子が見える。途中で COL2 を深く入れすぎたため beam core を削っており (青線の急激な減少)、COL2 を元に戻して、ロスモニターのレベルが抑制され、beam core を削らないように設定した (ここでは 7 mm 程度)。

また、アスファルトへの照射を想定して、低いエネルギー ($p \sim 8.7$ MeV/c) での調整を実施した。この時は ML2 を完全に detune した。

4 月 12 日に原子力安全技術センターによる施設検査を受け、17 日付けで合格した。この結果、cERL の使用目的として新たに“電子ビームを使用した放射性同位元素の製造と理化学的研究”が追加された。最大電流は共に $10 \mu\text{A}$ で、放射性同位元素の製造 (Mo 照射実験) が目的の場合は 21 MeV、理化学的研究 (アスファルト照射実験) が目的の場合は 10 MeV が最大エネルギーとなる。

施設検査合格後、ターゲット・チェンバーに空のカプセルを設置し、実際に照射を実施してターゲット・システムの健全性を確認した。 $p \sim 10$ MeV/c, 18 MeV/c の 2 つの運動量で、最大 $9 \mu\text{A}$ 、最長 30 分の照射を合計 10 回実施した。

4. 2019 年 6 月期の照射実験

6 月期はカプセルに Mo もしくはアスファルトを実際に封入して照射を行った。照射実験は中赤外 FEL のための study と平行して行われた。cERL の運転は 9 時半から 23 時半までの 14 時間が可能であり、6 月期では通常、9

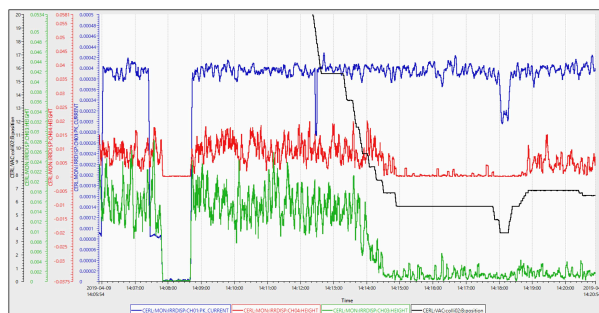


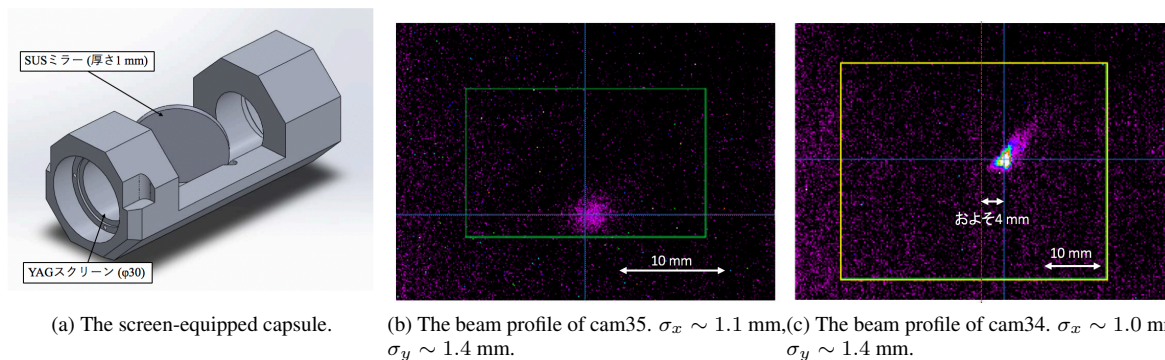
Figure 6: The behavior of the loss-reduction due to the collimator. Blue: The current of the faraday cup of the irradiation beam-line dump. Red and Green: The level of the loss monitor placed at the irradiation beam line. Black: The insertion position of the collimator.

時半から 14 時頃までを照射実験、それ以降を中赤外 FEL の study というように時間が割り振られた。6 月期は 16 日間の beam 運転日の中で、9 日間照射実験を実施でき、また別途 4 日間を照射実験のための調整に使用することができた。

6 月期はまず始めに 4 月期に確立した $p \sim 18$ MeV/c の照射条件を大きな調整なしに復元できることを確認した。その後、コリメータの調整、CW 運転を実施し、加速器及びターゲット・チェンバーの健全性を確認した。

6 月期の運転では実際の試料照射実験の前の調整期間中に、スクリーン付きカプセルを使用した beam 調整を行った。空のスクリーン付きカプセルをターゲット・チェンバーに設置し、このスクリーン (cam35) で中央に照射された時のターゲット・チェンバー直上流の既存スクリーン (cam34) における beam position を記憶し、この offset を実際の照射実験の際に再現することで、試料の中心に照射できるようにした (Fig. 7)。

また、アスファルトの照射の際は、温度上昇を抑えるため、ラスタリング電磁石を用いて、ビームを直径 20 mm 余まで広げた状態で照射を実施した。



(a) The screen-equipped capsule.

(b) The beam profile of cam35. $\sigma_x \sim 1.1$ mm, $\sigma_y \sim 1.4$ mm.

(c) The beam profile of cam34. $\sigma_x \sim 1.0$ mm, $\sigma_y \sim 1.4$ mm.

Figure 7: In the operation of this June, the beam was adjusted to emit the center of the sample using cam35 before the practical irradiation, and the offset of the beam at cam34 was recorded.

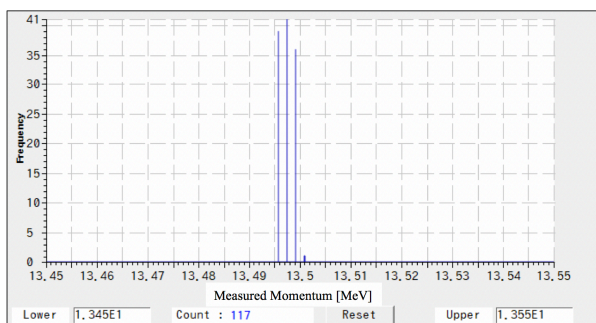


Figure 8: The stability of the measured momentum.

4.1 エネルギーの掃引

今回、 ^{99}Mo 生成効率のエネルギー依存性を調査するため、11.5 MeV/c から 19.5 MeV/c を 2 MeV/c 刻みで照射することが課された。これらは 17.5 MeV/c の設定をもとに、ML2 の加速電圧を下げることで対応した。しかし 19.5 MeV/c については ML の加速電圧を上げるだけでは対応できないため、入射空洞の加速電圧をおよそ 1 MV 上げることで対応した。この時の optics は ML 直上流まで中赤外 FEL study のものを採用し、ML 下流を改めて照射モード用に最適化することで対応した。

運動量は第 1 アーク部の偏向電磁石とその直下にあるスクリーンにて測定した。安定度は 0.01 MeV/c 以下だが (Fig. 8), 系統誤差として現在 1.6 % 程度を見積もっている。この多くは偏向電磁石の磁場測定と実際に cERL 設置、運用されている時の磁場との誤差に起因する。Energy spread については同様にスクリーンでの beam-size から推定し、大きい時で 6.2×10^{-4} であった。

4.2 Mo による beam profile の評価

実際にどのような beam profile で Mo 試料が照射されたかは、照射された試料の放射化分布を Imaging Plate (IP) で測定することで調べることができる。Figure 9 に、 $p = 19.50$ MeV/c の時の Mo 照射実験における、ターゲット・チェンバー直上流に設置されたスクリーン (cam34) での beam profile とカプセル最上流に設置された試料 (Disk1) の IP を比較した。cam34 の方の beam-size は

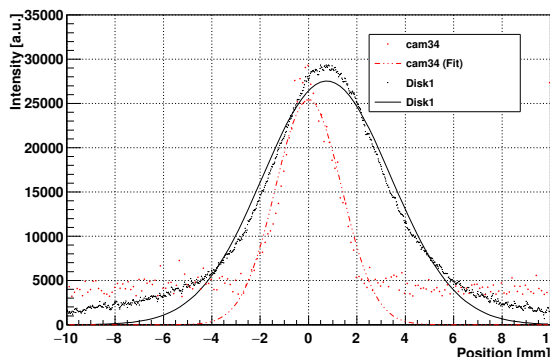


Figure 9: The comparison of the beam profile of cam34 and imaging plate of the irradiated sample. Disk1 was placed at the uppermost stream of the capsule when $p = 19.50$ MeV/c.

$\sigma = (1.4 \pm 0.3)$ mm, IP の size は $\sigma = (2.66 \pm 0.02)$ mm となっており、電子ビームと ^{99}Mo を生成する γ 線の拡散が見て取れる。また、IP の中心が 0.75 mm 程度ずれているが、beam size と Mo ディスクの直径 $\phi 35$ mm を考えれば許容範囲である。

4.3 Mo 照射実験の結果

Mo 照射試験の一例として、Fig. 10 に Mo 試料に照射した際の核種ごとの生成収率エネルギー依存性を示す [8]。20 MeV/c 程度の運動量では、 ^{99}Mo 以外の不純物となる他の核種の生成量が相対的に小さく、製薬材料及び放射性廃棄物の観点から電子ビームにおける ^{99}Mo 生成において望ましい運動量領域であることが示された。

5. まとめ

cERL を利用した照射実験計画が開始され、2018 年度に ^{99}Mo の生成やアスファルトなどを照射できるビームラインが建設された。2019 年 4 月、施設検査を合格し、cERL にて“電子ビームを使用した放射性同位元素の製造と理化学的研究”が可能となった。共に最大電流は $10 \mu\text{A}$ で、放射性同位元素の製造 (Mo 照射実験) が目的の場合は 21 MeV, 理化学的研究 (アスファルト照射実験)

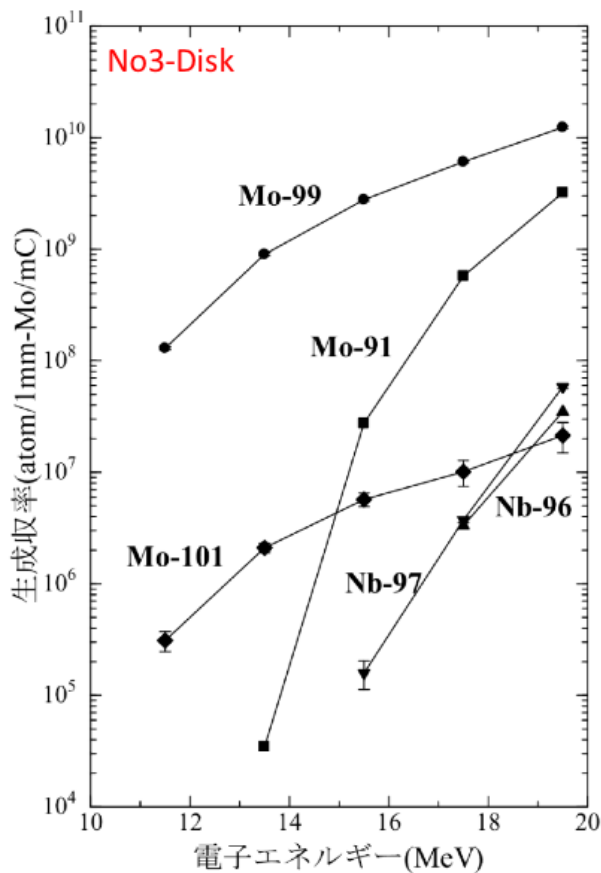


Figure 10: The energy dependence of RI production [8].

が目的の場合は 10 MeV が最大エネルギーとなる。6 月期の運転では実際に Mo やアスファルトへの照射実験をほぼ毎日実施し、beam tuning の手順を確立した。bunch 電荷や加速電圧、電磁石などの設定条件が異なる中赤外 FEL の study などと 1 時間程度でスムーズに切り替えることが可能となった他、照射エネルギー（運動量）を ($\pm 1.6\% \pm 0.062\% \pm 0.01 \text{ MeV}/c$) の精度で制御することができた。beam-size もラスタリング電磁石を用いることで 1–10 mm 程度の広い照射半径を実装することができた。また、照射後の残留放射線量も十分に低く、照射直後の試料取り出しもスムーズに実施できた。

6. 今度の予定

本年度の残りの cERL 運転として、10 月期と 2020 年 3 月期を予定している。今後の運転では、アスファルトへの照射実験が増え、また ^{99}Mo の生成量を増やしていく予定であり、照射 beam operation のさらなる効率化、また中赤外 FEL の study との切り替え時間の短縮が期待される。これを実現するために、

1. 照射ビームラインでの運動量測定
2. 設計 optics を一括反映させるツールの開発
3. 照射実験 beam operation のマニュアル化・自動化
4. ML 直上流までの optics の共通化

などが考えられる。

謝辞

本照射実験は株式会社アクセルレーターとの受託研究委託により行われております [12]。また RI 製造に関しては株式会社千代田テクノ、アスファルト照射実験に関しては東亜道路工業株式会社との共同研究になります [13, 14]。照射実験における RI 生成・解析・貯蔵に際しまして KEK 放射線科学センターに、また、試料と治具、及びビームダンプの製作・加工に関して KEK 機械工学センターに感謝の意を表したく存じます。最後に、cERL の運転に際しまして、cERL collaboration に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] KEK PF, “フォトンファクトリー次期光源検討委員会中間まとめ”, Dec, 2005; http://pfwww.kek.jp/outline/pf_future/jikikogen.pdf
- [2] Y. Kobayashi *et al.*, “RECENT PROGRESS OF CONSTRUCTION FOR COMPACT ENERGY RECOVER LINAC”, Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai, Naka-gun, Ibaraki, Japan, pp. 66–69.
- [3] S. Sakanaka *et al.*, “CONSTRUCTION AND COMMISSIONING OF CERN INJECTOR AND STATUS OF CERN RETURN LOOP”, Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 3-5, 2013, Nagoya, Japan, pp. 897–901.
- [4] ESRF Orange Book 2014; http://www.esrf.eu/apache_files/Upgrade/ESRF-orange-book.pdf
- [5] KEK, “KEK Project Implementation Plan”, June 30, 2016; <https://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/KEK-PIP.pdf>
- [6] 中村典雄 他, “ERL-FEL を用いた半導体リソグラフィ用高出力 EUV 光源”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, pp. 702–706.
- [7] 加藤 龍好 他, “cERL を用いた高繰り返し中赤外自由電子レーザーの開発”, these proceedings, THPI015.
- [8] 原田 健太郎 他, “cERL における RI 製造、電子線照射ラインの建設と照射試験報告”, these proceedings, WEPH015.
- [9] 森川 祐 他, “cERL 電子線照射部における標的冷却システムの開発”, these proceedings, WEPH017.
- [10] T. Obina *et al.*, “1mA STABLE ENERGY RECOVERY BEAM OPERATION WITH SMALL BEAM EMITTANCE”, Proceedings of the 10th International Particle Accelerator Conference, May 19-24, 2019, Melbourne, Australia, pp. 1482–1485.
- [11] 坂中 章悟 他, “コンパクト ERL におけるビーム電流約 1 mA の運転”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 8-10, 2016, Chiba, Japan, WEOM15, pp. 291–295.
- [12] 株式会社アクセルレーター; <https://www.accelerator-inc.com>
- [13] 株式会社千代田テクノ; <http://www.c-technol.co.jp>
- [14] 東亜道路工業株式会社; <https://www.toadoro.co.jp>