

cERL 電子線照射部における標的冷却システムの開発

DEVELOPMENT OF TARGET COOLING SYSTEM IN cERL ELECTRON BEAM IRRADIATION SECTION

森川祐[#], 山本将博, 保住弥紹, 原田健太郎, 井上均, 松村宏, 濁川和幸, 野上隆史,
多田野幹人, 豊田晃弘, 内山隆司, 吉田剛

Yu Morikawa[#], Masahiro Yamamoto, Mitsugu Hosumi, Kentaro Hosumi, Hitoshi Inoue,
Hiroshi Matsumura, Kazuyuki Nigorikawa, Takashi Nogami, Mikito Tadano, Akihiro Toyoda,
Takashi Uchiyama, Go Yoshida

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

At cERL in KEK, an electron beam irradiation section for industrial use of accelerators has been newly constructed, and in June 2019, Radioactive Isotope (RI) production and asphalt reforming test have been conducted. The irradiation beam line can supply electron beam with a maximum energy of 19.5 MeV and a maximum current of 10 μ A. In the irradiation section, it is necessary to remove the heat generated by the beam irradiation from irradiated samples (target). In addition, during production of RI, the target is required to be sealed. Therefore, we developed a target cooling system that maintained a sealed structure. In our cooling system, the target is encapsulated and this capsule is indirectly cooled by contacting the cooling stage. In development, mock-up tests were also conducted using an electron beam welding machine as a heat source in order to demonstrate the performance of the cooling system. This time, we report on the thermal design, mock-up tests, and operation status of this cooling system.

1. はじめに

cERL では加速器の産業利用を目的とした電子ビーム照射部が新たに建設され、2019年6月よりRadioactive Isotope(RI)の製造やアスファルト改質試験が実施されている。本照射部では最大エネルギー19.5 MeV、最大電流 10 μ A の電子ビームが照射可能である。照射部において、被照射試料(標的)はビーム入射により生じる熱を除去する必要がある。また、RI の製造の際には、標的は密閉されていることが要求される。そこで、我々は、密閉構造を維持した標的冷却システムを開発した。今回報告する冷却システムでは、標的が封止されたアルミ合金製カプセル(以下、カプセルと称す)に冷却ステージが接することで、カプセルが間接冷却される。開発においては、冷却システムの性能実証のため、電子ビーム溶接機を熱源とした模型試験も行なった。アルミ合金の軟化温度 200°Cをカプセルの運用限界とすると、模型試験の結果から 1 kW 程度の入熱でも運転可能であることが確認された。また、本冷却システムは、標的を封入できればカプセルの形状や標的の状態は問わず利用可能であり、多様な照射実験に応用できる。今回は本冷却システムの熱設計や模型試験、運用状況について報告する。

2. 標的冷却システムの設計

2.1 電子線照射部の概要

Figure 1 に照射部の構造を示す。標的は照射チャンバーに設置され電子ビームを受ける。照射チャンバーはベリリウム製のビーム窓を介して上流のビームラインと接続されており、真空空間としては分離されている。照射

チャンバーは外部空間と隔離するために真空ポンプは直結されておらず、後述の輸送チャンバー越しに真空排気される。照射チャンバーの真空度は 10Pa 程度であり、隔膜真空計(Capacitive Diaphragm Gauge : CDG)でモニターされている。標的を設置せずともビーム調整ができるように照射チャンバー後部には銅製のビームダンプが接続されている。このビームダンプはファラデーカップとしても機能し、ビーム電流の測定も可能となっている。標的の出し入れは照射チャンバー側部に接続される輸送チャンバーにて行われる。この輸送チャンバーにはトランスファーロードが備わっており、真空環境を維持したまま標的の設置が可能である。また、RI 製造試験においては、輸送チャンバー内に格納された標的は真空環境を維持したまま RI 試料棟まで輸送される。

2.2 カプセル方式による標的設計

RI 製造では万一の事故においても製造した RI が飛散し周辺環境の汚染を起こさないように、密閉構造中に標的を置かなければならない。今回、この課題を解決するためカプセル内に標的を設置して電子ビームを受ける機構を開発した。これにより標的はカプセルと照射チャンバーの2重密閉構造中に封止される。Figure 2 に典型的なカプセルの構造を示す。カプセルの後部より標的を入れ、これに蓋をして密閉する。カプセル内のガス雰囲気は空気とすると放射線化学反応による O₃、NO_x などの腐食ガスや 41Ar などの放射化ガスが発生する。このため蓋を締める作業はヘリウム置換されたグローブボックス内で行ない、カプセル内はヘリウム雰囲気としている。Figure 2 のカプセルでは最大 ϕ 38 mm \times L80 mm の標的が収容可能である。カプセル内部には標的固定用のボルトタップがあり、標的の設置精度向上とともにカプセル

[#]yu.morikawa@kek.jp

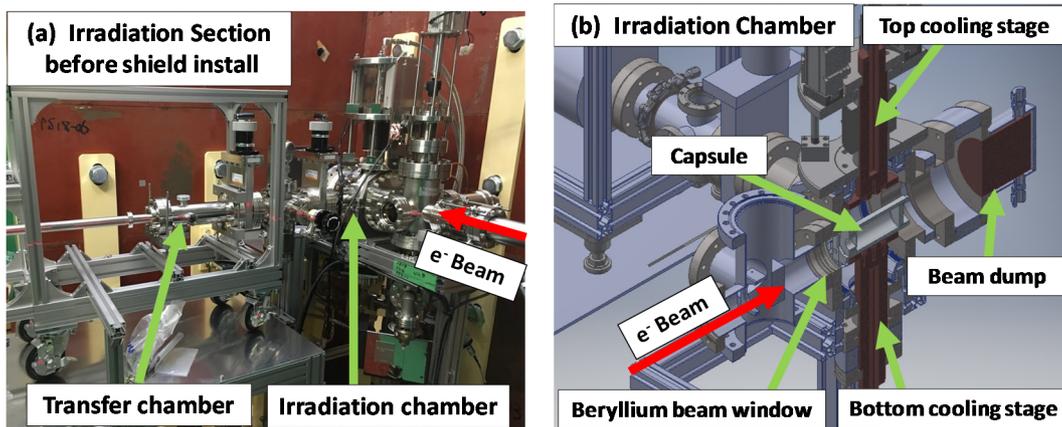


Figure 1: Structure of electron beam irradiation section. (a) Overview of irradiation section. (b) Cross section of irradiation chamber.

に押し付けることで熱輸送における接触熱抵抗の低減を図っている。カプセル本体と蓋部の真空シールには O リングのもとアルミエッジシールを用いたものの 2 種類が開発済みである。カプセル前部にはビーム導入用の窓部があり、典型的にはサイズ $\phi 20 \text{ mm} \times t1 \text{ mm}$ になっている。RI 製造時にカプセル自体の放射化を低減するため、カプセルの材質には低原子番号素材が好ましく、アルミ合金を採用している。カプセルの構造条件は後述の冷却ステージに設置できることであり、多様な形、材質が適用可能である。

2.3 カプセルの冷却方法とその性能

カプセルには 45° 斜角の面が 4 つあり、この 4 面を水冷された上下の銅製冷却ステージに押し当てることで冷却する。斜面に接触させることで接触面積を増やすとともに、製作誤差や据付け誤差があっても押し付けにより接触できるようにしている。Figure 3 にカプセルが冷却ステージに設置される様子を示す。下部のステージは回転機構を有し、 90° 回転することでカプセル設置ポジションと照射ポジションを切り替えている。上部ステージは圧縮空気による上下駆動機構を有し、最大 6 気圧でカプセルを押し付けることが可能である。

cERL 電子線照射部ではエネルギー 21 MeV、平均電流 10 μA 、ビーム強度 200 W を上限に原子力規制庁より運転許可を得ている。本冷却システムは最低 200 W の冷却性能を有する必要がある。この冷却システムの性能評価には、カプセルと冷却ステージの接触面の熱伝導率を知る必要がある。接触面の熱伝導率は表面粗度や押し付け圧力に依存し、幾つかの評価式が知られる[1-3]。下記にその 1 つである橘の式[3]を示す。

$$K = \frac{1.7 \times 10^5}{\frac{\delta_1 + \delta_0}{\lambda_1} + \frac{\delta_2 + \delta_0}{\lambda_2}} \times \frac{0.06P}{H} + \frac{10^6 \lambda_f}{\delta_1 + \delta_2} \quad (1)$$

K : 接触熱伝導率($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

δ : 表面粗さ $Ra(\mu\text{m})$, δ_0 : 接触相当長さ($23\mu\text{m}$)

λ : 熱伝導率(W/mK),

(λ_f は雰囲気ガスの熱伝導率)

P : 接触面の押し付け圧力(bar)

H : 軟性材料側のビッカース硬さ

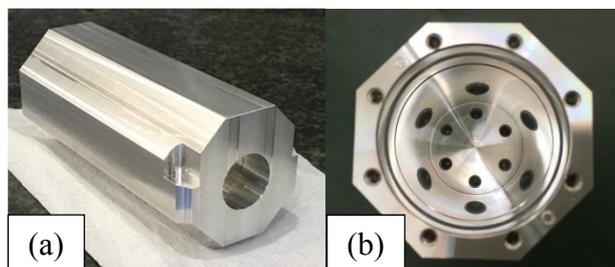


Figure 2: Typical structure of capsule. (a)Front view (b)Back view.

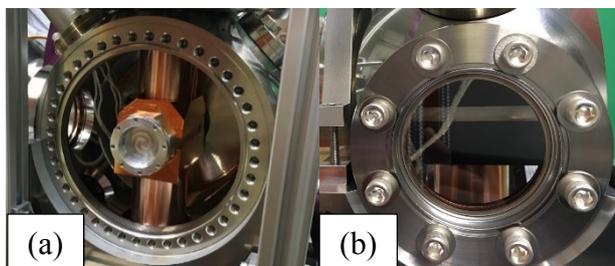


Figure 3: Capsule set in cooling stage. (a)Back view. Stage and capsule are in irradiation position. (b)Side view. This side surface of cooling stage is blackened for IR imaging.

橘の式は 2 つの項からなり、第 1 項は接触による熱伝導を意味し、第 2 項は接触面間に存在するガスによる伝導の寄与を意味する。照射チャンバーは 10 Pa 程度の真空環境であるので、ガス伝導による第 2 項は有意な値を持たない。第 1 項を見ると接触による熱伝導は押し付け圧力に比例し、表面粗度で除した値となる。冷却ステージ、カプセルの表面粗度 Ra は $1 \mu\text{m}$ 以下となるように製作している。また冷却ステージの押し付け圧力は 4 気圧で運用している。これから(1)式よりカプセルと冷却ステージの接触熱伝導率は $2450(\text{W}/\text{m}^2\text{K})$ 程度と見積もられる。

Figure 4 は RI 製造の典型例である、金属モリブデンに電流値 10 μA の電子ビームを照射した場合の発熱分布を表す。評価には高エネルギー粒子反応のモンテカルロ法シミュレーションコード FLUKA[4]を用いた。横軸はビーム軸であり、縦軸は 1 cm 辺りの発熱量である。電子ビームのエネルギーは 10, 15, 20 MeV の 3 通りを計算し

た。ビームエネルギー20 MeVであっても、深度3 mmで発熱量はピークを迎え、深度10 mm程度でピーク値の1/10まで発熱量は下がる事が分かる。

Figure 5はこれら発熱分布と接触熱伝導率を使用した温度分布の解析結果である。解析には汎用有限要素解析ソフト ANSYS を使用した。カプセル部の最高温度は75°C程度であり、アルミ合金の軟化温度200°Cを十分に下回り安全であると言える。

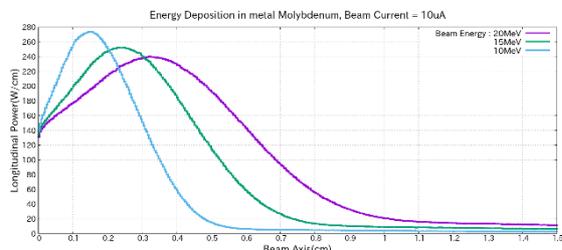


Figure 4: Energy Deposition in metal Molybdenum.

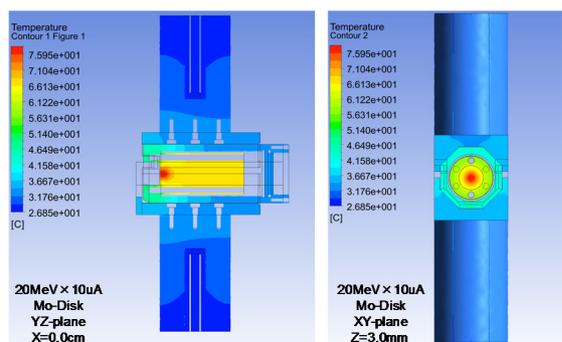


Figure 5: Temperature distribution of capsule target.

3. 模型試験による冷却性能評価

3.1 模型試験の設計

冷却系の性能確認のため模型試験を行った。Figure 6に製作した模型を示す。冷却ステージは実機同様のものを製作し、この冷却ステージを水冷された銅ブロックで挟み込んでいる。さらに銅ブロックにはバネによる押付機構が備わっており、冷却ステージの押付圧力は可変となっている。

3.2 押付圧力依存性

Figure 7は大気環境中で押付圧力を変えながらカプセル部の温度を計測した結果である。熱源には30 Wラバーヒータを使用した。押付圧力に比例して接触熱伝導だけが変化すると仮定すると、接触熱伝導率の圧力依存性に関する比例係数 $K_{contact}$ を見積もることができる。この評価には下記のモデルを仮定した。

$$\Delta T = \frac{W}{S(K_{contact}P + K_{gas})} + \Delta T_{conduction} + \Delta T_{film\ drop} \quad (1)$$

K : 接触熱伝導率

$K_{contact}$: 接触熱伝導寄与 ($W/m^2K/bar$)

K_{gas} : ガス伝導寄与 (W/m^2K)

W : 入熱量 (W)、 S : 実効熱伝導面の接触面積 (m^2)

P : 接触面圧力 (bar)

ΔT : 温度上昇 (K)

$\Delta T_{conduction}$: 熱伝導寄与

$\Delta T_{film\ drop}$: 固体流体間の境膜温度降下

接触面積 S は熱源の面積と近い値を取るが、今回の系で正確にこの値を求めるのは難しい。下記では概算としてヒーター押付面積である $2\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ を仮定した。実験結果にモデルを適用して、 $K_{contact}$ は $712(W/m^2K/bar)$ と見積もることができた。押付圧力4気圧かつ真空環境の場合、接触熱伝導率は $2850(W/m^2K)$ となる。この値は先の橋の式で求めた値より16%ほど高い。



Figure 6: Mock-up of capsule cooling system.

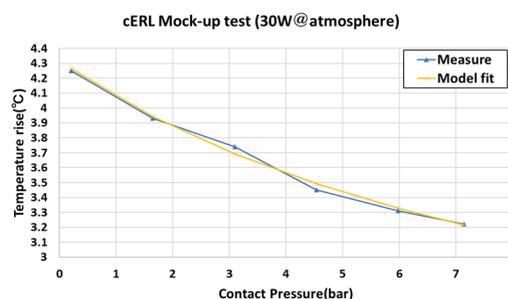


Figure 7: Pressure dependence of temp rise.

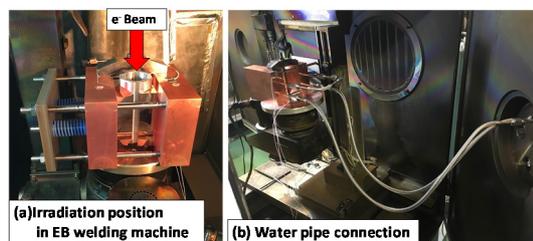


Figure 8: Mock-up test with EB welding machine. (a) Set position of mock-up in EB welding machine. (b) Water pipe connection.

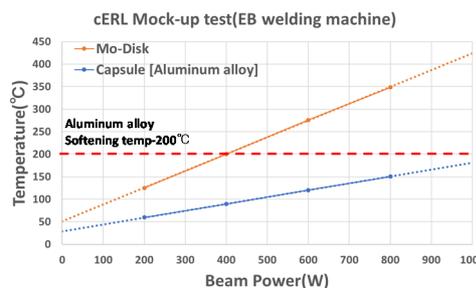


Figure 9: Power dependence of max temp.

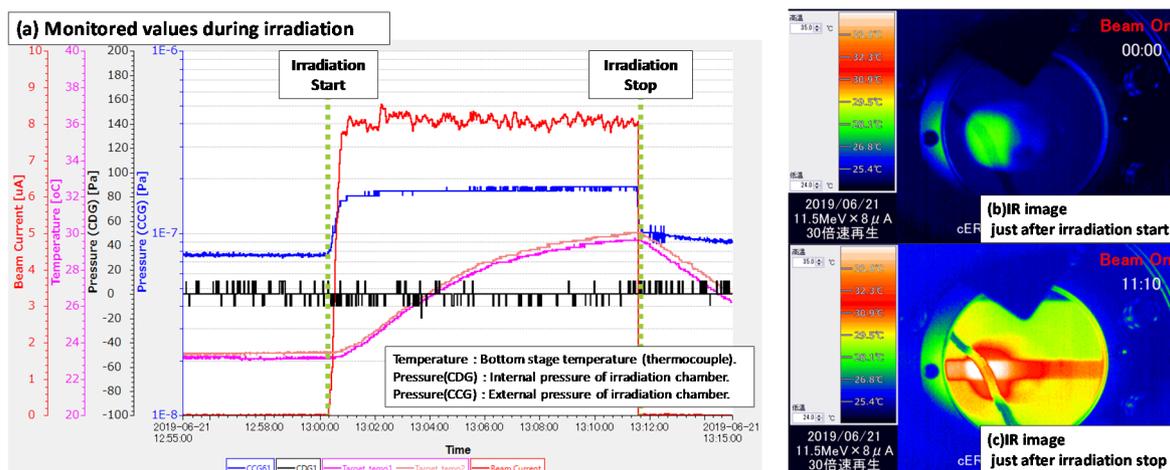


Figure 10: Monitored values during irradiation(11.5 MeV×8 μA×670 sec). (a) Monitored values during irradiation. (b) IR image just after irradiation start. (c) IR image just after irradiation stop.

3.3 電子ビームによる熱負荷試験

KEK 機械工学センターにて電子ビーム溶接機を熱源とした熱負荷試験を行った。Figure 8 に溶接機内に設置した模型の様子を示す。電子ビームは上部から、蓋の開いたカプセルに照射される。カプセルには RI 製造を模擬して 10 mm 厚のモリブデン試料を設置している。また電子ビーム溶接機内は真空環境であり、ガスによる接触熱伝導は期待できない。溶接機の電子ビームエネルギーは 120 keV であるため、モリブデン表面 0.1 mm 厚以下に発熱は集中する。Figure 9 に電子ビーム強度を変えた際の模型各部の温度変化を示す。1 kW 入熱での実測は熱電対不良のため実測できなかったが、800 W までのデータから外挿するに、1 kW の入熱でカプセルは軟化温度 200°C に到達するものと思われる。アルミ合金の軟化温度 200°C を上限とすれば 1 kW の入熱にまでカプセルは耐える。また、押付圧力を半分の 2 気圧に落とした状態で 400 W ビームを 2 時間照射する耐久性試験も行ったが、2 時間運転しても動作不良は起こらなかった。200 W のビームを受けるには十分な冷却性能と言える。cERL 照射部でのビームエネルギーは MeV 帯であるためビーム発熱は本模型試験よりも分散し、さらに表面から照射されることで熱伝導経路も縮小されるため昇温の程度は本模型試験よりも緩和される。

4. 照射部実機の運用

2019 年 4 月には放射線施設審査のための運転があり、無事運転の許可を得た。2019 年 6 月には遂に 99Mo 製造試験とアスファルト改質試験を行った。6 月には 16 日のビーム運転日があったが、その内 11 日は照射試験をしたが問題なく完了した。以下に運用時の要点を記す。

4.1 赤外カメラと熱電対による温度モニタリング

照射チャンバーには多数の真空ポートがあり、その内、ICF114 規格のポートを使用して可視光及び赤外光映像の取得ができる光学系を構築している。可視光と赤外光を取り出すために窓材料は ZnSe を採用している。また、被写体である冷却ステージやカプセルは被写体面に黒体塗料を塗布し放射率を 0.94 にしている。Figure 10-(b)、



Figure 11: Samples of RI production. (a)Disk sample. (b)Plate Sample.

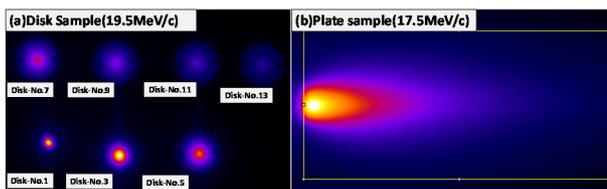


Figure 12: Examples of IP. (a)Disk sample. (b)Plate Sample.

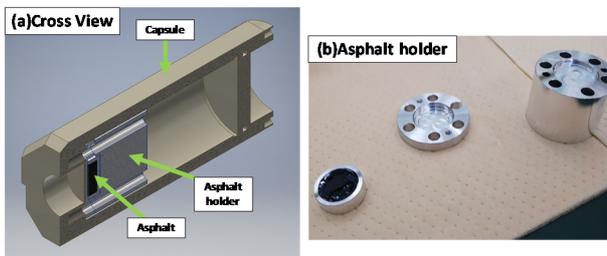


Figure 13: Preparation for asphalt experiment. (a)Cross view of asphalt capsule. (b)Asphalt holder.

(c)はビーム照射中に取得した赤外映像である。赤外カメラにより温度分布をフレームレート 30 Hz で観測可能である。ただし、光学系の不良で赤外カメラ自身が発する赤外光が反射して見えてしまっている部分があり、今後、

光学系の改良が必要である。また、下部冷却ステージには熱電対が取り付けられており、50°Cを閾値にインターロックに組み込まれている。赤外カメラで直接熱電対が設置された位置は観測できないが、熱電対近くの観測温度と熱電対の測定値を比べるとほぼ同程度の値であることが確認された。

4.2 RI(99Mo)製造試験

99Mo 製造試験では、99Mo 及びその他核種の生成収率の電子ビームエネルギー依存性評価や Imaging Plate(IP)による放射能分布評価を行った。これら試験に用いた 99Mo 製造標的を Figure 11 に示す。核種生成収率のエネルギー依存性評価ではディスク状試料をスタックさせて使用した。深度方向の生成収率を評価するとともに、各深度での放射能分布も IP により評価した。プレート状試料ではプレート長手方向からビームを照射することで、電磁シャワーに沿った放射能分布を 1 枚の試料で IP 評価する。Figure 12 はこれら IP 測定により得られた放射能分布の一例である。RI 製造試験中の電子ビームの最大強度は 11.5 MeV × 8 μA の 92 W であった。この時の温度変化は Figure 10-(a)のとおりであり、11 分程度のビーム照射では温度変化は飽和しなかった。その間の昇温は冷却ステージで最大 6.7°C(熱電対測定)、カプセルで最大 10.2°C(赤外カメラ観測)であった。

4.3 アスファルト改質試験

アスファルト改質試験では吸収線量 50 kGy を目標として 2 種類のアスファルトに電子ビームを照射した。今回はアスファルトの化学分析を目的とし、試料サイズは φ 16 mm × t5 mm とした。アスファルトは粘性流体であり時間とともに変形して(垂れて)しまうため、Figure 13 に示す治具を用いてカプセルにセットした。また、この治具は気抜きがついており、揮発ガスが生じるとカプセル内部に拡散させることができる。アスファルト試料に均一に照射するため φ 20 mm のビーム走査をした。アスファルトからは温度上昇、放射線照射などで揮発性ガスが生じるが、安全性を担保するため、今回はアスファルトの温度上昇を 10°C 以内に抑えるようにビーム照射条件を調整した。このため、ビーム電流は 0.2 μA として 556 秒照射した。カプセル開封時にはカプセル内圧が上昇した様子もなく、問題なく照射は完了した。

5. まとめ

カプセル方式の標的により 2 重封止試料による照射実験系を構築した。また実機運用まで実験は進んでおり、問題なく動作することが確認された。RI 製造においては、99Mo の電子ビームによる生成効率、放射能分布評価の実験まで完了している。アスファルト改質実験では 50 kGy の少量照射試験まで完了しており、現在は照射済み試料の化学分析が進められている。次回の運転は 2019 年 10 月に予定されており、RI 製造では 99Mo の分離抽出実験のために 10 MBq 程度の 99Mo を製造予定である。アスファルトについては試料サイズと吸収線量を大きくして、更なる化学分析と物性評価を行う予定である。その他、本照射部は他にも応用可能と考えており、更なる研究対象がないかも検討している。

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いる。また RI 製造に関しては株式会社千代田テクノル、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である。照射実験における RI 生成・解析・貯蔵に際して KEK 放射線科学センターにご助力いただいた。カプセルや冷却ステージ、熱試験用の模型の製作、模型熱試験における電子ビーム溶接機の運用に関して KEK 機械工学センターにご助力いただいた。ここに感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- [1] T. N. Cetinkale and M. Fishenden, "Thermal Conductance of Metal Surfaces in Contact", General Discussion on Heat Transfer, Conference of Institution of Mech. Eng. and ASME, September, 1951.
- [2] A. C. Rapier *et al.*, "The Thermal Conductance of Uranium Dioxide/Stainless Steel Interfaces", International Journal of Heat and Mass Transfer 6, p. 397, 1963.
- [3] Tachibana. F. "Study on Thermal Resistance of Contact Surface", trans. from Nihon- Kikai Gakukai Shi, 55 : 102-107, 1952, by Redstone Scientific Information Center, RSIC-29, June, 1963.
- [4] Alfredo Ferrari, Paola R. Sala, Albert Fasso, Johannes Ranfit, FLUKA: A multi-particle transport code, Version 2011-2x, CERN.