

J-PARC リニアックにおける大きい入射角を持つ 新型スクレーパーの伝熱解析

THE HEAT TRANSFER ANALYSIS FOR A NEW LARGE ENTRY ANGLED SCRAPER FOR J-PARC LINAC

杉村高志^{A)}, 平野耕一郎^{B)}

Takashi Sugimura^{A)}, Koichiro Hirano^{B)}

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

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

Abstract

The beam power of 1MW is a design specification of J-PARC. Therefore the beam current upgrade to 50 mA in the injector linac is indispensable. The scrapers installed in the linac have been took waste beam out of RFQ since last summer. They consist of Carbone composite surface plates and Copper block with cooling-water channel. The deterioration of thermal conducting has been observed during daily operation. Thus, a newly designed scraper with a large entry angle of 67 degree is introduced as countermeasures. This paper reports the results of numeric simulations of the new scrapers and their installation schedule.

1. はじめに

J-PARC では、目標性能の一つである 1 MW のビームパワーを達成するべく準備を進めてきた。2013 年の夏季シャットダウンではリニアックから RCS (Rapid-Cycling Synchrotron) への入射エネルギーを 181 MeV から 400 MeV に増強するために ACS (Annular-ring Coupled Structure) 空洞、25 ユニットのインストールを行い^[1]、400 MeV での定常運転を続けている。続く 2014 年夏にはビーム電流を 17 mA (typ.) から 50 mA (目標値) に増強するためにイオン源、RFQ リニアック及びチョッパーシステムの変更を行った。現在は目標値 50 mA での定常運転を達成すべく徐々にビーム電流を上げているところである^[2]。

チョッパーシステムは主に 2 連のチョッパー空洞と、これらの空洞により蹴り出されたビームを受け止める左右 2 個のスクレーパーとから構成される^[3]。

スクレーパーは炭素複合材 (Carbone Composite material, C/C 材 CX-2002、東洋炭素製^[5]) でビームを受け、背後にロウ付けした水冷された銅のブロックを通じて排熱を行うものである。この構成は J-PARC の運転開始当初から同じであるが、50 mA のビーム電流に対してはピーク温度が高くなりすぎるのがシミュレーションにより予想された^[6]ので、チョッパー空洞に印加する RF の位相を高速反転させることによりビームを左右に振り分け、スクレーパー 2 個で受け止めることで、1 個当たりの負荷を半分にする事とした。

このようなスクレーパーをインストールして昨年から 30 mA での定常運転で主に使用してきたが、時間の経過に従って、ピーク温度の上昇が観測され、50 mA での運転に対しては更なる対策が必須であることが明らかとなった。Figure 1 に 2014 年 12 月末に

取り出したスクレーパーの表面写真を示す。この写真からも照射部の表面が盛り上がり、状態が変化していることが分かる。

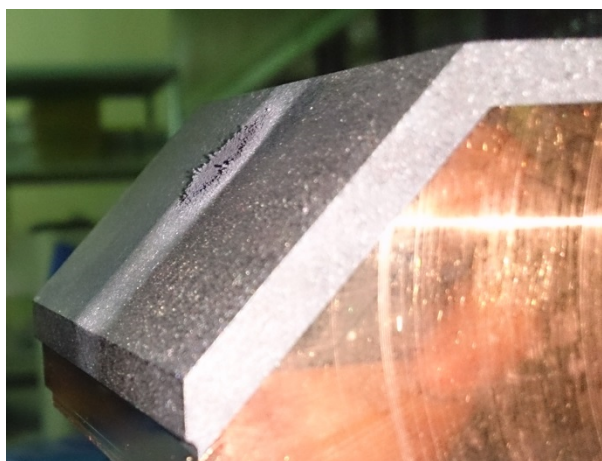


Figure 1: A surface of a current C/C scraper. An irradiated part of C/C poking up through its surface.

2. 新旧スクレーパー

時間経過によるピーク温度の上昇の原因についてはまだ断定できる段階にないが、入射ビームの H⁻イオンと結合して炭化水素となる化学反応や、蒸発による、C/C 材の構造の変化が一因であると疑っている。現在とりうる対策としてはピーク温度を低下させることがあり、そのためにはビームの照射面積を増やす方法がある。現行のスクレーパーではビームは C/C 材の表面法線に対して 45° の角度で入射している。この入射角を 67° と大きくとることで、同じビームに対して、照射面積を 1.8 倍にすることが出来る。また、C/C 材の厚みを現在の 5 mm から厚

くすることで、C/C 材の中で出来るだけ速く熱を拡散させることが出来るのではないかと考え、おおむね Figure 2 で示すような形状のスクレーパーを製作することを考えシミュレーションを行った。

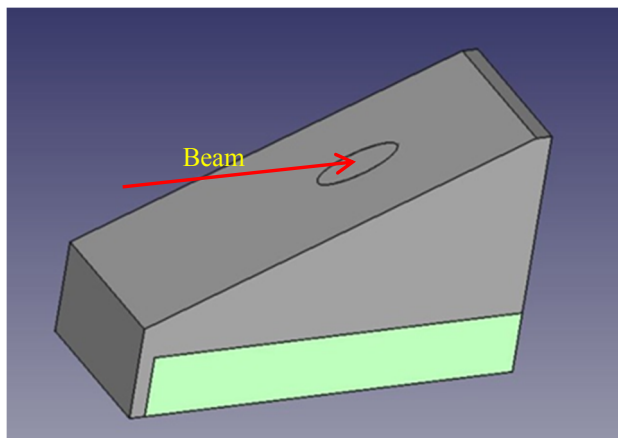


Figure 2: A 3D concept model of a new large entry angled scraper for simulation. C/C material is shown in gray and copper base is in light green.

3. シミュレーション

3.1 シミュレーション条件

シミュレーションは ANSYS R15.0 を用いて行った。以前のシミュレーション⁶⁾と条件をそろえるため、今回も直径 10 mm の均一ビームが入射すると仮定している。ビームはパルス幅 500 μsec 、繰り返し 25 Hz であるので、これらの平均ビームパワーによる定常状態をまず計算し、その温度を初期条件として 1 パルス分の時間変化をシミュレーションで求めた。Table 1 にこれらの条件をまとめた。また C/C 材の熱伝導率は異方性及び温度依存性を持つので、シミュレーションにはカタログ値を使用した。C/C 材の融点、昇華点に関してはシミュレーション上で設定していないので、計算結果がこれらを超える場合はその結果を除いて考慮する必要がある。

Table 1: Beam Condition for the Simulations

Current	30~50 mA
Pulse Width	500 μsec
Repetition	25 Hz
Thinning ratio	100%
Beam Distribution	Cylindrical / Uniform
Beam Diameter	10 mm
Energy	3 MeV

3.2 C/C 材の厚さとビーム入射角による比較

今回シミュレーションで行ったのは、入射角を従来型の 45° および 67° とした場合、C/C 材の厚みを 5 mm から 10mm、15mm と変えた場合の比較である。計算時間の短縮のため、モデルとしては 50 mm x 50 mm の C/C 材に同形の厚さ 5mm の銅板を張り付けた単純な直方体を使用し、銅板の背面全面が水冷により冷却されているとし、水冷面での熱伝達係数が 5800 $\text{w}/(\text{m}^2 \cdot \text{C}^\circ)$ であると仮定した。Figure 3 には厚さ 15 mm 入射角 45° の時の解を出力例として掲載する。ここでは、平均ビームパワーで DC 的にビームが入力された場合の定常解を初期温度分布として、そこから 1 パルス分つまり 40 msec 分の時間変化をシミュレーションしたときの最高温度付近を示したものである。条件ごとの最高温度をプロットしたものが、Figure 4 である。入射角を従来型の 45° に対し 67° に変更した場合には大幅に最高点温度が低減出来ていることが分かる。また、厚みに何して言えば、C/C 材を厚くした方が最高温度の低下する傾向が多いことが分かる。50 mA、45°、5 mm 厚と 50 mA、67°、15 mm 厚の比較では最高温度は 1500° 程度低下していることが分かる (50 mA、45°、5 mm 厚の場合の最高温度 3000° で C/C 材が機能を保持したとして)。

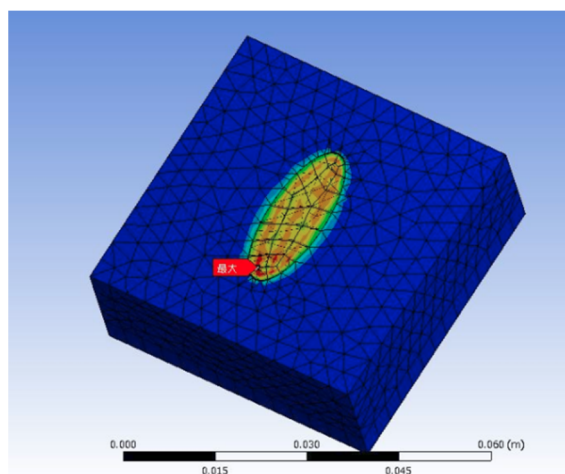


Figure 3: A sample output of ANSYS for C/C plate thickness of 15mm and beam entry angle of 45degree.

4. 新スクレーパー

4.1 設計方針

前章で得られた知見をもとに新スクレーパーの設計方針は以下ようになった。

スクレーパーの寿命という観点に立てば、C/C 材の厚みが大いほうが、ビームによる C/C 材の損傷で決定される寿命を延ばすことが期待できるため、メンテナンスに取っては都合が良い。

C/C 材の最高温度に関して言えば、入射角を 67° とした場合、従来 45° の場合に比べて圧倒的に最高温度を低減できるので、これを採用する。C/C 材

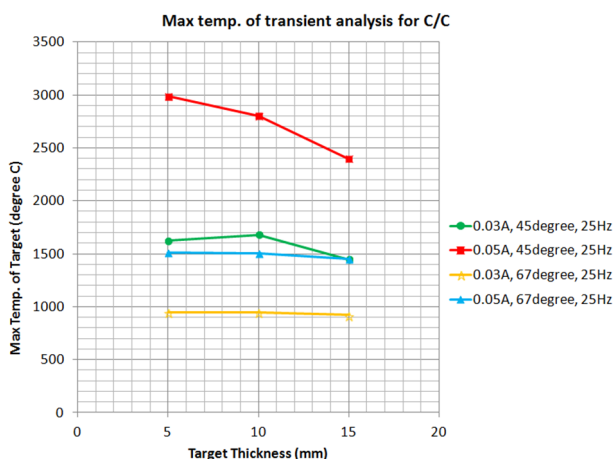


Figure 4: A plots of Peak temperatures of C/C with the thickness of 5, 10, 15 mm and beam entry angle of 45 and 67degree.

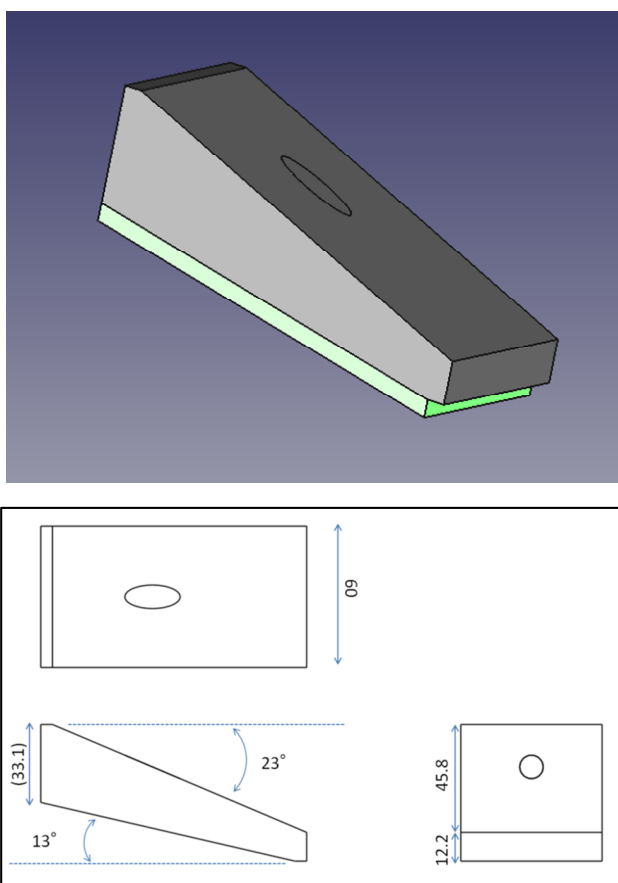


Figure 5: Upper: An input 3D model for ANSYS with anisometric thickness of C/C plate and beam entry angle of 67 degree. Lower: Orthographic drawing of a C/C plate.

は異方性があり、素材の寸法に由来する材料の切り出しに関する制限が存在するため、加工メーカーによる検討の結果、実際に制作するスクレーパーの

形状は Figure 5 に示す形状になった。Figure 5 のタイプでは、C/C 材の最厚部の寸法は約 30.5 mm と薄くなっている。

4.2 確認シミュレーション

Figure 5 で示された形状を C/C 材から取り出す場合の異方性による最高温度の違いをシミュレーションにより確認した。C/C 材の最大熱伝導率を持つ方向の取り方としては、C/C 材の表面法線に取る方法と、銅とのロウ付け面の法線方向に取る方法が考えられる。また、上記条件のもとでは、C/C 材の最小熱伝導率を持つ方向の取り方としては、C/C 材の長手方向に取る場合と短手方向に取る場合の二通りが考えられる。したがってこれら組み合わせ 4 通りについてシミュレーションを行った。条件はビーム電流 30~50mA、繰り返し 25Hz で、チョップ率を 100% とした。結果をプロットしたものが、Figure 6 である。4 条件でのプロットはほぼ同一の直線上に乗っており、ここでシミュレーションを行ったいずれの組み合わせを用いても結果に大きな差が無いことが分かる。よって、実機では製作の都合によりこれらの組み合わせから選ぶこととし、結果として表面法線に熱伝導率最大方向、長手方向に最小熱伝導率を持つ方向をとることとした。

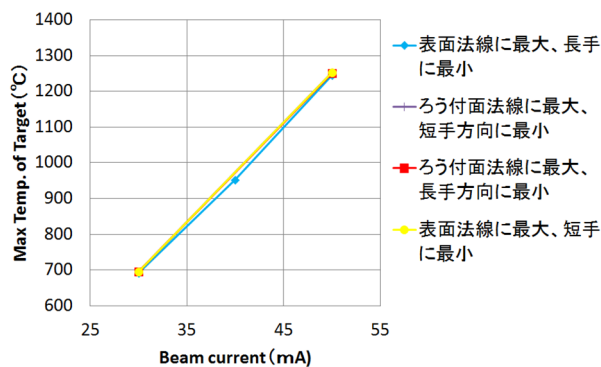


Figure 6: The maximum temperature for various orientations of C/C.

4.3 実機製作及びインストール予定

以上の検討に基づいた新スクレーパーは現在製作中であり、これらのスクレーパーの入る真空容器も新規製作を行った。J-PARCは7月から夏季の長期メンテナンスに入っており、この期間内にインストール作業を終え、秋からの 40 mA 運転、及び、冬からの 50 mA 運転に備える予定である。

5. まとめ

J-PARC が目指す 1MW ビームの達成に不可欠なりニアックのビーム電流の 50mA への増強において、ビームエネルギー 3MeV 地点に設置されるスクレーパーの長寿命化は必須である。今回はビーム入射角を 67° と大きくし、ビームの電力密度を下げるこ

および、C/C 材の厚みを増すことの2つのアプローチを用い最高温度の大幅な低減を図り、長寿命化を狙った。現在はインストール作業中であり、秋以降の大電流運転には新型スクレーパーが使用される予定である。

謝辞

C/C 材と銅材とのロウ付け接合に関して金属技研茨城工場技術課の木村惇郎氏と石崎博之氏に多大なご協力を頂きました。感謝いたします。

参考文献

- [1] H. Ao and T. Sugano, “Development of the Annular-ring Coupled Structure for J-PARC”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 160(2014).
- [2] T. Maruta et al., “Recent progress of the beam commissioning of the J-PARC linac”, WEP014, in these proceedings.
- [3] K. Hirano et al., “Development of RF Chopper System at J-PARC Linac”, Procs. of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 858(2013).
- [4] K. Hirano et al., “Development of RF chopper system at J-PARC Linac (2)”, THP012, in these proceedings.
- [5] <http://www.toyotanso.co.jp/Products/cccomposite/data.html>
- [6] T. Sugimura et al., “Development of a 3MeV beam scraper for the J-PARC Linac”, Procs. of 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 861(2013).