

J-PARC LINAC 3MeV ビームスクレーパーの開発

DEVELOPMENT OF A 3MEV BEAM SCRAPER FOR THE J-PARC LINAC

杉村高志^{#, A)}, 平野耕一郎^{B)}, 南茂今朝雄^{A)}, 栗原俊一^{A)}
 Takashi Sugimura^{#, A)}, Koichiro Hirano^{B)}, Kesao Nanmo^{A)}, Toshikazu Kurihara^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract

A beam power upgrade of the J-PARC accelerators has been an important task of J-PARC. As for the injector linac, beam energy upgrade to 400 MeV and beam current upgrade to 50 mA have been the main issues and scheduled for next a few years. By introducing a new ion source and a new RFQ linac, beam current will increase from 20 mA to 50 mA. According to an increase of the beam current, wasted beam that shouldn't be accelerated in the following accelerator sections also increase. To stop wasted beam, there is a beam scraper in the MEBT region just after the RFQ linac at the beam energy of 3 MeV. An existing beam scraper is made of carbon composite material and it has a dent caused by merely small beam current of 20 mA in daily operation. A new scraper that endures upgraded beam current of 50 mA is the essential item for the beam power upgrade of J-PARC. Thermal simulations on several materials have been performed with the ANSYS code assuming the upgraded beam power. They revealed that maximum temperatures in a beam cycle are much higher than their melting points in some materials and consequently that lessening of heat load for a scraper by beam operation is an essential factor. Reducing average thermal flux in the beam pulse below to $3.17 \times 10^8 \text{ W/m}^2$ by a beam-chopper cavity, maximum temperature of the scraper decreased to below the melting point of the scraper material.

1. はじめに

J-PARC では供用運転のビーム強度の増強に取り組んでおり、LINAC では 400 MeV、50 mA へのビーム増強の実施を計画している。なかでも、電流の増強については、イオン源、RFQ の換装の準備を進めており、まさにビームの最初の部分から増強することになる。

本報告のビームスクレーパーは RFQ と DTL との間に設置するもので、DTL 以降の加速器において加速すべきではないビームを RF チョップ空胴により蹴り出し、そこで止めるためのもの^[1]で、ビームをストップさせるのに十分な熱的性能を持たなくてはならない。現状では炭素複合材を用いたスクレーパーが設置されており、ビーム供用運転のために稼働中であるが、現在の 20 mA 程度のビーム電流ですら、すでに表面の損耗が観察されており、50 mA のビーム電流での運転に耐えられるスクレーパーの開発が必要である。このため、スクレーパー材料に関し、材料の検討を行うと共に、シミュレーションコード Ansys を用いた伝熱シミュレーションを実施している。今回は、このビームスクレーパーの熱伝導解析について、報告をする。

2. 現行スクレーパー

現在の J-PARC 入射 Linac で使用中のスクレーパーは炭素複合材料 (Carbone Composite 材, C/C 材 CX-2002、東洋炭素製^[2]) で、 $60 \times 40 \times 5 \text{ mm}^3$ のタイ

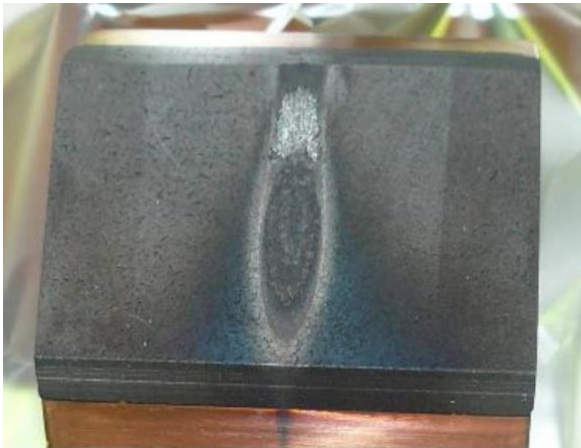
ル材を冷却水路を持った銅のブロックにロウ付け加工により貼り付けた構造をしており、C/C 材の表面はビームに対して 45 度の角度を持つように配置される。この C/C 材は非等方性熱伝導率を持つ (Figure 6 参照) が、ビームの当たる表面から銅ブロックの方向へ最大の熱伝導率を持つように接合して使用している。このスクレーパーは J-PARC のコミッション開始時から一度も交換せず使用しており、ビームエネルギー 3 MeV、ピーク電流 17 mA、繰り返し 25 Hz、パルス幅 500 μsec の全ビームのうち、通常の加速器運転では、~47%程度を負荷している。このときのビーム 1σ ($2.2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$) 内の単位面積当たりの熱負荷は、 10 MW/m^2 程度に達する。

2012 年夏の長期メンテナンス時に取り出して観測したところスクレーパー表面には窪みができていることが判明した。Figure 1 (a)にスクレーパーの表面状態の写真を示す。3D 顕微鏡を用いた測定では窪みの深さはおよそ 1 mm 程度に達しており (Figure 1 (b)参照)、ビームが当たっていない所の凹凸は 25 μm あったが、窪みでは、100~300 μm の凹凸があった。C/C 材は一般に高温下に耐える素材として知られているが、水素が隙間に入り込んで膨らむブリスタリング、熱疲労、及び、スパッタリングなどによる損傷が考えられる。また、真空でない条件 (たとえば酸素の雰囲気の下) で、高温 (450°C~) にすると化学反応により、滅失する。J-PARC においてスクレーパーは真空容器内に設置されているが、周辺にある機器の影響もあり、運転時の真空圧はおよそ 10^{-5} Pa 台であり、Q-Mass の電流が分子量 2

[#]takashi.sugimura@kek.jp

(H₂)、32 (O₂ 等) のチャンネルへも無視できない程度にある (エージング時の観測) ことからスクレーパーへの影響が予想される。また、温度に関して、スクレーパー全体は水冷により十分冷却を行っているが、J-PARC のビームはパルス幅 500 μsec, 繰り返し 25 Hz のパルス運転であり、パルス内のピークパワーは決して小さくはなく、スクレーパーの照射部分のピーク温度は、反応開始温度を超えていると推測される。これらの条件により、現行のスクレーパーに窪みができたと考えている。

(a)



(b)

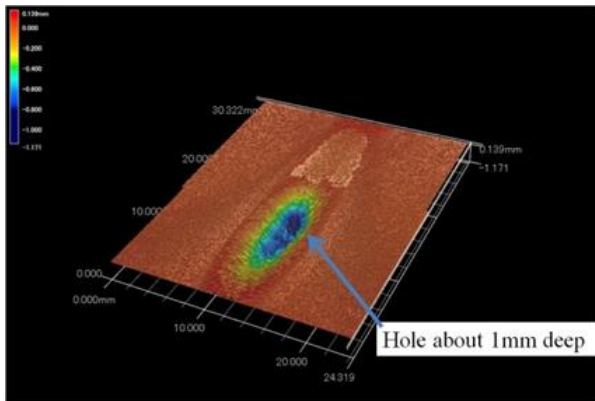


Figure 1: A Crater on the Existing Scraper (a) and its 3D Image (b) observed by KEYENCE, VR-3000.

2.1 シミュレーション

現行のスクレーパーの試作品として、C/C 材ではなくタングステンを使用したものが存在し、製作時には、このタングステンについて定常伝熱解析を行っていた。タングステンは、非常に融点の高い (3420 °C) 材料であり、スクレーパー材としては有力な候補である。最初の解析として、目標のビームパワーまで入力した時の伝熱解析を Ansys^[3] Version 13 を用いて、C/C 材とタングステンについて行った。Figure 2 にシミュレーションに使用した解析対象の形状を示す。ビームはスクレーパー材

の表面に 45° の角度で入射することを想定し、その大きさはφ10 mm とした。つまりスクレーパー材表面の長径 14.1 mm (= 10√2) × 短径 10 mm の楕円内に入熱があることになる。楕円内に入熱分布は均一とした。定常解析においては、平均ビームパワーが等しい DC ビームが当たったとしてシミュレーションを行った。また、冷却水と初期温度は 30 °C を仮定し、冷却水路壁面での熱伝達率は 5.8 kW/(m²・K) を仮定した。その他の条件は Table 1 にまとめた。熱輻射の効果については、スクレーパーを入れる真空容器の形状が計算に必要なこと、輻射の効果が顕著である高温になるのは非常に短時間かつ面積が狭いこと、熱輻射がない計算の方がより厳しい条件での評価となることから、今回のシミュレーションでは計算に入れていない。

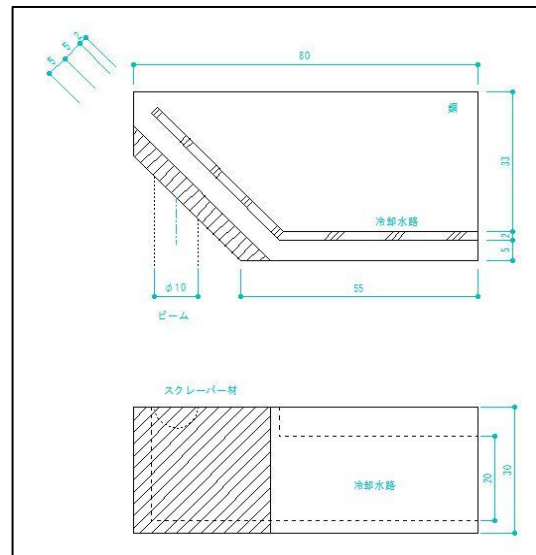


Figure 2: Dimensions of the scraper (1/2 cut) .

Table 1: Simulation Parameters I

ビームエネルギー	3 MeV
ピーク電流	15~50 mA
繰り返し	50 Hz
ビームパルス幅	600 μsec
ビームサイズ	φ 10mm
受光率	40~100%

ここで受光率とは、RFQ で加速されたビームの内、下流のリングからの要求により、加速をせずにスクレーパーによって止められるビームの割合を指す。

材料に融点の設定をしていないので、シミュレーションでは、融点を超えて温度が上昇する結果が出る場合があるが、当然のこととして融点に達したスクレーパーはやがて融解するために、スクレーパーとして利用することは出来ない。Figure 3,4 に定常伝

熱と過渡伝熱シミュレーションの結果を示す。定常伝熱とはビームによる負荷が DC 的にかかった場合の計算を示しており、過渡伝熱とはパルス的にビーム負荷がかかった場合の時間変化を追って計算した場合を示している。Figure 5 に最高温度点の温度の時間変化の例を示す。これはタングステンに 50 mA、受光率 40%のビームを負荷させた場合で、定常伝熱解の温度分布を初期値とし、1 msec 後からビームの照射が 600 μ sec 続いた後、次のパルスまで入熱がない状態をシミュレーションしている。グラフの中で、温度はビーム照射とともに上昇し、ビーム停止直後から冷却される様子を良くあらわしている。

最高温度に注目すると平均熱流束（ビーム負荷）の上昇に伴い最高点温度が上昇しており、ビーム電流 50 mA、受光率 100%ではタングステンが融解することがわかる。C/C 材においてもこの条件では真空中での使用可能温度である約 2000 $^{\circ}$ C（水素雰囲気ではメタンガス化が起こるため使用可能温度は下がり千数百 $^{\circ}$ Cと考えられる）をも超えている。

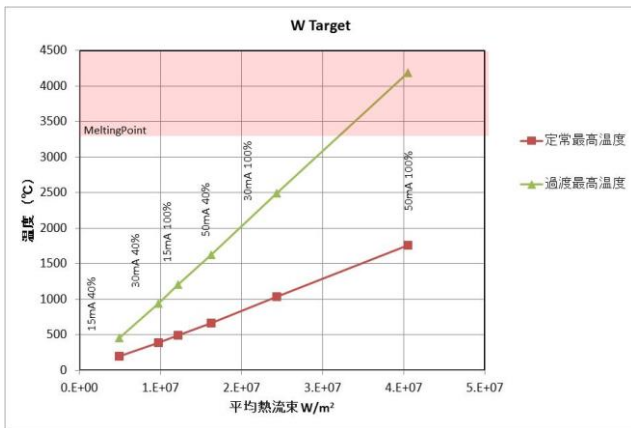


Figure 3: Simulation Result for W.

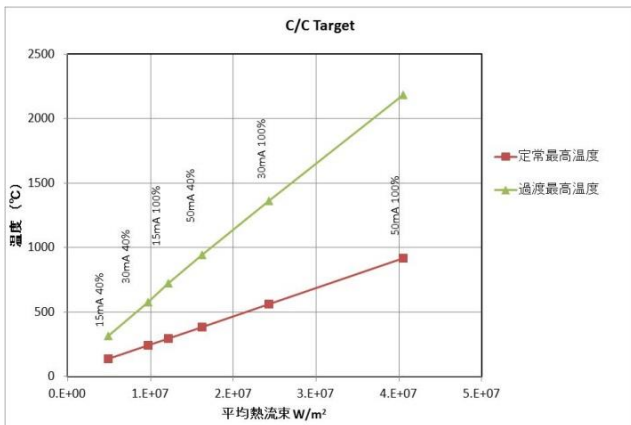


Figure 4: Simulation Result for C/C.

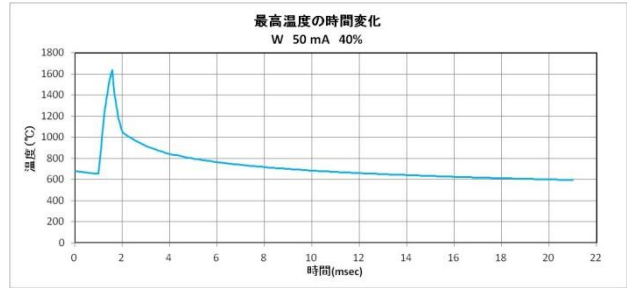


Figure 5: Sample of the Simulation Result in Time Domain.

3. 条件の見直し

先章でみたように現行スクレーパーをそのままにビームパワーを上げた場合、スクレーパー材そのものが耐えられないことが十分に予想出来る。スクレーパー表面から冷却水路までの熱抵抗値を下げる、つまりスクレーパー材、およびボディーとなる銅を薄くするなどの対策を用いてスクレーパーの最高温度を下げる手法も考えられるが、スクレーパーの厚みを薄くすることは、想定より大きなスクレーパー材の損傷等が発生した場合の余裕を削ることになり、安全面への配慮からこの手法は考慮から除外した。替わって採用した対策は、スクレーパーを 2 個設置し、ビームをこの 2 個に振り分けることで、スクレーパーへの負荷を 1/2 に減らすことを主な対策とした。また、C/C 材や、タングステン以外の材料を検討することとした。新たに候補として加えたスクレーパー材は、TZM、ダイヤモンド、タングステンと TiC の合金 (W-1.1%TiC) である。

TZM は高温材として知られた素材であるモリブデンを主な成分とし、Ti や Zr, C を加えた合金であり、高温炉の部品として使用されている実績がある。

ダイヤモンドは言うまでもなく宝石として知られた炭素の結晶である。巨大な素材は入手性、価格の点で非常に問題があるが、C/C 材よりも高い融点と、金属などと比べても非常に高い熱伝導率 (1000~2000 W/(m \cdot K)) を持つことが特徴である。ただし全最外殻電子が共有結合に使われるため、電気伝導性がないことは、スクレーパーとして使用する際には注意を要する。また、ブリスタリングに対する強度が不明なことも同様である。

W-1.1%TiC はタングステンのもつ脆性を大幅に少なくした特性を持つ材料であり、核融合炉でダイバータなどへの応用をめざし開発された合金である [4]。タングstenは、冷えるときに粒界に沿って亀裂が発生するが、W-1.1%TiC は、粒界すべりが起こるため、亀裂が発生し難い特徴があり、これはスクレーパー材として有望な特徴である。

材料の製作、加工法についてはこれからの検討を必要とするものもあるが、ここでは、最高温度に注目してシミュレーションを行った。シミュレーションに際して、使用したパラメータを Table 2 に示す。

また、シミュレーションの精度を上げるため Figure 6^[2,5,6,7]に示した材質の熱伝導率の温度依存性を導入した。ここには物性値に関して温度特性が不明であったものは一定値とした。また融点に関しては先章と同じく設定していないので、実際の融点を超えたとしても固体のままであるとして結果は出力される。

Table 2: Simulation Parameters II

ビームエネルギー	3 MeV
ピーク電流	50 mA
繰り返し	25 Hz
ビームパルス幅	500 μ sec
ビームサイズ	ϕ 10 mm
受光率	~47% (現在のチョップ設定値の最大値)

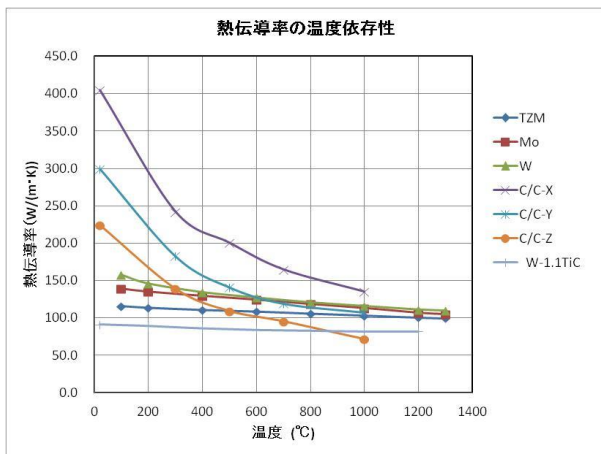


Figure 6: Temperature Dependence of Thermal Conductivity for the Simulations.

4. Simulation Result II

Figure 7 にシミュレーションの結果をまとめる。ビームの振り分け方法として、500 μ sec のマクロパルス内でビームを 2 個のスクレーパーに振り分ける方法と、25 Hz でやって来るマクロパルスごとに二つのスクレーパーに交互に振り分ける方法を考えており、過渡最高温度 A は前者に相当し、パルス内平均熱流束 3.17×10^8 W/m² として計算した。過渡最高温度 B は後者で、パルス内平均熱流束 6.35×10^8 W/m² として計算した。ともに全平均熱流束は同じであるが、過渡最高温度 B での 1 マクロパルス内の平均熱流束が 2 倍となるため、温度上昇もそれに相当する分高くなっていることがわかる。

したがって、スクレーパーの最高温度を低くする観点からはマクロパルス内でのビーム振り分けは必須といえる。

いずれの場合も融点を超える結果には至っていない。材料ごとに見ていくと、熱伝導率が、他の材質に比べて圧倒的に高いダイヤモンドの最高温度が最も低く抑えられており、C/C 材がそれに続く。ダイヤモンドの最高温度は 200°C 程度となり、実現した場合は扱いが容易なものとなるであろう。C/C 材では 450°C の酸素との反応温度付近となっており注意を要する。タングステンと、W-1.1%TiC では、熱伝導率の高いタングステンの方がより低い最高温度を示している。タングステンは加工条件や、表面状態、不純物により延性-脆性遷移温度が大きく変わり、また、再結晶により脆化することも知られている^[8]。タングステン系の材料を選定する場合には融点以外にも、これらの温度を考慮する必要がある。W-1.1%TiC は最高温度が最も高い結果になったが、この温度域で高靱性を保てる可能性があるため、有望である。TZM に関してはタングステンより若干高い温度を示しているが、推奨使用温度とされる 1000-1400°C に比べ十分に低いといえる。しかし、メンテナンス上、放射化の問題がある。

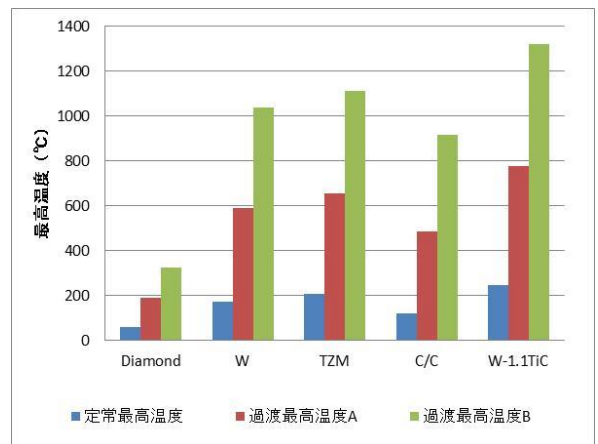


Figure 7: Simulation Result II.

5. 実機開発に向けてまとめ

これまでの熱伝導シミュレーションの結果から言えることは、現状のスクレーパーで、ビームパワーを目標値まで上げた場合にはもたないことが予想され、ビームチョッパーによるビームの振り分けなどで、2 枚のスクレーパーに負荷を分散させることと、受光率を 47% 程度に制限することで、スクレーパー材の融点以下にすることは可能である。その場合にもビームの振り分けに関して、マクロパルスごとに振り分けるのではなく、マクロパルス内でビームを振り分ける方が、数百°C 以上最高温度の低下（ダイヤモンドはもともと低いので除く）が見込める。

ただし、ここでのシミュレーションでは、残留ガスとの化学反応、再結晶や不純物の固溶等による脆性の増大、H ビームを打ち込むことからくるブリストリング現象などについて、温度以外の情報は提供

できない。それらについては、今後の検討、実証が必要である。

謝辞

W-1.1%TiC 材料に関する助言及び議論をして頂いた東北大学金属材料研究所、栗下先生、小無先生に感謝致します。

参考文献

- [1] K. Hirano et al., “J-PARC リニアックチョップシステムの開発”, SUP016, in these proceedings
- [2] http://www.toyotanso.co.jp/Products/Pdf/CCcomposite_j.pdf
- [3] <http://ansys.jp/products/multiphysics/multiphysics/index.html>
- [4] H. Kurishita, et al., “Development of nanostructured tungsten based materials resistant to recrystallization and/or radiation induced embrittlement”, Material transaction, Vol 54, No.4 (2013) pp.456-465.
- [5] [http://www.vacs-precision.com/pdf_dl/Molybdenum\(Ja\).pdf](http://www.vacs-precision.com/pdf_dl/Molybdenum(Ja).pdf)
- [6] http://www.vacs-precision.com/pdf_dl/Tungsten_DE.pdf
- [7] G. Pintsuk et al., PFMC-13, 2011
- [8] <http://www.nittan.co.jp/products/tungstenenseizeiseihakai.html>