

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

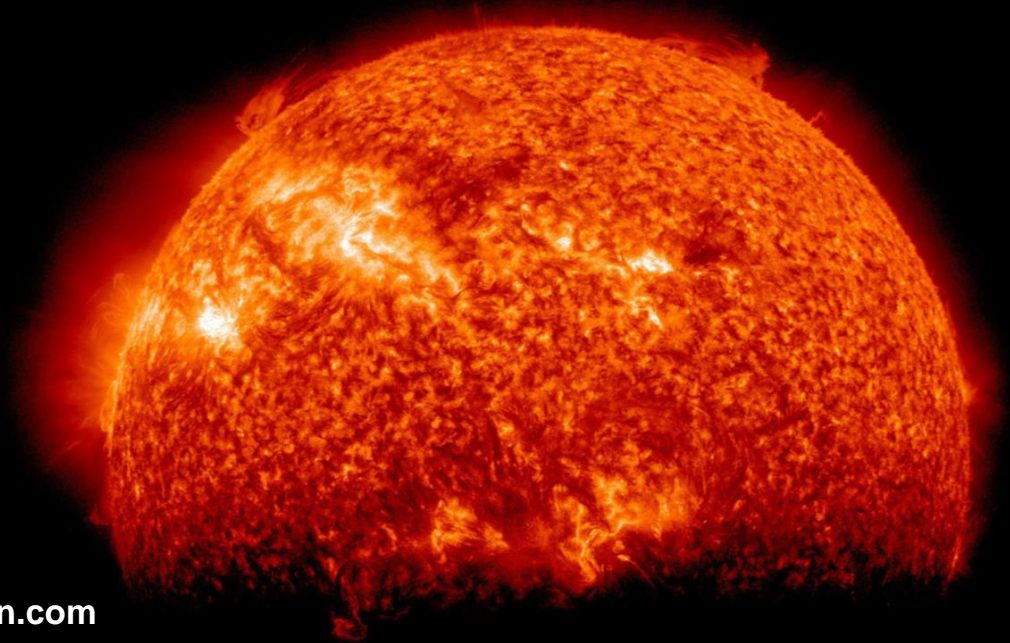
2024/8/2

株式会社Helical Fusion

金田 健一

人類は核融合で進化する

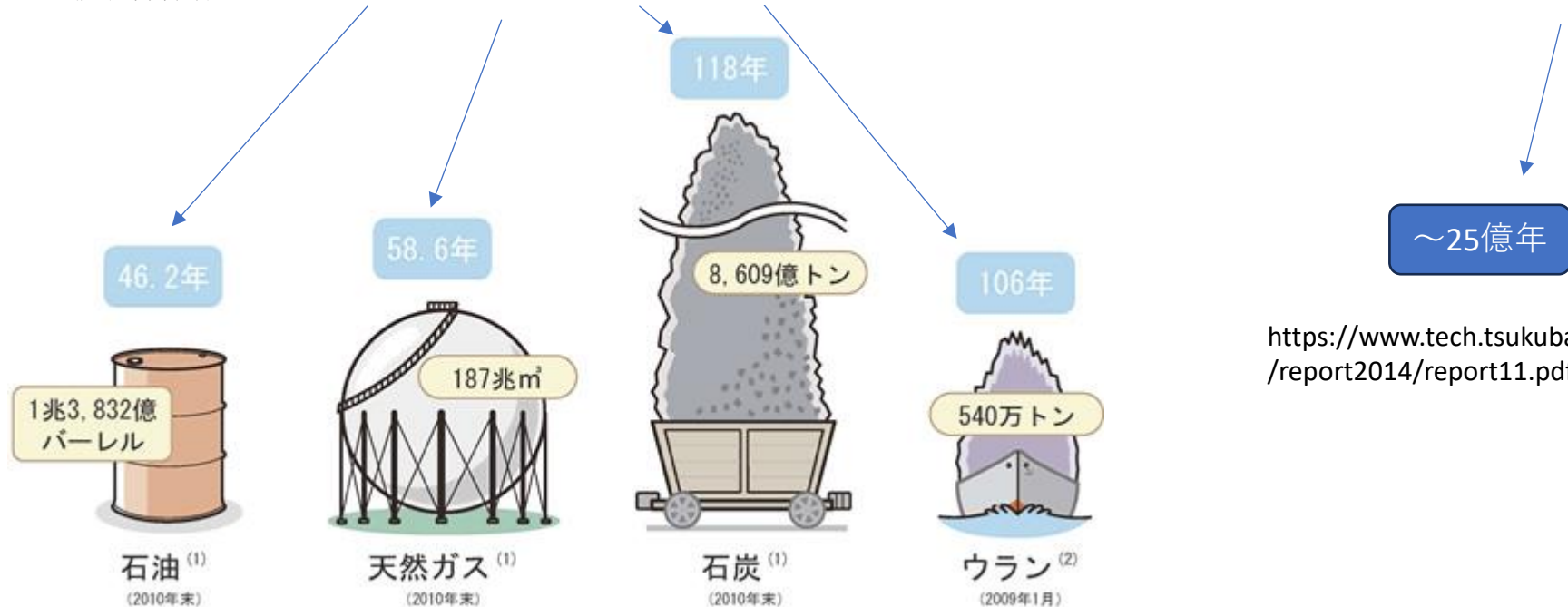
Helical Fusion



https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/006/pdf/006_06.pdf

核融合炉

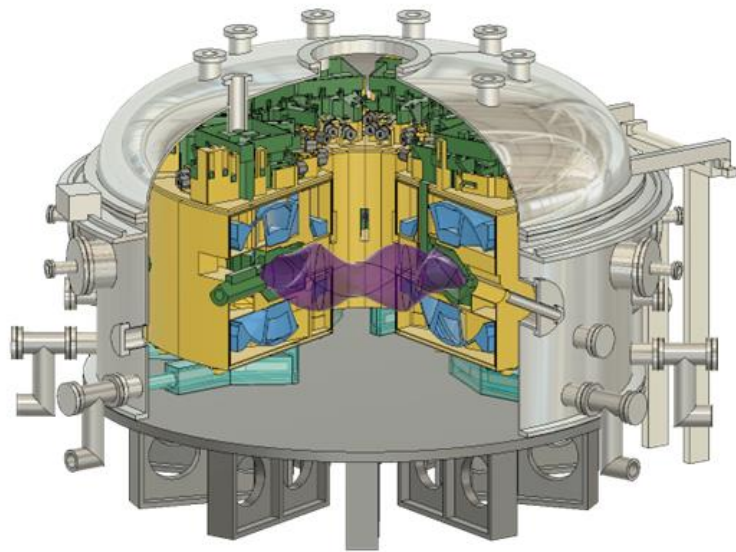
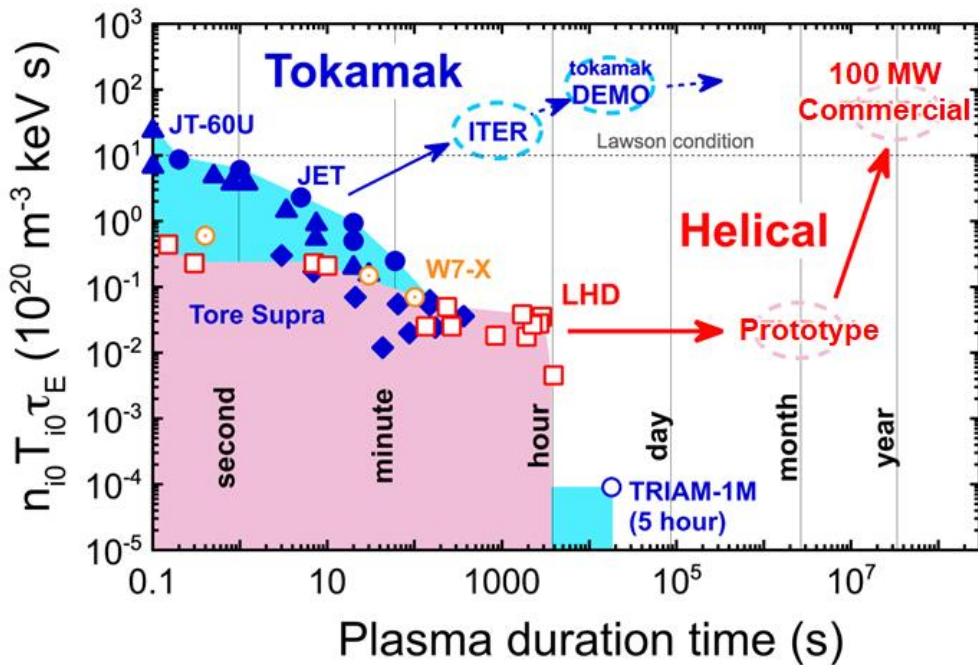
	石油火力	LNG火力	石炭火力	原子力	陸上風力	洋上風力	地熱発電	太陽光(住宅)	太陽光(メガ)	一般水力	FOAK	FFHR-d1
プラント規模(出力)[万kw]	40	140	80	120	2	10	3	0.0004	0.2	1.2	10.3	100
利用率(最大)[%]	80	80	80	80	20	30	83	12	14	45	(75)	
稼働年数(最大)[年]	40	40	40	60	25	25	50	25	25	60	(40)	(30)
建設費[万円/kw]	20	12	25	37	28.4	51.5	79	36.4	29.4	64	485.4	250
出力×建設費[億円]	800	1680	2000	4440	56.8	515	237	0.0146	5.88	76.8	5000	25000



<https://www.tech.tsukuba.ac.jp/2014/report2014/report11.pdf>

ヘリカルは通年運転に適している

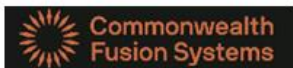
- 磁場閉じ込め方式で核融合発電を実現させる。
- トカマクはプラズマ性能が高いが、ヘリカルはプラズマ持続時間が長い。



100 MWe electricity production



全世界の核融合関連
スタートアップで
Fusion Industry
Association を結成



TAEテクノロジー(米)

反転磁場配位 (FRC) 方式で、中性子を出さない陽子・ホウ素核融合反応 ($p-^{11}B$) 反応を用いる商用核融合炉を2020年代後半に商用化することを目指す。2017年に癌の放射線治療BNCTのための中性子発生システムを開発する新会社を設立。



コモンウェルスフュージョンシステムズ(米)

マサチューセッツ工科大学(MIT)の強磁場トカマク Alcator C-mod の実績に基づき、小型トカマク核融合炉ARCと、その前身となるSPARCを開発中。高温超伝導マグネットの強磁場によるプラズマ閉じ込めを特徴とする。



ジェネラルフュージョン(加)

液体金属で高温プラズマを圧縮する磁化標的核融合による発電で商業化を目指すカナダのスタートアップ。2億ドルを超える調達資金はプロトタイプ建設に使用され、2025年から実証実験を行う予定。



ヘリカルフュージョン(日本)

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)で蓄えられたヘリオトロン方式核融合炉の実績や知見を基に、高温超伝導マグネットや液体ブランケットなどの新技術を採用入れた10万kW級ヘリカル核融合炉の社会実装を目指す。

京都フュージョニアリング(日本)



日本初の核融合ベンチャー企業。プラズマ加熱機器やブランケットなどの核融合炉用機器を開発・供給する。

エクスフュージョン(日本)



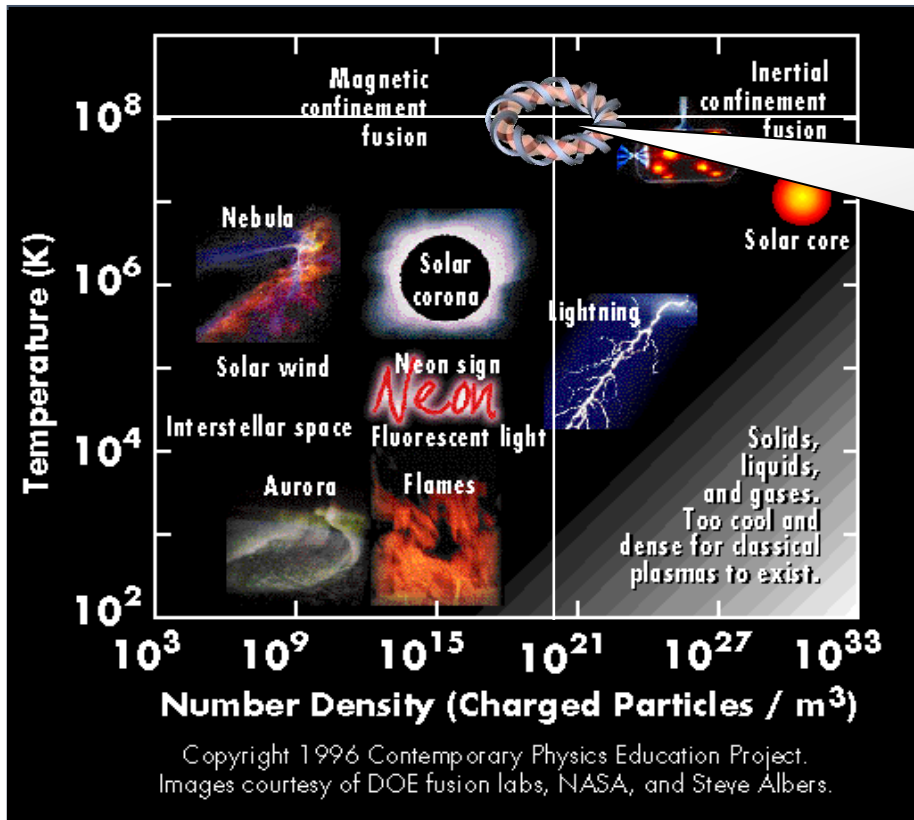
大阪大学などで培われた技術を基にレーザー慣性核融合炉の開発を行う。



トカマクエナジー(英)

英国カラム研究所のMASTで得られた知見を基に、高温超伝導マグネットを採用した球状トカマク方式で2030年の商用核融合発電を目指す。プロトタイプの小規模装置ST-25を経て、2018年にST-40で1,500万度のプラズマを実証。





Magnetic fusion plasma
 $10^{20} m^{-3}$ = 100 trillion (100兆個) /cc
 (A 2,000 m^3 fusion core plasma weighs ~1 g)
10 keV ~ 1 million degrees Celsius

Lawson condition

Fusion triple product

= (density) x (temperature) x (energy confinement time)

= $10^{20} m^{-3} \times 10 \text{ keV} \times 1 \text{ s} = 10^{21} m^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$

3D Gyrotron Simulation with CST STUDIO SUITE™

Monika C. Balk¹, Cier-Siang Chua², Xiang Li², Yasir Alfadh², Xiaodong Chen²

¹-CST AG
Bad Nauheimerstr. 19
64289 Darmstadt, Germany
Monika.balk@cst.com

²- Queen Mary University of London
Mile End Road
London E1 4NS
xiang.x.li@qmul.ac.uk

Abstract: This paper describes the analysis of a 42 GHz gyrotron with the 3D PIC simulation tool CST PARTICLE STUDIO®. Recently implemented features to aid such a simulation are shown. Variation studies concerning B field and beam properties are described. All simulations of the oscillation process are performed using a graphical processing unit (GPU). The results show good agreement to MAGIC simulations.

Keywords: EM Simulation, PIC, FIT, Gyrotron, GPU.

Introduction

Gyrotrons are interesting devices, since they can provide high output power at high frequency without the disadvantage of miniaturization. In contrast to Traveling Wave Tubes (TWTs) the dimensions of a Gyrotron do not depend on the operation frequency, but on the electron cyclotron resonance of particles in an external magnetic field.

An efficient way of predicting the performance of such a device is via simulation. This paper describes the gyrotron analysis by means of the Particle in Cell (PIC) solver of CST PARTICLE STUDIO®. The method used behind the scenes is the Finite Integration Technique [1]. Although the PIC solver is using a hexahedral mesh, the round geometry can be accurately taken into account via the PBA® method (see Figure 1).

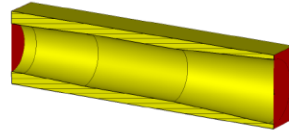
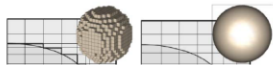


Figure 2. Cut through view of the Gyrotron geometry.

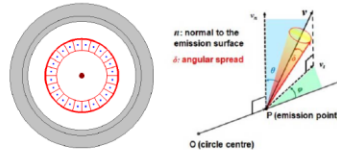


Figure 3. Top view of an annular particle source and description of the emission angle.

In Figure 3 the start up of the gyrotron in TE_{2,3} mode and stabilization in TE_{0,3} mode can be seen. To speed up the simulation, a target frequency for the waveguide port modes was implemented, such that the discussed modes are found as #3 and #7 instead of #50 and #52. The output power results from the port signals to $385^2/2 = 74.12$ kW, which agrees reasonably well to the MAGIC simulation (~80kW) performed in [3].

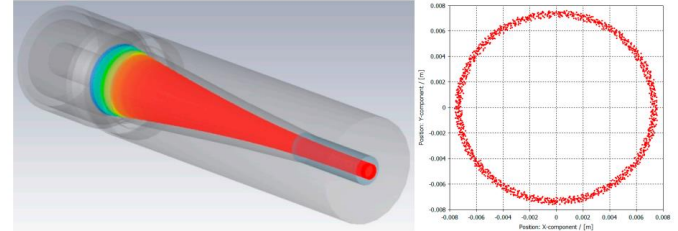


Figure 7. Trajectory of the electron beam simulated by CST. In the right image, a thickness of 0.4 mm can be observed for the electron beam injected into the resonator.

https://mdpi-res.com/d_attachment/electronics/electronics-11-01279/article_deploy/electronics-11-01279.pdf?version=1650273635

RESEARCH ARTICLE | MARCH 26 2019

Thermal design and simulation of the collector for 140GHz megawatt-class gyrotron on ITER

Guo Guo ✉; Xiaoming Xu; Junwei Guo; ... et. al

 Check for updates

AIP Advances 9, 035349 (2019)

<https://doi.org/10.1063/1.5091451>

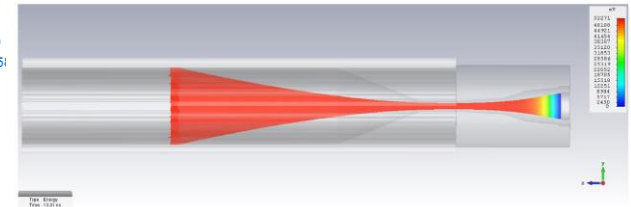
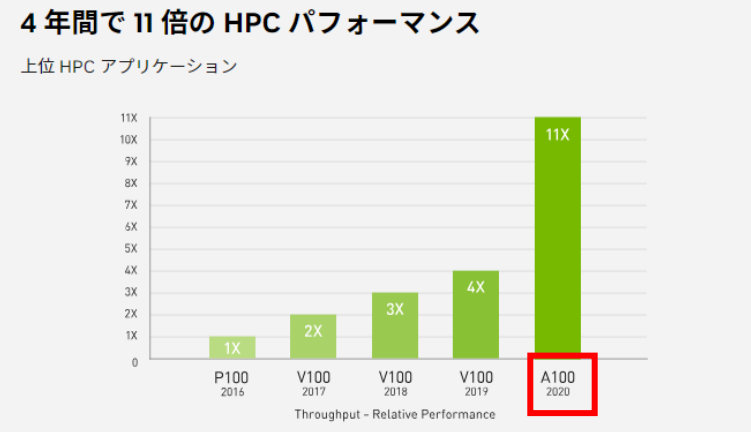
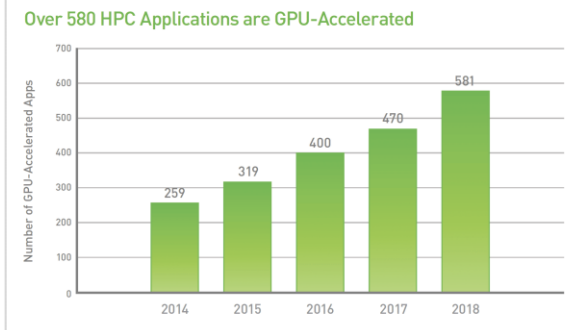
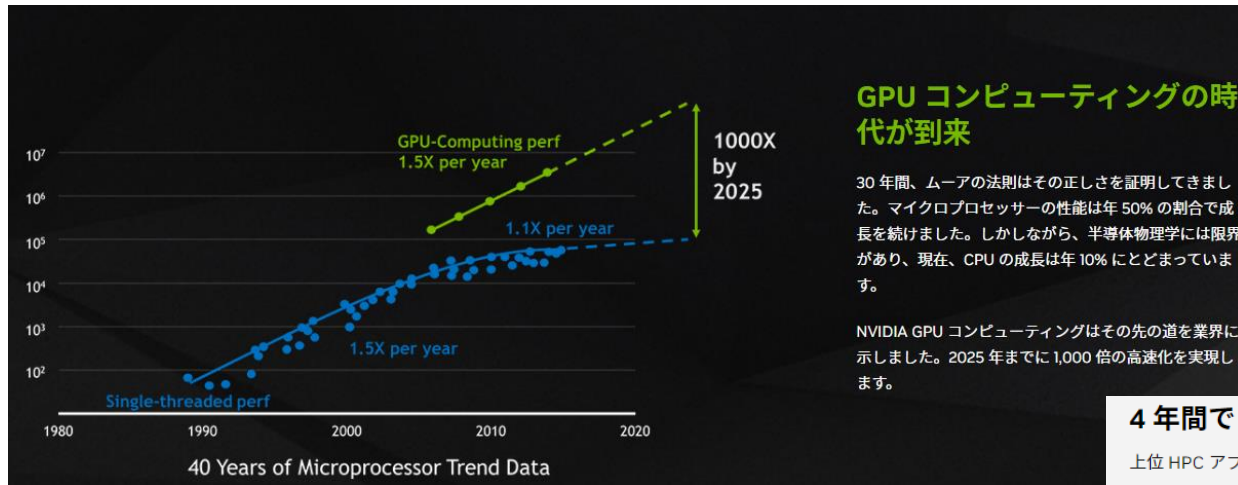


FIG. 2. Electron beam trajectory from CST Particle Studio.

2015年以降に増えてきているように見える→GPU性能の向上

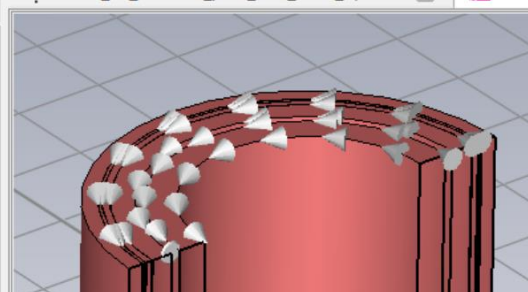
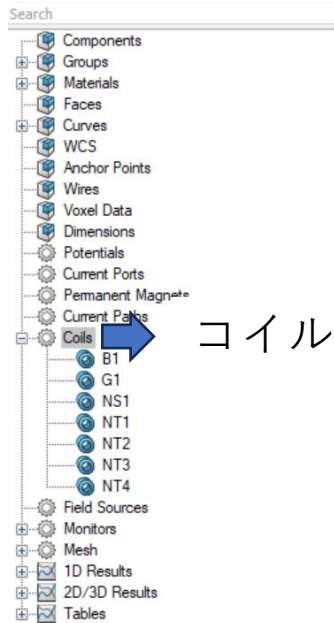


<https://www.nvidia.com/ja-jp/about-nvidia/ai-computing/>

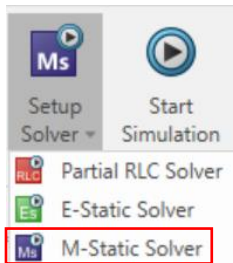
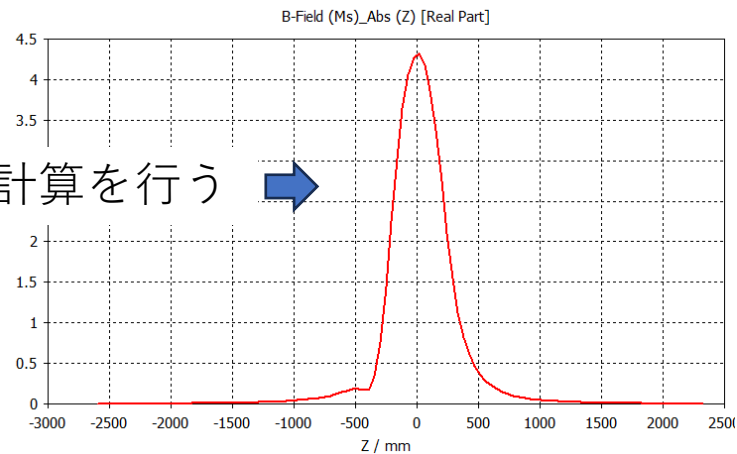
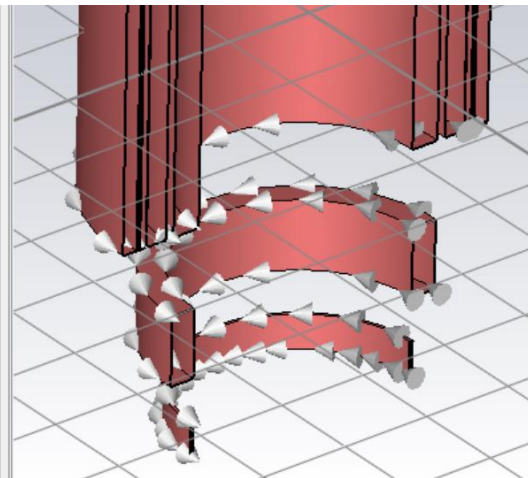
Geometric mean of application speeds vs. P100; Benchmark application: Amber [PME-Cellulose_NVE], Chroma [szsct21_24_i28], GROMACS [ADH Dodec], MILC [Apex Medium], NAMD [stmv_nve_cuda], PyTorch [BERT-Large Fine Tuner], Quantum Espresso [AUSURF112-jR]; Random Forest FP32 [make_blobs (160000 x 64 : 10)], TensorFlow [ResNet-50], VASP 6 [Si Huge] | GPU node with dual-socket CPUs with 4x NVIDIA P100, V100, or A100 GPUs.

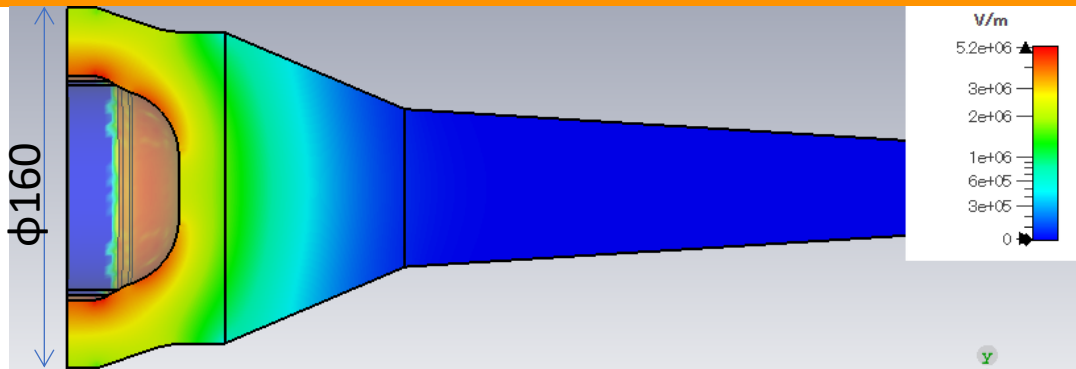
CSTを使った開発プロセスの流れ

磁場分布の計算→電子銃から粒子追跡シミュレーション→PICシミュレーション



コイルをモデリングして磁場の計算を行う





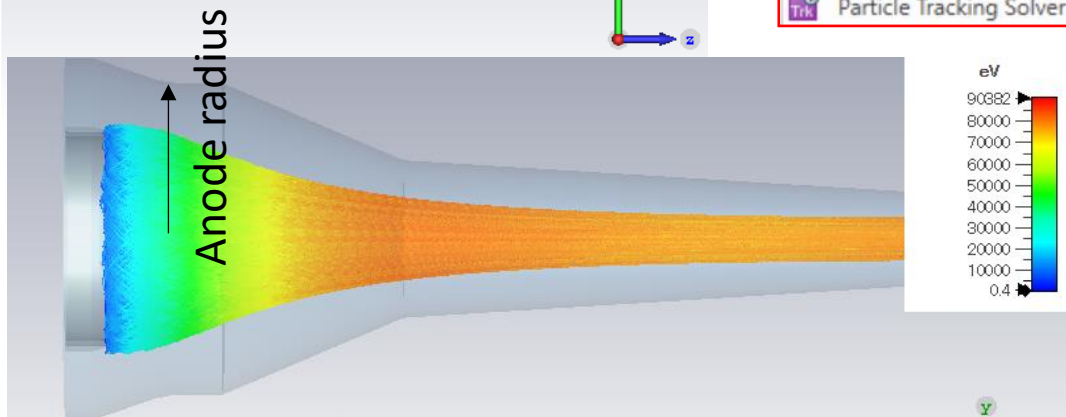
E-Field

Component	Abs
Cross section	A
Cutplane at X	0.000 mm
Maximum on Plane (Plot)	5.20275e+06 V/m
Maximum (Solver)	6.38269e+06 V/m

Trk Solver Setup

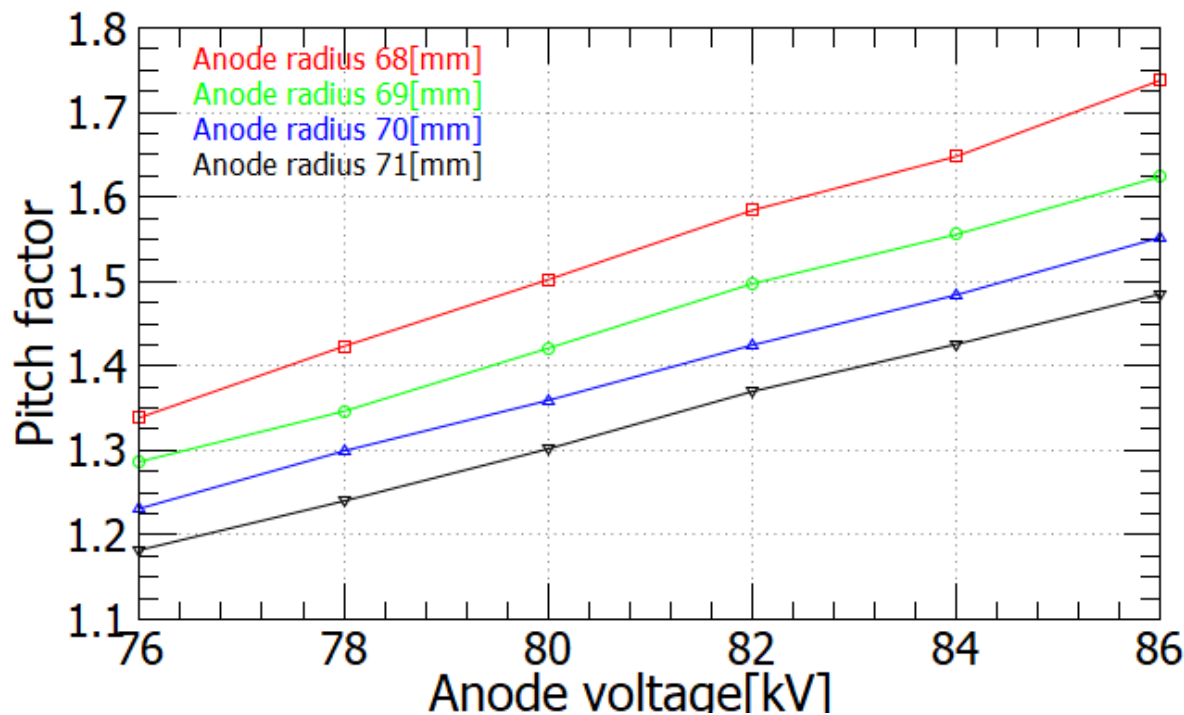
Start Simulation

- Eigenmode Solver
- E-Static Solver
- M-Static Solver
- PIC Solver
- Particle Tracking Solver**



Trajectories

Output	Energy
Sample	101/101
Time	47.7759 ns
Maximum (Solver)	90382.5 eV
Minimum (Solver)	0.4 eV



アノード形状を変化させてボディ電圧を変化させたときのピッチファクター

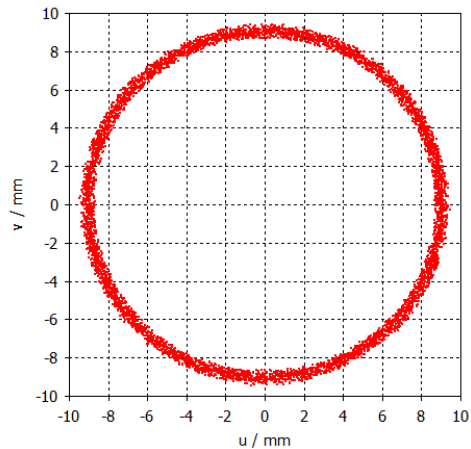


Trk Setup Solver Start Simulation
E Eigenmode Solver
Es E-Static Solver
Ms M-Static Solver
Pic PIC Solver
Trk Particle Tracking Solver

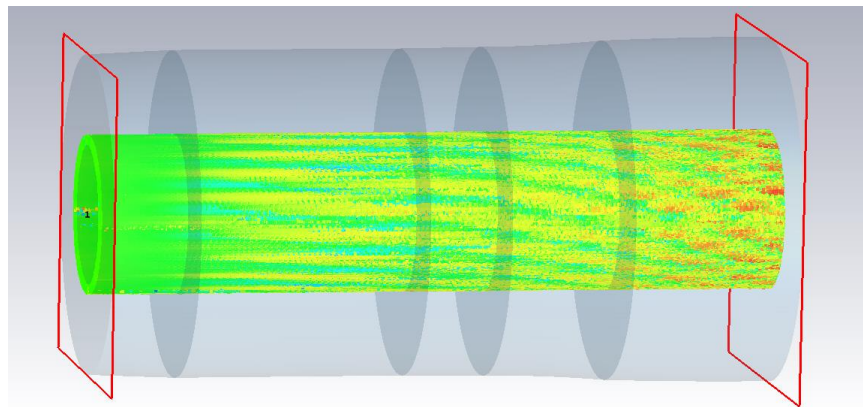
Particle 2D Monitor 1
 Output Energy
 Maximum (Solver) 84643.1 eV
 Minimum (Solver) 82194.4 eV

Pic Setup Solver Start Simulation
Es E-Static Solver
Ms M-Static Solver
Pic PIC Solver

Interface Positions (5698), $u_vec = (1.0, 0.0, 0.0)$ and $v_vec = (0.0, 1.0, 0.0)$



particle interface 1



ベンチマーク試験結果

140GHzジャイロトロン

Table 1. Design parameters and goals of 140 GHz Gyrotron [11].

Output power	~ 500 kW
Frequency	~ 140 GHz
Diffractive Q factor (Q_d)	~ 1100
Voltage	80–85 kV
Current	20–30 A
Anode voltage	24.5 kV
Pitch factor	1.1–1.7
Magnetic field	5.52–5.56 T
Beam thickness	~ 0.53 mm ($4 \cdot r_L$)
Compression ratio	~ 29.5
Emitter radius	~ 19.5 mm
Guiding centre radius	~ 3.65 mm
Emitter slant angle	28°
Cathode – anode distance	~ 22 mm
Magnetic field at cathode	0.1875 T
Cathode loading	< 5.8 A/cm ²
Velocity spread	< 4%

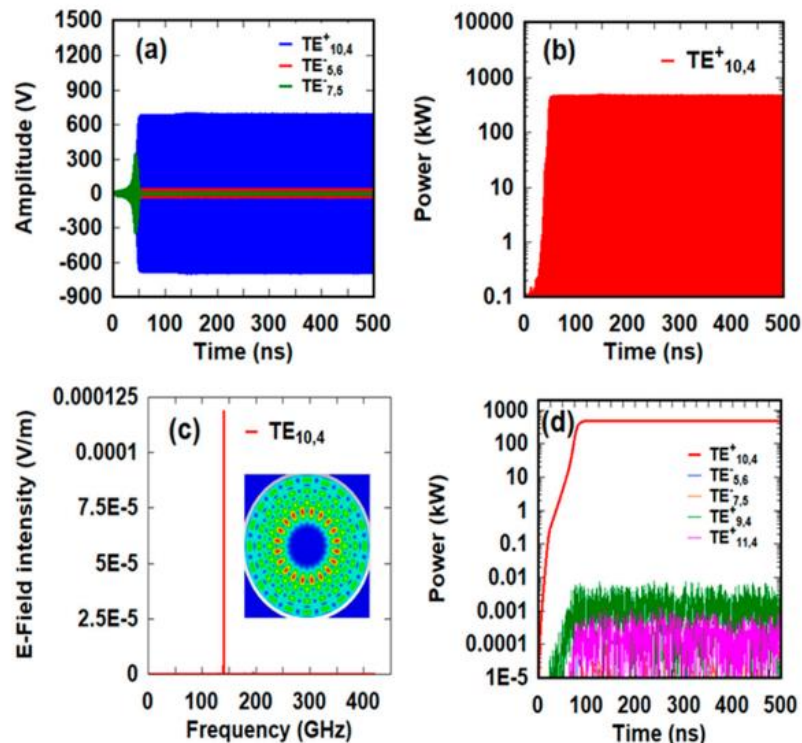
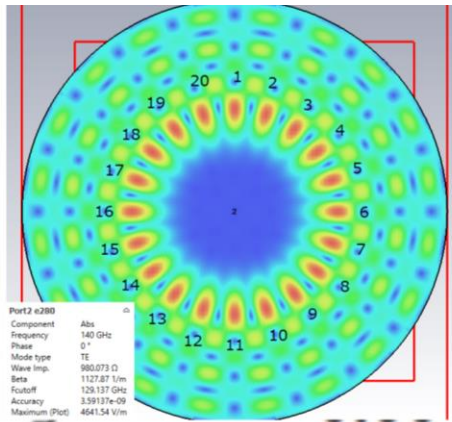
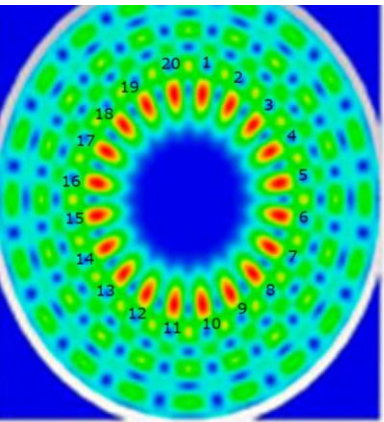
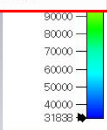
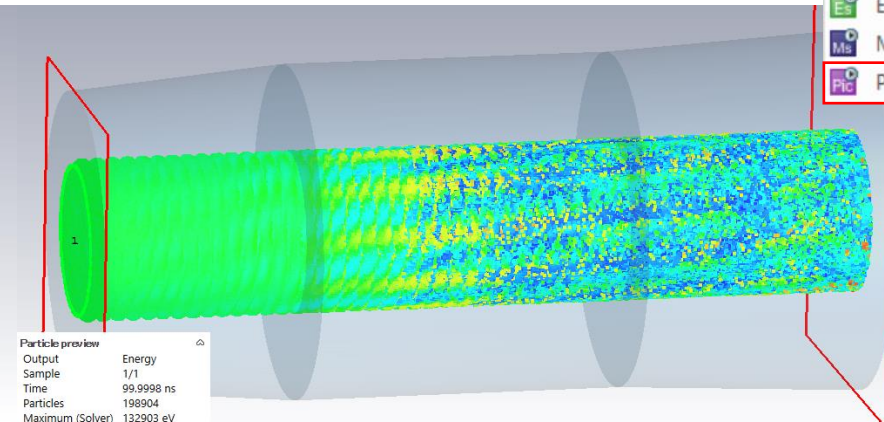


Figure 6. (a) Amplitude of port signals, (b) RF power developed in $TE_{10,4}$ mode, (c) frequency spectrum of the port signal of $TE_{10,4}$ mode, and (d) theoretically calculated power.



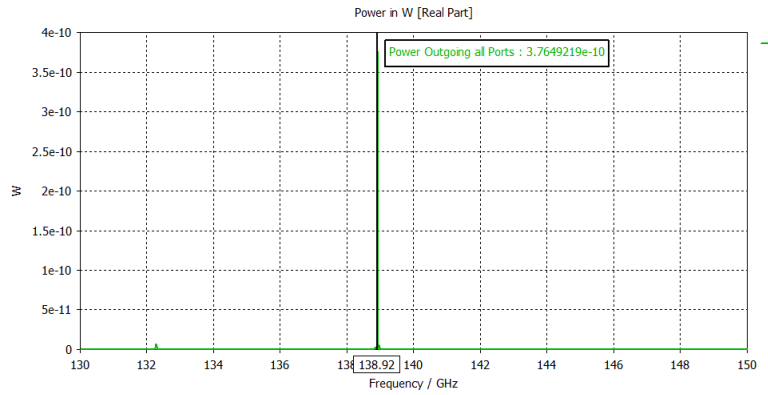
Port 12 @390

Component	Abs
Frequency	140 GHz
Phase	0°
Mode type	TE
Wave Imp.	980.073 Ω
Beta	1127.87 1/m
Fcutoff	128.137 GHz
Accuracy	3.39137e-09
Maximum (Plot)	4641.34 V/m

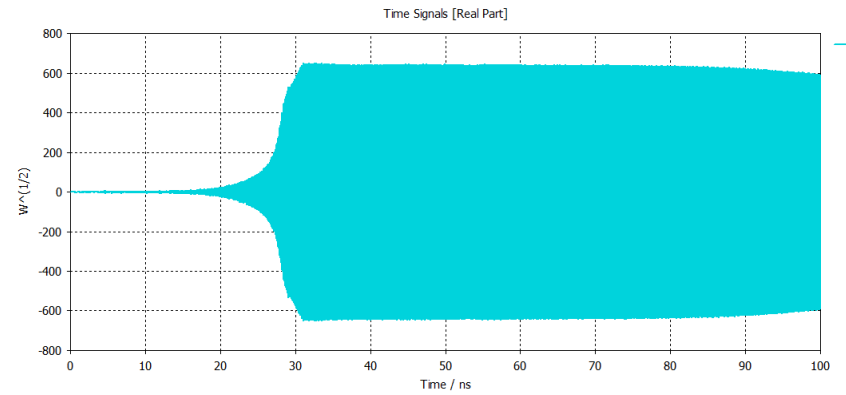


Particle preview

Energy	
Output	1/1
Sample	1/1
Time	99.9998 ns
Particles	198904
Maximum (Solver)	132903 eV
Minimum (Solver)	31838.3 eV



— Power Outgoing all Ports



- メッシュ数：0.9M（90万メッシュ）
- 解析時間：100ns
- 解析モード：TE10,4

マシンスペック	シミュレーション時間	マシン価格
CUP4core	8時間12分	20万円
CPU16core	2時間25分	45万円
CPU16core +RTX6000Ada	56分	220万円
CPU18core + GPU(A100)	33分	620万円



- ジャイロトロン開発にCSTは有用であり、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た。
- 計算機を増やすことでパラメーターサーベイの時間を短縮し、最適パラメータを探すことが可能である。
- 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。
- シミュレーション結果から実機の製作を行い比較検討を行っていく。
- ジャイロトロンの24時間運転を計画しているので、耐久性、信頼性の高いジャイロトロンの製作を行っていく。