

テーブルトップ電子加速器に用いる C バンド加速空洞の開発

DEVELOPMENT OF A C-BAND TABLE-TOP ACCELERATOR

豊川弘之^{#,A)}, 金田健一^{B)}, 中西康介^{B)}, 水島弘二^{B)}, 田辺英二^{B)},
山本昌志^{C)}, 藤原健^{A)}, 井上彬^{D)}, 夏井拓也^{D)}, 吉田光宏^{D)}

Hiroyuki Toyokawa^{#,A)}, Kenichi Kaneta^{B)}, Kousuke Nakanishi^{B)}, Hiroji Mizushima^{B)}, Eiji Tanabe^{B)},
Masashi Yamamoto^{C)}, Takeshi Fujiwara^{A)}, Akira Inoue^{D)}, Takuya Natsui^{D)}, Mitsuhiro Yoshida^{D)}

^{A)} AIST, ^{B)} AET Inc., ^{C)} Accuthera Inc., ^{D)} KEK-Sokendai

Abstract

We propose a backscatter x-ray imaging using high-energy x-rays for nondestructive inspection of infrastructure made of concrete, such as road bridge and roadbed. The optimal x-ray energy will be 0.5 - 0.9 MeV. Because the x-ray emitter is used at outdoor-field, the system must be compact and light weight. So, we propose a table-top c-band electron accelerator system for the compact x-ray emitter system.

1. はじめに

産業技術総合研究所では道路床版や鉄筋コンクリート構造物などの社会インフラの劣化診断を高精度かつ迅速に行うため、高エネルギー X 線を用いた後方散乱 X 線イメージングによる非破壊検査手法の研究をスタートしたところである。小型電子加速器のメリットである可搬性を活かし、野外でのコンクリート内部を高精度画像として可視化することを目指している。そのための X 線源として 1 MeV 以下の小型電子加速器を開発することとなった。そこで小型・軽量のテーブルトップ C バンド電子加速器を開発したので報告する。

近年、道路橋やトンネルなど、コンクリートで作られた社会インフラ構造物の耐用年数が限界に近づきつつあり、健全性診断を迅速に行う先端技術の必要性が高まっている。コンクリート構造物の点検は目視、打音、超音波の他、電磁波レーダ、X 線透過試験等が用いられる。電磁波レーダとは数 100MHz~数 GHz のマイクロ波の反射を使ったイメージング計測手法であり、空間分解能は数 cm であるが、反射波を用いていることから片側からのアクセスで内部を可視化できる利点があり、現場での検査に活用されている。X 線透過試験はコンクリート内部を数 mm の空間分解能で可視化できるため、高精細な可視化検査が可能である。厚さ数 10 cm~数 m のコンクリートを透過して鮮明な画像を得るためには、管電圧 450 kV 以上の透過力の高い高線量率 X 線を使用することが必要であるが、実際のインフラ検査の現場では撮影機器を置く場所や撮影可能な位置が限られていることが多く、運用面では多くの課題がある。

このような場合 X 線の反射を用いる後方散乱 X 線イメージングが有効である。後方散乱 X 線とは、X 線ビームを照射した方向にコンプトン散乱された X 線のことであり、ある程度の深さに侵入した X 線の反射も含むため、表面より数 cm 程度であれば内部を可視化できる。電磁波レーダのように片側からの検査が可能であるため、実用上有利なことが多いと期待されている。本研究では、構造的に重要な鉄筋や道路床版の劣化診断等への利用

を目指しており、コンクリート内部 10 cm の損傷可視化を目標としている。

本稿では、後方散乱イメージングに用いるための X 線源として開発した、最大ピーク出力 600 kW の C バンド帯域(5.3 GHz)マグネトロンを用いた小型電子加速器の設計について、加速管の設計・製作、および高周波特性を評価した結果を報告する。また、実際に組み上げた電子加速についても報告する。

2. C バンド電子加速器システムの設計

2.1 基本仕様

Table 1: Specification of C-band Accelerator

Frequency	5300 MHz
Peak RF power	600 kW (Average: 600 W)
Operation	$\pi/2$ mode (Standing-wave)
Waveguide	WRI-48 (WRJ-5)
Coupling	On Axis type
Beam energy	900-1000 keV
Target current	100 mA
Beam size	< 1 mm
Cathode	Thermal type

2.2 基本設計

熱電子銃は価格や信頼性を踏まえ、産業用に標準的に使われているものを選択するのが良いと考える。我々は新日本無線(株)製の碍子付電子銃を選択した。加速管の基本的な設計は Genera Particle Tracer (GPT) [1]の粒子シミュレーションにて決定した。具体的な形状は以下の通りである。

- 加速セル数は 5 個
- RF の位相速度 β を決める計算形状は Figure1 の通り。

[#] h.toyokawa@aist.go.jp

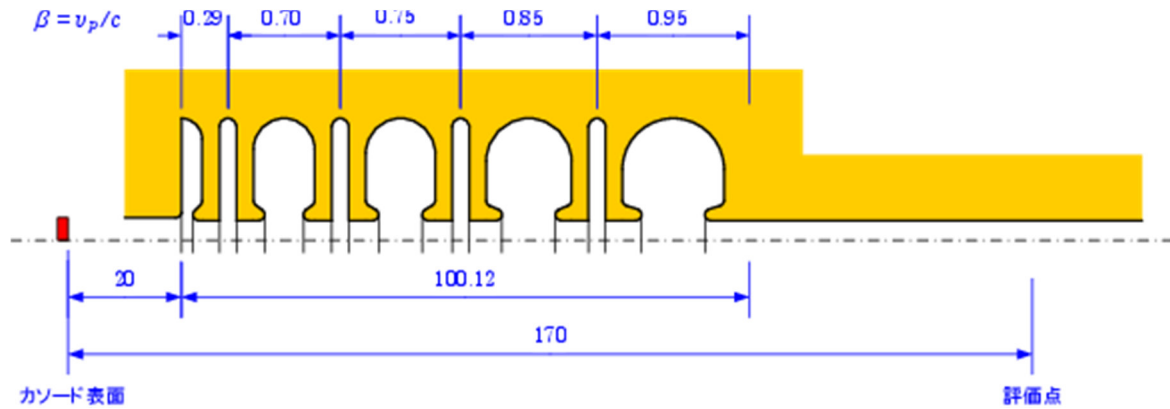


Figure 1: Model figure for GPT simulation.

- ディスクのボア径(2a)、出力ビームパイプは $\phi 7$ mm で一定。入力ビームパイプは $\phi 8$ mm とする。
 - On axis 型とするため、ディスク厚さ(t)は 9 mm(肉厚 3 mm+結合セル 3 mm+肉厚 3 mm)で一定。
- 以下の計算では熱カソードからビームエネルギー 20 keV で 300 mA のエミッションを想定した。カソード径は $\phi 3$ mm にしている。ビームトラッキングシミュレーションに用いた電子銃のモデルを Figure 2 に示す。ウエネルト電極のビーム軸との傾きは 39.58 度である。ビーム軌道計算結果として、ビーム径を Figure 3、電子ビームの位相分布を Figure 4 に示す。縦軸の 180 度が最大加速電場であるクレスト位相となる。

3. 三次元構造

3.1 スリット形状とカップリング

加速セルと結合セルをカップリングさせるためのスリット構造をセル間に設ける。構造は On Axis 型となる Figure 5 の形とした。本加速管の設計方針でカップリングを可能な限り大きくすることを目標にした。カップリングが大きければシャントインピーダンスが下がるという弊害が起こる。しかし、安定性は格段に向上する。今回の設計ではシャントインピーダンスがスリットの無い形状に比べて 90%となるまでスリットを大きく削り込み、出来る限りカップリングを大きくした。結果、式(1)を用いてカップリングは 9.9%になることを確認した。サイドカップリング型のカップリングはおよそ 3%程度であるのに比べて、今回設計した On Axis 型のカップリングが非常に大きくなった。

$$\kappa = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\omega_{\pi/2}}{\omega_0} \right)^2 - \left(\frac{\omega_{\pi/2}}{\omega_{\pi}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ここで、 ω は共振角周波数を表し、各添字はモードを示している。0 モードと π モードは MW STUIDO(MWS)[2]を用いて境界面を位相シフト 0 度の periodic で計算している。

3.2 カプラーセル形状

最も効率よく RF のエネルギーをビームエネルギーに変換するカップリング η をシャントインピーダンスと供給

可能な RF 電力から求める。定在波型加速管の加速電圧 V は式(2)となる。

$$\eta = \frac{2\sqrt{\eta}\sqrt{PR_s}}{1+\eta} - \frac{R_s I_b}{1+\eta} \quad (2)$$

ここで P は RF 電力、 R_s は加速管のシャントインピーダンス、 I_b はビーム電流である。マグネトロンからの RF 電力は最大 600 kW であるが、導波管損失を考慮して 500 kW とした。加速管のシャントインピーダンスは MWS より 6.5 M Ω となる。ビーム電力を 150 mA と想定したときの最大電圧を得るカップリングは 1.6 となる。しかし実際にはビームエネルギーから考えた最適なカップリングよりも少し大きく(over coupling)したほうが、ビームローディングが大きい場合は安定化するなど、実用的な利点が多いことが分かっている。マグネトロン周波数は automatic frequency controller(AFC)を用いて安定化することができる。このことを踏まえ、製作する加速管のカップリングは 2.5 とした。加速管の Q 値(Q_0)と外部 Q(Q_{ext})には

$$\eta = \frac{Q_0}{Q_{ext}} \quad (3)$$

の関係が成り立つため、カプラーセル($\beta=0.75$)の外部 Q が 404.4 となるようにカプラーセル形状を決定した。計算には MWS の F-Solver を用いて分散特性を調べた。ここで分散関数は

$$f = f_a \sqrt{1 - \eta \cos \theta} \quad (4)$$

でフィッティングしている[3]。ここで f_a は $\pi/2$ モードの周波数を表す。Figure 6, 7 にカプラーセルの計算形状と分散特性の結果を示す。RF 電力は WRJ-5 導波管からステップ導波管で変換した。ステップ導波管で電力を供給することでテーパー導波管に比べて径方向のサイズを小さくすることが可能である[4]。

3.3 PIC 計算

全体の構造を決定したので、最後に CST Particle Studio[2]を用いて粒子トラッキングシミュレーションを行った(Figure 8)。最大電界強度は第一セルのノーズ部分となっており 60 MV/m 程度になる。しかし、セル内の表面を滑らかにして十分な真空を引けば問題ないと考えている[5]。

4. セルの製作

4.1 精密加工

本加速管のセル加工においては鏡面加工に至るまでの超精密表面処理を行っていない。これはカップリングが十分に大きく、フィールド分布が加工精度によって大きく変動しないことから可能なことである。鏡面加工を行わず、特殊な表面処理を施すことで、比較的高い電場でも放電しない加速管を試作した。加工したセルを Figure 9 に示す。

5. 測定結果

5.1 低電力試験

ネットワークアナライザーを用いて測定した結果と MWS で計算した結果を比較した(Table 2)。

Table 2: Measurement and Simulation Results

Mode	Measurement	Simulation
#1	5.0392	5.0405
#2	5.1427	5.1429
#3	5.2964	5.2968
#4	5.4363	5.4357
#5	5.5394	5.5383

5.2 高電力試験

試験の様子を Figure 10 に示す。

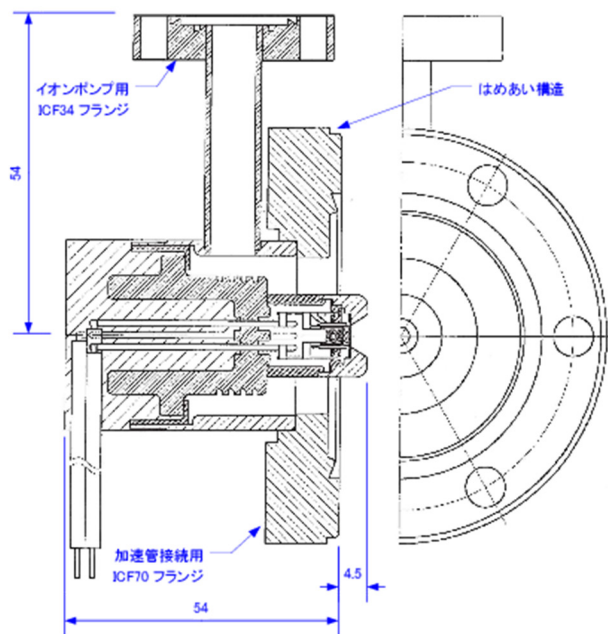


Figure 2: Electric gun layout.

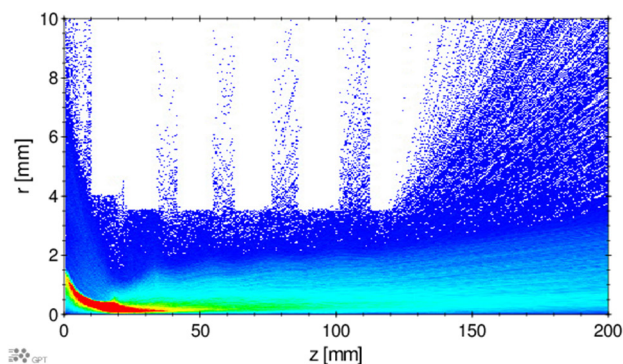


Figure 3: Beam size distribution along longitudinal direction.

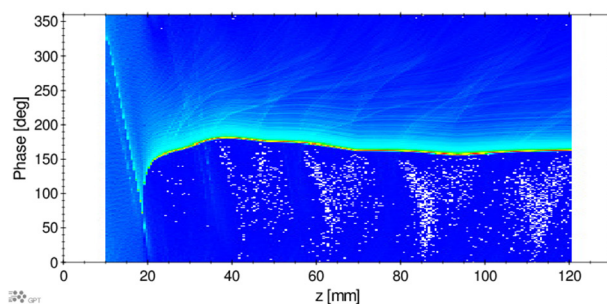


Figure 4: Phase distribution of electron beam. 180 degree consists with the crest phase for acceleration.

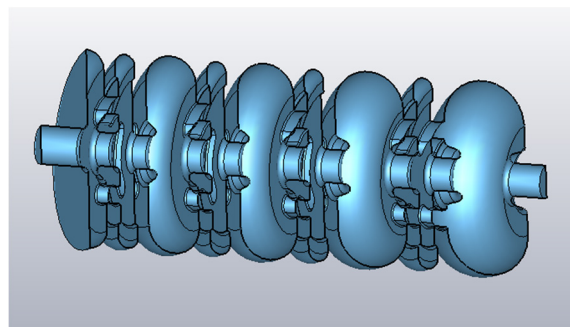


Figure 5: On axis type accelerator structure.

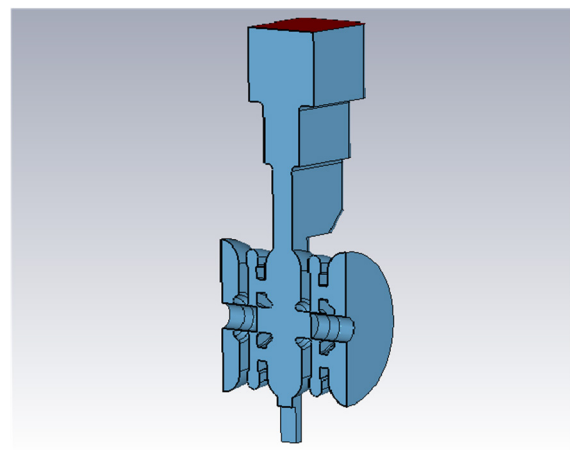


Figure 6: Coupling cell structure.

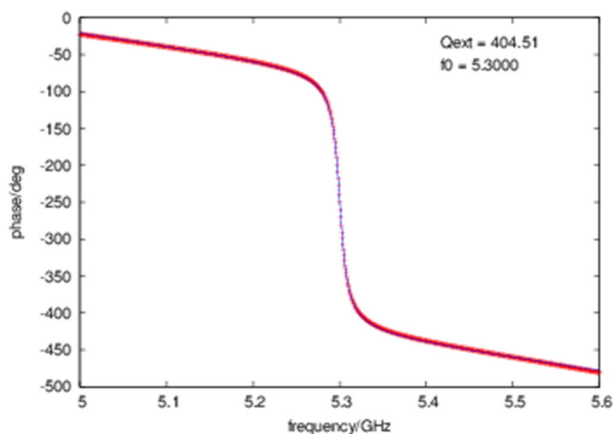


Figure 7: Dispersion relation of the coupling cell.

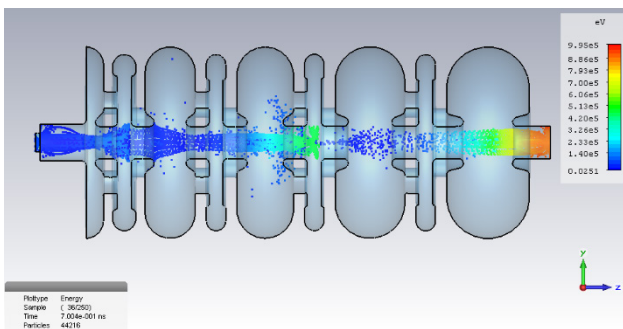


Figure 8: PIC simulation result.



Figure 9: Cavity cells before assemble.

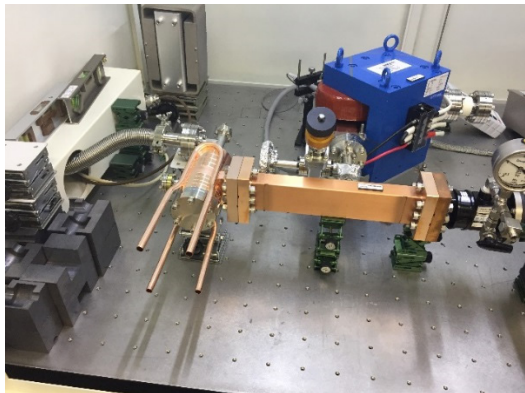


Figure 10: High-power experiment.

現在、マグネトロンや高周波輸送系モニタ機器類を装備して、テストベンチを構築し、さらに後方散乱 X 線イメージング実験を行っているところである。装置の現状を Figure 11 に示す。

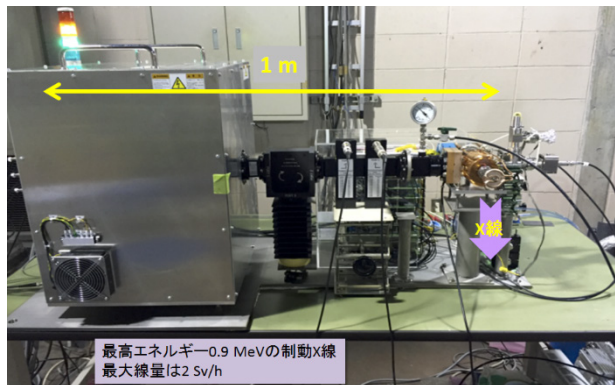


Figure 11: Table-top c-band x-ray emitter system.

6. おわりに

現在、本稿に記した加速器を用いて高エネルギー X 線を用いた後方散乱 X 線イメージングによる非破壊検査について様々な試験を行っており、多くの知見が得られつつある。今後、機会があれば本会にて状況報告をしたい。なお、現在、後方散乱 X 線イメージングに最適化した加速空洞等の装置改良を進めているところであり、年度内に実際の試験を実施したいと考えている。

参考文献

- [1] Pulsar Physics, <http://www.pulsar.nl/index.htm>.
- [2] CST AG., <https://www.cst.com>.
- [3] T. Higo, “ディスクロード型加速構造のカップラーマッチングに関する簡単な等価回路解析”, 高エネルギー加速器研究機構, JLC-note No.47, 1993.
- [4] K. Kaneta *et al.*, “C-band バンチャー加速管の設計・製作”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014
- [5] E. Tanabe *et al.*, “VOLTAGE BREAKDOWN AT X-BAND AND C-BAND FREQUENCIES”, Proc.1986 Linear Accelerator Conference, TH3-11, 458-460, 1986.