

マイクロ波源ジャイロトロン開発のための CST シミュレーション DEVELOPMENT OF A GYROTRON BY USING CST SIMULATION

金田健一^{#, A)}, 宮澤順一^{A)}, 後藤拓也^{A)}, 中村誠^{A)}, 田村仁^{A)}, 山本昌志^{B)}, 南龍太郎^{C)}, 假家強^{C)}

Kenichi Kaneta^{#, A)}, Miyazawa Junichi^{A)}, Takuya Goto^{A)}, Makoto Nakamura^{A)}, Hitoshi Tamura^{A)},

Masashi Yamamoto^{B)}, Ryutaro Minami^{C)}, Tsuyoshi Kariya^{C)}

^{A)} Helical Fusion Co., Ltd.

^{B)} Omega Solutions Co., Ltd.

^{C)} University of Tsukuba

Abstract

Gyrotrons have been developed as microwave generators. The mechanism of a gyrotron is that an electron beam is accelerated by the voltage between the cathode and anode. In contrast, the beam is focused by a solenoid field and self-excited in a cavity resonator. The development process involves optimizing the required voltage, beam current, cavity dimensions, and solenoid field strength. In the past, optimization conditions were calculated using theoretical equations and simple 2-D codes, but nowadays many 3-D simulators are used, including commercial codes such as CST and dedicated codes. Furthermore, performance optimization is being conducted based on fabricated oscillation tests of the gyrotron. In this study, transient analysis calculations up to oscillation are performed using CST based on the design of a gyrotron for our helical fusion reactor designed at the University of Tsukuba as part of an industry-academia joint research project. This was not feasible with traditional computation methods due to the long computation times required. Therefore, the simulations were accelerated using GPU in AWS, a recent high-speed computing cloud. We have established a development system based on the simulation of 3D geometry, which has been difficult to study due to the long calculation time and will proceed with the fabrication of the actual machine based on the simulation results. As for industrial applications of gyrotrons, they are being considered for use in nuclear fusion reactors and rocket propulsion, and we recognize that this is a field that needs to be developed in the future.

1. はじめに

制御核融合の原理がアメリカ、ソ連、イギリスで極秘に研究され始めたのは 1940 年代頃で、核融合にプラズマを用いる概念が登場するまでにはそれほど時間はかからなかった。核融合反応を起こすためにはプラズマを 1 億℃以上の高温にする必要がある。プラズマを加熱する方法には様々なものが考案されてきたが、効率、運転時間、費用の観点から高周波を用いる方法が最適とされている。プラズマは電子のサイクロトロン(ジャイロ)周波数の高周波で加熱する。核融合炉で用いられる閉じ込め磁場強度は数テスラに達し、電子のサイクロトロン(ジャイロ)周波数は 100 GHz のオーダーである。クライストロンなどのマイクロ波管技術では、この周波数帯での高出力が得られない。これは、周波数の増加、つまり波長の減少に伴い、ビームと電磁波が相互作用する構造寸法が著しく減少することに起因する。

1959 年に、Twiss、Schneider、Gaponov によるジャイロトロン理論が発表された[1]。同時期に、超電導の分野でも材料と技術の両面で大きな進展があった。数十テスラの磁場を供給できる超電導マグネットが様々な科学的応用のために開発され、その結果、1965 年にはロシアで最初のジャイロトロンが開発された。現代では、100 GHz を超える周波数で 1 MW 近くの出力を供給するジャイロトロンが製造されている[2]。

株式会社 Helical Fusion(以下、「HF 社」)では、最終

実験装置(以下、「FED」)と核融合発電初号機(以下、「FPP」)の建設を計画している。FPP では稼働率 80%以上で 50 MWe の電力供給を目指している。この目標を達成しつつ建設費用を抑えるため、核融合炉の小型化を優先し、高温超伝導コイルを用いて 8.79 T のプラズマ中心磁場強度で閉じ込めることにした[3]。FPP の外観を Fig. 1 に示す。この核融合炉で 50 MWe の電力供給が可能となれば、さらに大規模な核融合炉の建設に向けた事業化が進められる。一方、主要技術の実証と統合のため、最終実験装置として Fig. 2 に示す FED の建設を予定している。FED はヘリカルコイル中心磁場強度 2 T で設計されている。想定したプラズマパラメータで想定通りのプラズマの保持できることが、今後の FPP の成功に直結すると考えている。

2. 筑波大学との共同研究

HF 社は 2023 年度にヘリカル型核融合炉用ジャイロトロン開発に関する産学連携共同研究を筑波大学と実施し、200 GHz で 1 MW のマイクロ波を発振するジャイロトロンを電気設計を依頼した。HF 社は三次元電磁界解析ソフト CST [4]を導入し、筑波大学の計算結果を検証した。

電子銃はカソードとアノード間の電圧を調整することでビームのエネルギー分散とピッチ角(電子の横方向速度と進行方向速度の比)が変わる。筑波大学の電子銃設計コードを用いた結果と HF 社の CST を用いた結果は十分な精度で一致した。次に空洞共振器部分の寸法を

[#] kenichi.kaneta@helicalfusion.com

CST に入力し、外部磁場とビームの初期パラメータを決定して PIC 計算したところ、200 GHz の発振を確認した。最後に放射器と呼ばれるモード変換器の計算を行い TE_{34,14} モードの電場分布が出力に適したガウシアンライクに変換されていることを確認した。

CST は統合シミュレーションが可能なツールで、ジャイロトロン設計では各種電磁場と電子との相互作用を計算する。また、計算内容を分割することで、効率よく設計が可能である。我々は、(1) コイルの磁場計算、(2) 電子銃から空洞共振器手前まで電子の分布、(3) 空洞共振器での電子・電磁場相互作用の PIC 計算、(4) 放射部の電磁波出力のように四分割し、それぞれ最適化を進めている。CST を用いると、近似が無い三次元のジャイロトロン設計が行える。

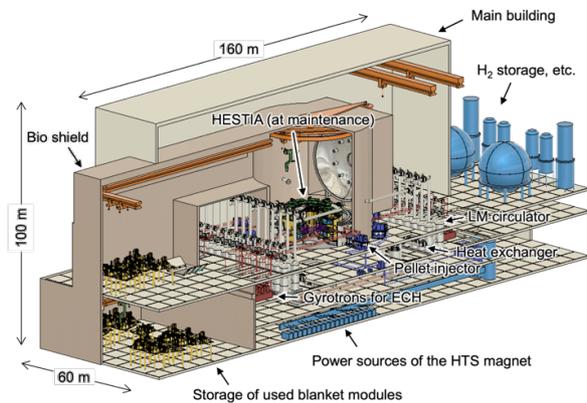


Figure 1: External view of the first fusion power generator.

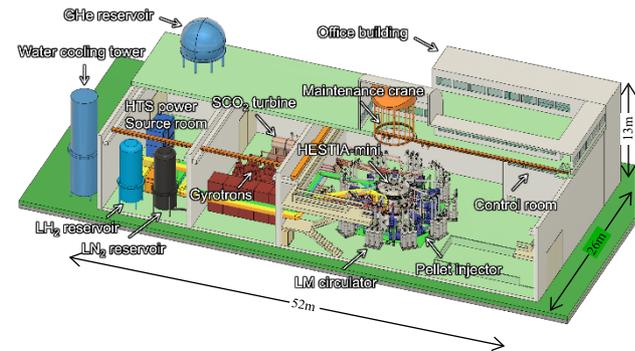


Figure 2: External view of the final experimental device.

3. 電子銃のシミュレーション

Figure 3 に CST の Trk ソルバーを使った電子銃から空洞共振器までの電子ビームの計算結果を示す。この電子銃はコイル磁場で収束された2極管である。高周波の出力を決める重要パラメータであるピッチ角 (pitch factor) は、カソードとアノード間の電圧差やその距離を変えることで変化する。その様子を Fig. 3 に示す。ここではアノード半径と電圧を変化させた場合のピッチ角度を示している。

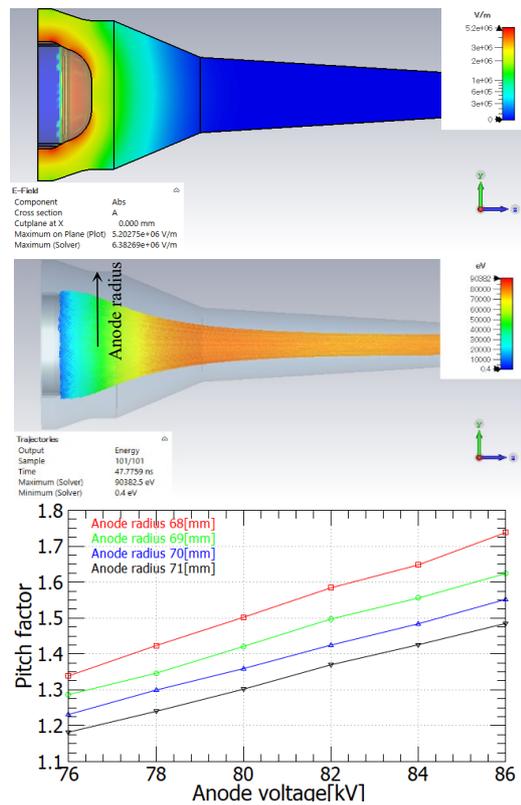


Figure 3: Simulation result for an electron gun. (Top) magnitude of the electric field. (Middle) beam tracking simulation result. (Bottom) the pitch factor by changing anode voltage. The different color curves are different anode geometries.

4. 空洞共振器のシミュレーション

空洞共振器の計算には CST の PIC ソルバーを用いた。初期の段階では粒子を理想的に分布させ、一様磁場を想定し発振効率が最大になる条件を決定する。PIC を用いた計算には CPU パワーが必要なため、これまで長時間にわたるシミュレーションが難しかった。しかし、近年の GPU 性能の向上から計算時間をかなり短縮することが可能になっている。ジャイロトロン論文[5]に記載されているパラメータからモデルを作り、GPU 性能のベンチマークテストを実施した。このジャイロトロン発振 (周波数、モード) は (140GHz、TE_{10,4}) で 100 ns の過渡解析である。得られたベンチマークテスト結果を Table 1 に示す。GPU: RTX6000Ada のバンド幅が 960 GB/s に対して A100 のバンド幅が 2000 GB/s である。そのため、2 倍の速度差となっている。WDDM と TCC は GPU の運転モードを示しており、TCC モードで計算を実施しないと GPU 性能を発揮できないことを示している。近年の GPU には H100 というバンド幅が 4000 GB/s に届きそうなものまで販売されている (GPU 単体価格で ¥5M)。

HF 社は現在 FED 用に 112 GHz ジャイロトロンを開発を行っている。FED のヘリカルコイル中心磁場強度は 2 T であり、第 2 高調波を利用する。これはプラズマ中には種々のカットオフ層が存在し、高密度領域でも有効な

中心加熱を行うためである[6]。

参考にしている空洞共振器の寸法はMITのジャイロトロンである[7]。それは、ビームエネルギー96 keVとビーム電流40 Aで発振パワー1.5 MWである。HF社で開発するジャイロトロンは24時間運転を予定しているため、設計の優先事項は安定稼働である。そのため、管内放電を抑制する必要があり、ビームエネルギーは74.2 keVと、参考にしたMITよりもカソードとアノード間の電圧を20 kV以上低くしている。この場合の計算結果をFig. 4に示す。自励発振で波が成長し60 ns程度で発振パワーが安定しているが、目標発振パワーよりも低く、より良いパラメータを見つける必要がある。今後、PIC計算をさらに加速していく予定である。具体的には現在弊社ではAWS[8]を利用しており、そのGPUはA10である。今年中にL40がリリースされるとの情報を得ており、GPUの性能向上で計算時間を短縮、また計算機の契約台数を増やすことも計画している。

Table 1: Machine Benchmark Test Results

Machine spec	Solver time	Cost
CPU4core	8 hr 12 min	¥200k
CPU16core	2 hr 25 min	¥450k
CPU16core+RTX6000Ada(WDDM)	1 hr 50 min	¥2.2M
CPU16core+RTX6000Ada(TCC)	56 min	¥2.2M
CPU18core+A100	33 min	¥8M

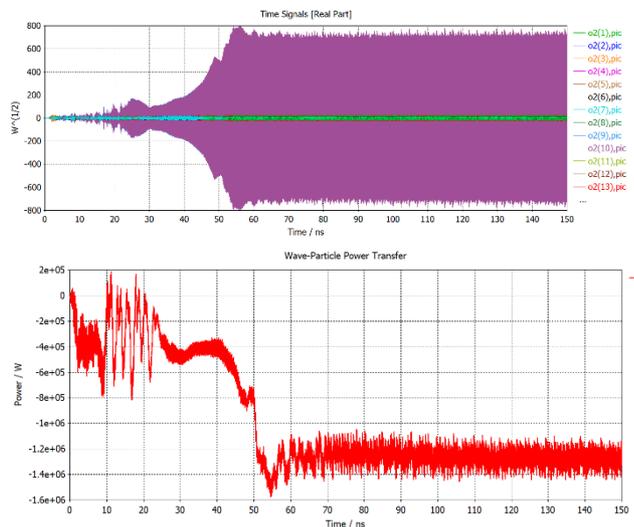


Figure 4: (Top) Output signal (voltage change) from the cavity. (Bottom) Output power from the cavity. Power conversion from electron to wave (negative power) wave grows and stabilizes at about 60 ns.

5. 放射器のシミュレーション

放射器(モード変換器)の設計にはSurf3dを用いた[9]。空洞共振器で出てくる高次モード(TE_{22,6})を複数の高次モードと干渉させることで指向性の高いガウス分布に形

成する。空洞共振器から出てくるTE_{22,6}モードに対して、放射器に微細形状を施すことによってTable 2のモード比率(パワー比率)で高次モードが干渉する[10]。Table 2左欄にある高次モードを右欄のパワー比率で合成すると干渉が起こり、出力はガウス分布になることを示している。干渉によりガウス分布に成形したマイクロ波分布をFig. 5に示す。このSurf3dの結果からCSTモデルを作成して、微細構造ありと無しでのシミュレーションを行っている。

Table 2: Mode Composition for the Launcher of TE_{22,6} Mode

Mode	Power
TE _{16,8}	2.0%
TE _{17,8}	1.0%
TE _{18,7}	3.9%
TE _{19,7}	20.7%
TE _{20,7}	8.4%
TE _{21,6}	9.1%
TE _{21,7}	1.0%
TE _{22,6}	26.7%
TE _{23,6}	8.6%
TE _{24,5}	3.8%
TE _{25,5}	8.4%
TE _{26,5}	3.0%
TE _{28,4}	0.9%

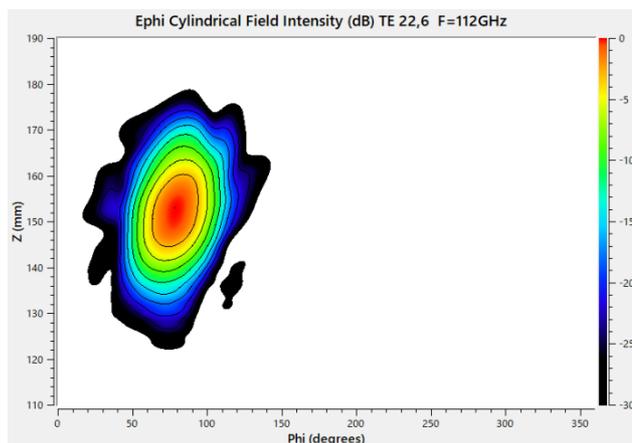


Figure 5: Radiated field patterns at r=50 m from the launcher axis. Each contour line is 3 dB.

6. まとめ

これまでの計算結果は、CSTを用いてジャイロトロンの設計が可能であることを示している。CSTで電子銃から発振に至るまでの統合シミュレーションを実施した。その作成した三次元モデルを設計図面に落とし込むことで、

信頼性の高いジャイロトロンを製作できると考えている。製作したジャイロトロンにおいて、無調整でほぼ設計どおりの測定結果が得られることが望ましいが、測定結果とシミュレーション結果の比較検討が必要である。そのフィードバックを正確に行うことで、開発したジャイロトロン改善が可能となる。また、HF 社では多くのジャイロトロンを必要としており、量産化に向けた検討も進めていく。

謝辞

産学連携共同研究により 200 GHz ジャイロトロン電気設計を行っていただいた筑波大学の皆様に深く感謝申し上げます。計算環境の大幅な向上にご協力いただいた AWS、および CST 導入にご協力いただいた AET の皆様にも感謝いたします。最後に、未経験の私にジャイロトロン開発という大役を任せていただいた株式会社 Helical Fusion の皆様に深く感謝するとともに、核融合炉での発電事業成功まで共に歩んでいけることを願っております。

参考文献

- [1] M. Kartikeyan *et al.*, “Gyrotrons – High Power Microwave and Millimeter Wave Technology” Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, 2004, ISBN 3-540-40200-4.
- [2] Gyrotron specification sheet from CANON ELECTRON TUBES & DEVICES,
<https://etd.canon/ja/product/category/microwave/gyrotron.html>
- [3] J. Miyazawa, T. Goto, “Development of Steady-State Fusion Reactor by Helical Fusion”, *Phys. Plasmas* 30, 050601 (2023).
- [4] CST, <https://www.cst.com>
- [5] A. Akash *et al.*, “Design and simulation investigations of high-power millimeter-wave gyrotron”, *JOURNAL OF ELECTROMAGNETIC WAVES AND APPLICATIONS*, 2020, VOL. 34, NO. 6, 744-758.
- [6] T. Shimozuma and K. Nagasaki, “ヘリカル装置における ECH・ECCD の進展”, *J. Plasma Fusion Res.* Vol.85, No.6 (2009) 368-377.
- [7] E. Choi, “Experimental study of a high efficiency gyrotron oscillator”, Ph.D Thesis, Department of Physics, MIT, 2007.
- [8] AWS, <https://docs.aws.amazon.com/>
- [9] J. Neilson and R. Bunger, Electric field integral equation analysis of quasioptical launchers using the multi level fast multipole algorithm, *Proc. of 28th IRMMW*, Th5-6, 377 (2003).
- [10] R. Minami *et al.*, “THE DESIGNS OF HIGH EFFICIENCY LAUNCHER OF QUASI-OPTICAL MODE CONVERTER FOR HIGH POWER GYROTRONS”, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 27, No. 1, January 2006.