J-PARC Main Ring の入射ビームのための OTR と蛍光を用いたワイドダイナミックレンジプロファイルモニターの開発 (2)

DEVELOPMENT OF A WIDE DYNAMIC-RANGE BEAM PROFILE MONITOR USING OTR AND FLUORESCENCE FOR INJECTED BEAMS IN J-PARC MAIN RING (2)

橋本義徳#, A), 佐藤洋一 A), 外山 毅 A), 三橋利行 A), 中村 剛 A), 酒井浩志 B), 手島昌己 A), 魚田雅彦 A)
Yoshinori Hashimoto#, A), Yoichi Sato A), Takeshi Toyama A), Toshiyuki Mitsuhashi A), Takeshi Nakamura A), Hiroshi Sakai B), Masaki Tejima A), Masahiko Uota A)
A) KEK/J-PARC
B) Mitsubishi Electric System & Service Co., Ltd, Accel.

Abstract

A two-dimensional beam profile monitor with a wide dynamic range of about 6 digits using an OTR and fluorescent screen has been operated in the injection beam transport (3-50BT) to the J-PARC Main Ring (MR). Furthermore, similar the second device has been developed for MR to diagnose injected beams with the first device in combination. To diagnose the beam core and halo at the time of injection of high-intensity proton beams in different phases brings insights of injection beam. In particularly, measuring the beam cut effect with beam collimators and obtaining the information are effective for localizing the beam loss area by forming a high-intensity beam. For MR, 2D beam profile measurement including a beam halo of about 20 turns of the orbiting beam after incident is also required by beam dynamics. Characteristic tests for the second device have been conducted in a test bench. In the structure of the device, the longitudinal coupling impedance with a Z/n value close to several Ω becomes problem, especially due to high-frequency resonance in its in-vacuum optical system and the target section. To overcome the problem, we have been studying the absorption of high-frequency beam-wake fields using silicon carbide (SiC) up to about 1 GHz. This report describes the current situation with simulations for wake fields damping with SiC mainly.

1. はじめに

J-PARC メインリング (MR) の入射ビーム輸送ライン（3-50BT）で、OTR および蛍光スクリーンを用いた 6 桁程度の広いダイナミックレンジを持つ 2 次元ビームプロファイルモニターが運用されている[1, 2]。ビームの大強度化は、いかにビームロスを低減できるかがその鍵を握っており、本装置でのビームハローの診断は、アドバンテージとなっている。

この 1 号機の運用を受けて、リング内に 2 号機を入れることが計画されている[3, 4]。2 号機では、入射から 10~20 ターン程度のビームコアと周回を重ねたハローの診断を可能とする。入射されたビームと周回初期のビームのハロー形成を 2 次元的に把握し、XY 方向の相関を反映した大強度ビーム調整が期待できる。また、1 号機との同期した測定を行うことにより、3-50BT と MR のコリメータバランスの調整と 2 次元 XY カップリング成分も含めた入射ビームの横方向位相空間分布診断を可能とする。さらに大強度陽子ビームは周回を重ねることでベータトロン共鳴条件に抵触した粒子がハローを形成するが、2 号機のビームハロー部だけを周回ビームの測定に用いることで 2 次元分布の時間発展からビームロスの起因となる抵触共鳴条件の同定も期待できる。このような目的のもと 2 号機の開発が継続して行われており、測定装置としての基本コンセプトは 1 号機をベースにいくつかの改良を取り入れて、ほぼ完成しつつある。改良した主な点は、次の 5 点である[3]。1) 遅い取り出しのビームが通過する場所に設置するため、取り出しビームの軌道に制約を与えないようにミラーのビームホールの直径を 120 mm から 160 mm に大きくした。2) 装置が大きいので、ミラー用とターゲット用の真空チェンバーを分離した。3) 大きいビームホールによる光のロスを補うために凹面ミラーの直径を 300 mm から 350 mm に大きくした。4) 従来のパイレックスガラスに純アルミ蒸着であり耐放射線性の不安があるため、ミラーを純アルミの機械加工で製作した。5) 光の収率を向上させるために、OTR を散乱光に変換するスクリーンと2次光学系を大気中に置き、検出器をスクリーン直下に設置できるようにした。その後、主光学系の調整を行い、光学特性を試験したので今回報告する。

現在の検討の課題は、ビームのカップリングインピーダンスをいかに低減するかにある。本装置の光学装置やターゲット装置は、その機械的構造により有意なインピーダンスを持つことになる。ワンパスビームの測定に用いる 1 号機との大きな違いは、MR の大強度陽子の周回ビームが通過することにある。開発の当初は、MR の基本加速周波数 1.67-1.71 MHz (3-30 GeV に対応)に対して、実際のビームでは 100 MHz 程度までの高周波成分が観測されていたことから、100 MHz までの周波数領域で、インピーダンス（Z/n）をほぼゼロになるようにした。しかし、最近では遅い取出しのデバンチ時などでは数 100 MHz 領域での Microwave Instability が発生している。このため 1 GHz あたりまでの領域のインピーダンスを、できるだけゼロにする要求が課せられた。100 MHz～1 GHzの領域では、Z/n は数Ωであり、装置の構造の工夫だけで低

yoshinori.hashimoto@kek.jp

減することは至難であった。これを克服するために、SiC を用いたウェイクフィールドの吸収を検討しており、本報告ではそれらのシミュレーションを中心として議論する。

2. 装置概要と主光学系の特性

2.1 装置の概要

装置は Fig. 1(A) に示すように、上流からミラーチェンバーとターゲットチェンバーで構成され、ミラーチェンバーには、主光学系が、ターゲットチェンバーには、可動式のターゲットが真空内に置かれる[3]。

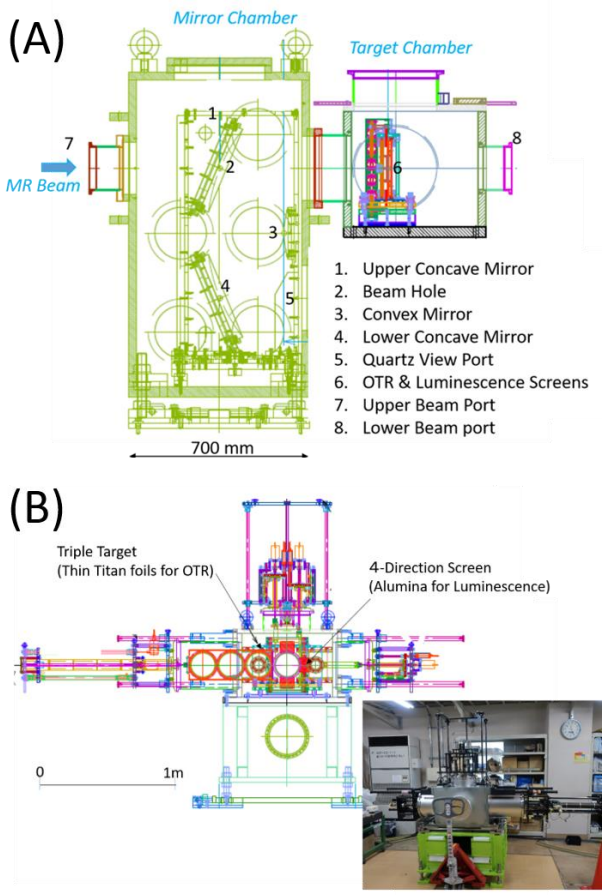

Figure 1: Cross-sectional views of the Equipment, (A) side, (B) front.

2.2 主光学系の特性

主光学系は、1 号機同様 OFFNER 光学系(Fig. 2) [5], で構成した。OFFNER 光学系は、2 枚の凹面鏡（直径 350 mm、上側の鏡にはビームホールが開けてある）と 1 枚の凸面鏡（直径 200 mm）で構成されており、ターゲットのほぼ直下に位置するディフューザースクリーンに、OTR と蛍光のイメージを結像させるリレー光学系の役割を持つ。OTR は、指向性を持つ光であるが、ディフューザースクリーンで散乱光に変換される。蛍光は散乱光であり同じ光路で結像する。この OFFNER 光学系は、角度広がりを持つ OTR （3 GeV 陽子では 27° ）を受けるために 350 mm の大口径の主鏡を持ち、このため F 値は

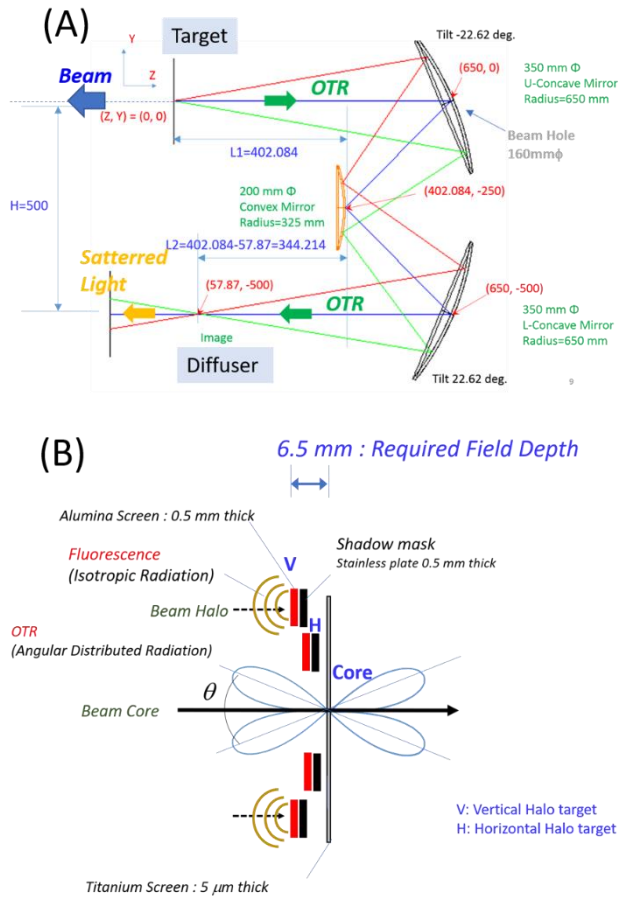

Figure 2: An Offner relay optics (A), and cross-sectional view of the targets (B).

0.7 程度で大変明るい。これは微弱なビームハローの蛍光を捕まえることにも有利であるが、被写界深度が浅いという問題をもつ。ミラー配置のファインな調整の結果、被写界深度±3.5 mm を得た。Figure 2 のターゲットの構成図にあるように、ハローターゲットは、0.5 mm 厚みのアルミナスクリーンに 0.5 mm の背面には SUS のバックプレートで後方への光を遮光した構成であり、垂直用のペア、水平洋のペアの順に置かれ、その背後に OTR 用のチタンフォイルが位置する。これらの可動式のターゲットの光軸方向の厚みは 6.5 mm であり(Fig.2 B)、ちょうど光学系の被写界深度に収まる。

3. カップリングインピーダンス

２号機は MR で使用するため、大強度の周回陽子ビームとのカップリングインピーダンスは低い値である必要がある。ミラーチェンバーとターゲットチェンバーそれぞれで、ワイヤーを用いたインピーダンス測定[6, 7]を行った (Fig. 3)。インピーダンスの値は、不安定性の評価に使われる Z/n (: $n = f / f_{rev}$)[Ω]を用いる。f_{rev} は周回周波数。300k - 1 GHz の領域で、ミラーチェンバーには、150 MHz 近傍に 3.7 Ω、350 MHz 近傍に 2.6 Ω のピークがあり、それより高い周波数では、概ね 1.5 Ω 程度以下であるが多数のピークがあった。ターゲットチェンバーでは、ピークのほとんどは、0.5 Ω 程度以下に収まっていた。

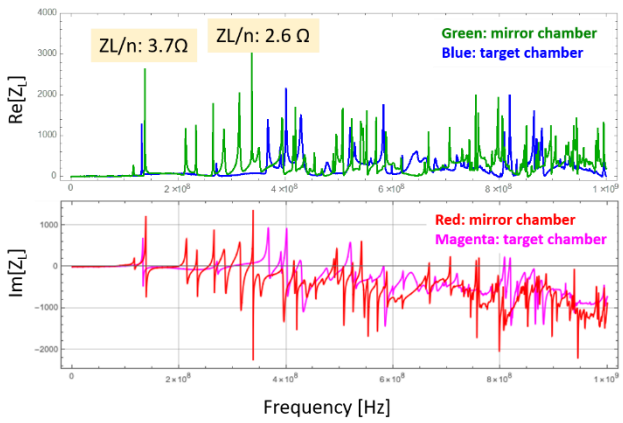

Figure 3: Results of coupling impedance measurement with initial equipment.

遅い取出しビームは、現在 65kW 程度の大強度となり、30 GeV でのデバンチ時には、調整の条件によってはマイクロウェーブ不安定性が発生している。この不安定性の発現の目安としてよく使われる Keil-shnell criterion [8] によれば、MR の閾値は数Ω程度と見積もられる。検討を行い、今後のビームの大強度化も想定して、装置のインピーダンスは 0.5 Ω程度以下に、できるだけ小さくすることになった。そのため、ミラーチェンバーでは、これらのインピーダンスを抑制する対策が必要と判断した。ターゲットチェンバーは対策の必要なしと判断した。

4. インピーダンスの低減

4.1 構造の検討

ミラーチェンバーでは、内部にミラーユニットが下部のステージに取り付けられているが (Fig. 1)、ユニット上部はチェンバーと接続されていない。このためユニットが共振導体となったλ/4 の構造での 150 MHz 近傍での共振が発生していた。ユニット上部をチェンバー内面とプレートで固定するなどの基本的な対策を施し、さらに種々の共振を低減するための検討を CST Studio suite [9]の wake solver によシミュレーションにより行った。しかし、Z/n を十分に小さくすることは難しく、特に共振が速やかに減衰しないことが問題であった。例えば、内部のミラーユニットの周囲をアルミ板でカバーすることでシールド特性を上げたシミュレーションの例を Fig. 4 に示す。390 MHz に6.78 Ωの高い共振のピークがある。それ以下の周波数ではインピーダンスはほぼゼロにすることができるが、高い周波数側では、依然として共振が残る (Fig. 4 (B))。Fig. 4 (C) は、次のバンチ時刻までのウェイクポテンシャルであり、十分に減衰しないため次のバンチは 1/4 程度残存するウェイクの影響も受けることになる。

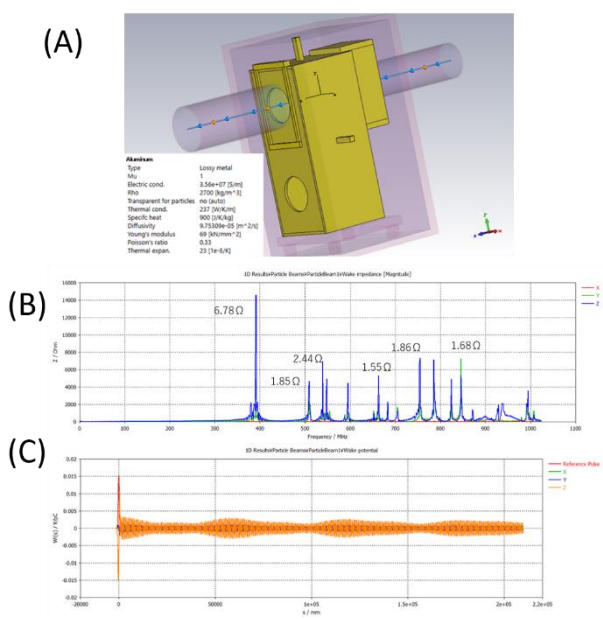

Figure 4: Simulation with a shielded Mirror Unit: (A) Structure, (B) Impedance, (C) Wake potential.

4.2 SiC による電場吸収

構造の工夫だけでは、インピーダンスを 0.5 Ω以下に低減することは難しく、また次のバンチ時刻までにウェイクポテンシャルを十分に小さくすることも難しいと判断した。このため、積極的にウェイクを低減する方法として、誘電体を用いて電場を吸収する方法を検討することにした。誘電体には、KEKB、KEKB DR などの加速空洞で高次モードを減衰させる目的での使用に実績のある炭化珪素 SiC [10-13]を候補にした。SiC はクアーズテック社の CERASIC B [14] である (Fig. 5)。特に 200MHz 以上の周波数領域に適している。誘電体による高周波電場の吸収パワーPは、Eq. (1)で与えられる。ここで K を比例定数として、ε' は比誘電率、$tan\delta$ は誘電損失角、f は周波数、E は電界強度である。

$$P = K \cdot \varepsilon' \cdot tan\delta \cdot f \cdot E^2 \qquad (1)$$

4.3 SiC を入れたシミュレーション

SiC での電場吸収は、垂直に入射する電界強度の高い場所へ取り付けることが効果的である(Eq. (1))。しかし、吸収による発熱を除去するためには、真空容器内よりは大気に面する位置に取り付ける方が容易である。このため、ミラーチェンバー側面と上面にあるポートフランジの内面の真空側に SiC を取り付けることにした。発熱量が高い場合には、そのフランジの大気側の面に冷却水パイプを取り付けるなどの対策を取ることができるからである。

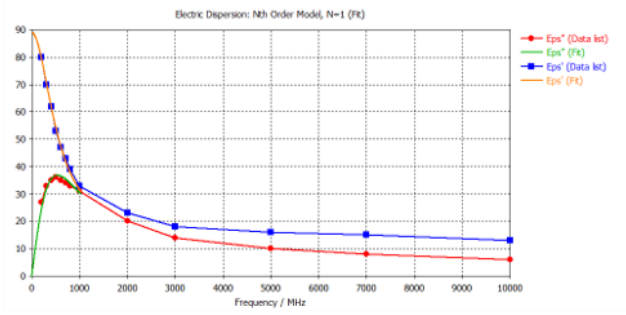

Figure 5: Permittivity of a SiC, ε': blue, and ε": red.

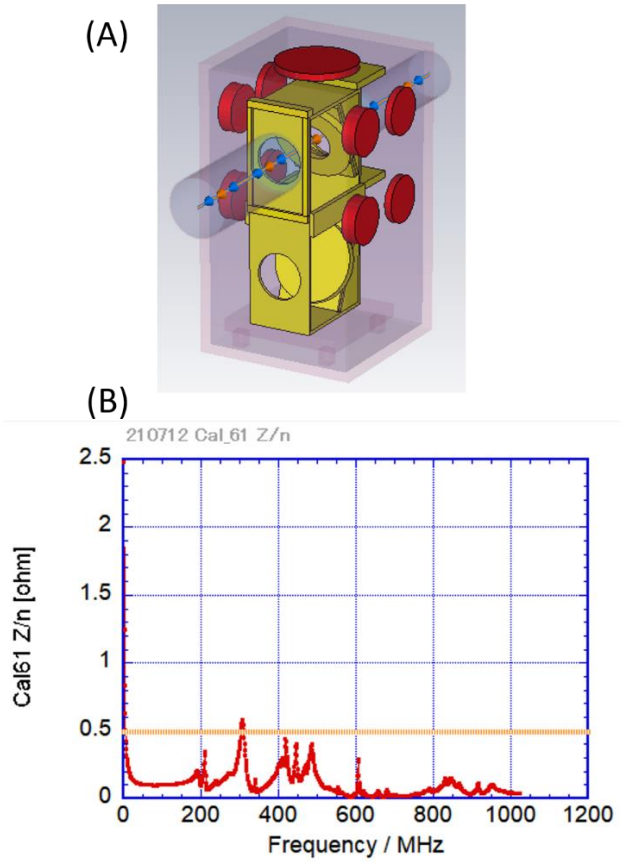

Figure 6: A wake field simulation with SiC, (A) red plates means SiC, and (B) wake impedances.

チェンバー側面の ICF253 フランジの 8 面と、上面の ICF406 フランジ 1 面の計 9 面に、SiC を取り付けた構成が、インピーダンス低減に高い効果を持った (Fig. 6)。側面のビーム下流側の ICF253 の SiC プレートの位置は、空洞内の視野空間が広いため、厚みを 60 mm とすることで効果が増した、他は、厚み 30 mm となった。ビーム進行方向のインピーダンス(Fig. 6 (B))は、250 MHz の 0.6 Ω のピークが最大であり、他は目標の 0.5 Ω 以下となった。

このモデルにおける空洞のウェイクによるフィールドパワーとウェイクポテンシャルについての 1 バンチ間隔時間の変化は、Fig. 7 のようになった。フィールドは、バンチ通過時に 28.24 dBm (0.66 W) であり、次のバンチの時間には、52 dB 減衰する。ただし、この計算ではバンチあたり 3×10^{12} 陽子(CST での計算の制限によりこの値とした)であり、パワーはすべて SiC で吸収していると仮定している。実際には、例えば将来の 5×10^{13} 陽子などのバンチでは、11 W 程度と見積もることができる。また、ウェイクポテンシャルは、バンチ時間間隔の 1/3 程度で減衰する。このようなことから、前のバンチの作ったウェイクの影響は受けないと言える。

5. まとめと今後の展望

J-PARC MR の大強度化において、入射ビームのための診断装置の高度化において、OTR と蛍光を用いたプロファイルモニターの 2 号機を開発している。設計通りの

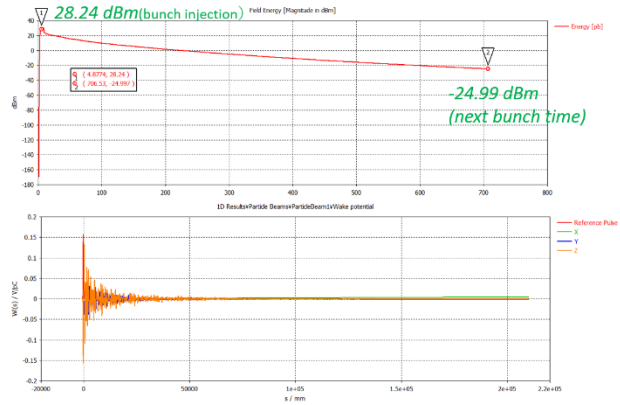

Figure 7: Calculated field energy (A) and wake potential (B) during one-bunch time separation of 700 ns.

構成で装置は完成し、テストベンチで特性測定を行っている。MR へのインストールには、ビーム不安定性の低減化のためにビームとのカップリングインピーダンスを、0.5 Ω 程度以下で、かつできるだけ小さくすることの要求があった。その対策として SiC を入れることで、0.6 Ω 程度以下のインピーダンスとなるシミュレーション結果を得た。

今後、SiC を製作し、ベンチにおけるインピーダンス測定を行う。

謝辞

KEK 竹内保直氏には、SiC に関して多くのご協力をいただいている。また本研究は科研費 JP16H06288 の助成を受けている。

参考文献

[1] Y. Hashimoto, *et al.*, Proc. IBIC2013, Oxford, UK, Sep. 2013, pp338-341; https://accelconf.web.cern.ch/IBIC2013/papers/tucl2.pdf
[2] Y. Hashimoto, *et al.*, Proc. HB2014, East-Lansing, USA, Nov. 2014, pp187-191; http://accelconf.web.cern.ch/HB2014/papers/tuo2ab04.pdf
[3] Y. Sato, *et al.*, proc. PASJ2019, Kyoto, pp1125-1129; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI038.pdf
[4] S. Igarashi, K. Sato, C. Omori, (eds.), J-PARC 主リング 1.3MW 運転のための加速器技術設計報告書, KEK Report 2021; https://lib-extopc.kek.jp/preprints/PDF/2021/2124/2124002.pdf
[5] A. Offner, "New concepts in projection mask alignment", Optical Engineering, Vol. 14, No.2, 1975, p.130-132. https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.819.7324&rep=rep1&type=pdf
[6] 外山 毅、" ビームインスツルメント", OHO 2009; http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt3.html
[7] T. Toyama, *et al.*, in these proceedings, WEP022.
[8] 陳 栄治、" 大強度陽子ビームの不安定性", OHO 2005; http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt3.html
[9] CST Studio suite; https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/
[10] T. Kageyama, *et al.*, proc. PASJ2011, Tsukuba; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/TUPS126.pdf
[11] T. Abe, *et al.*, proc. PASJ2011, Tsukuba;

http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/THLR/THLR06.pdf
[12] Y. Takeuchi, *et al*., proc. PASJ2011, Tsukuba; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/TUPS137.pdf
[13] 竹内保直、“高周波窓などを例としたマイクロ波回路の設計”, OHO 2017; http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt4.html
[14] クアーズテック株式会社 CERASIC B; http://www.coorstek.co.jp/jpn/products/detail/detail_19.html