

# FIX-FRCプラズマへのRMF印加による電流駆動実験

## Experiment on Application of RMF Current Drive to FIX-FRC Plasma

阪大・超高温 北野 勝久、東小菌 毅充、岡田 成文、後藤 誠一

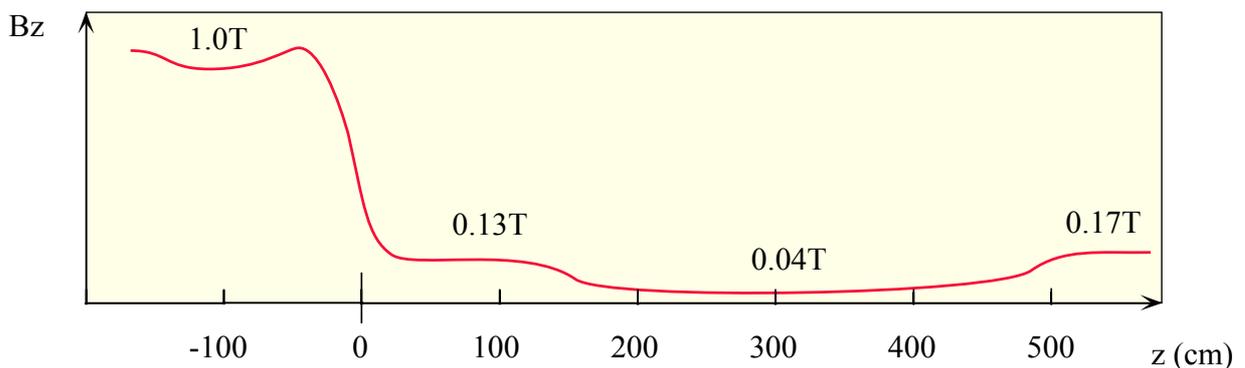
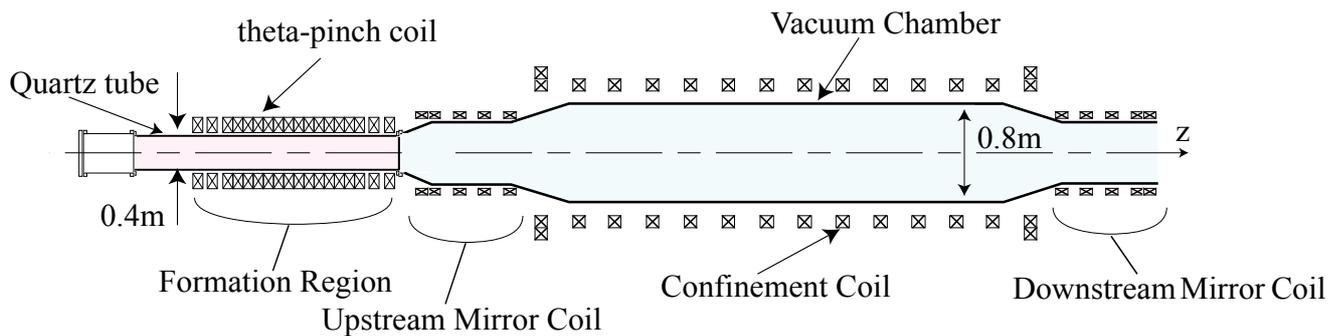
Katsuhisa KITANO, Takamitsu HIGASHIKOZONO, Shigefumi OKADA, Seiichi GOTO

Osaka Univ. Plasma Physics Laboratory

プラズマ核融合学会年会

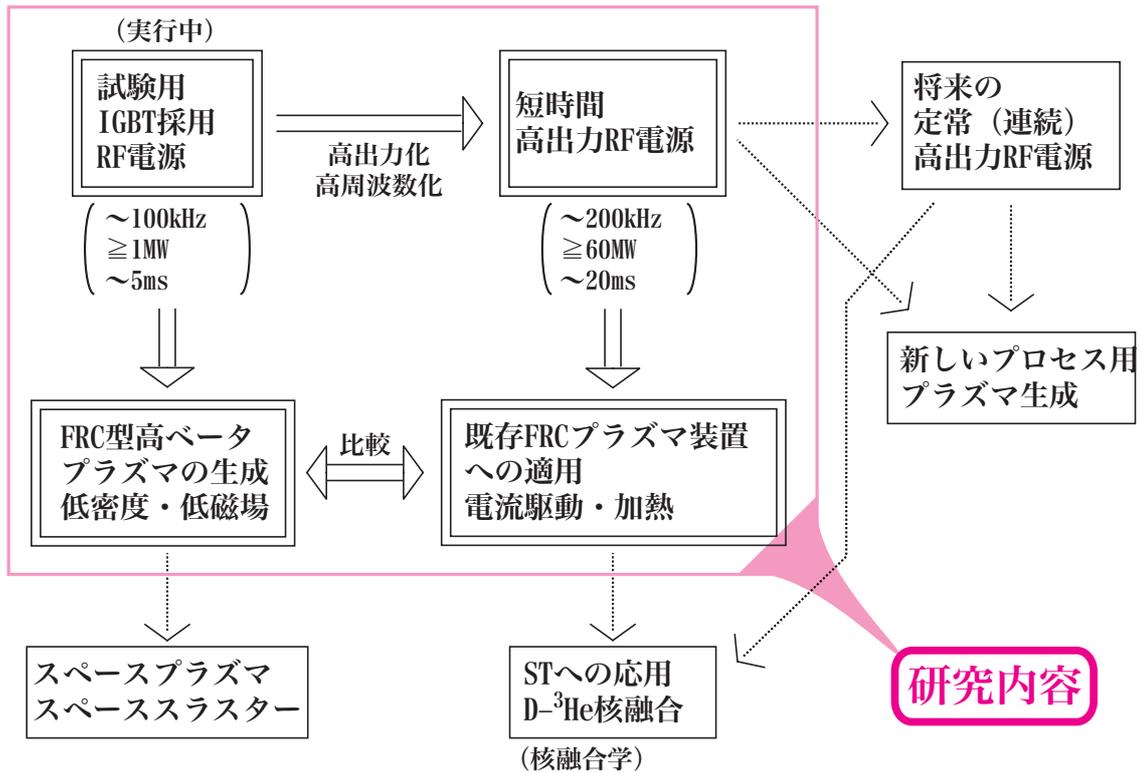
2002. 11. 29

### FIX(FRC Injection eXperiment)装置



# 電力用半導体 (IGBT) 制御電源の活用

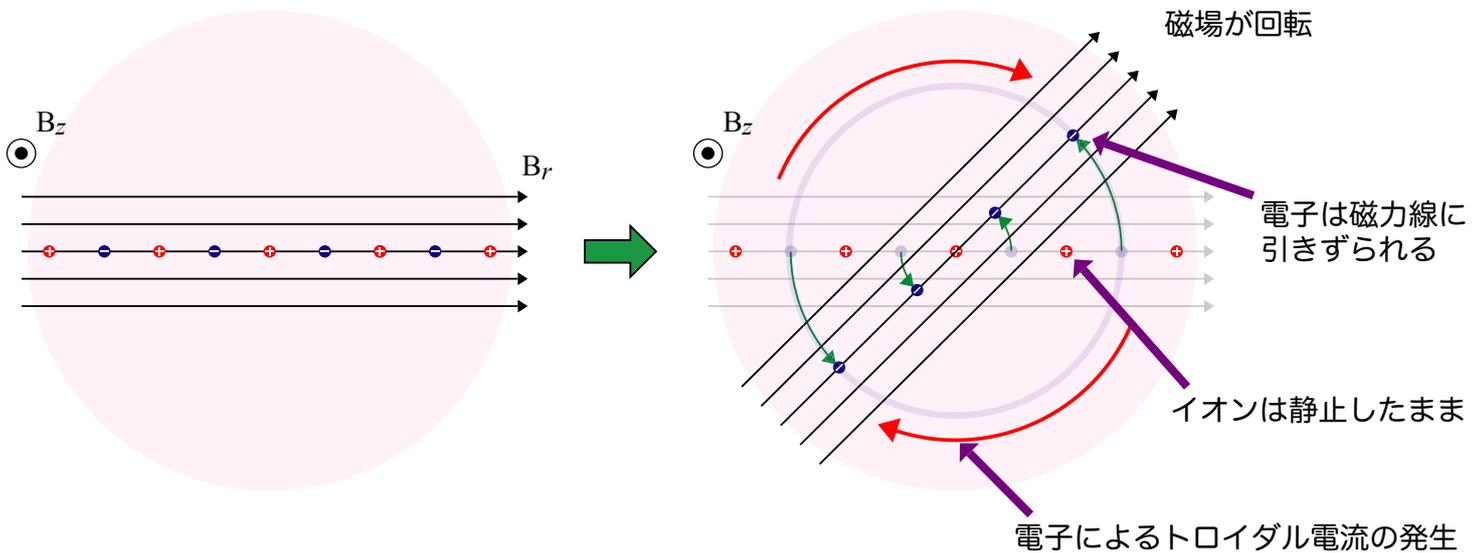
プラズマ実験は電源の種類と機能で決まる



# RMF (Rotating Magnetic Field) によるプラズマ電流の駆動

新しい電流駆動方法の開発

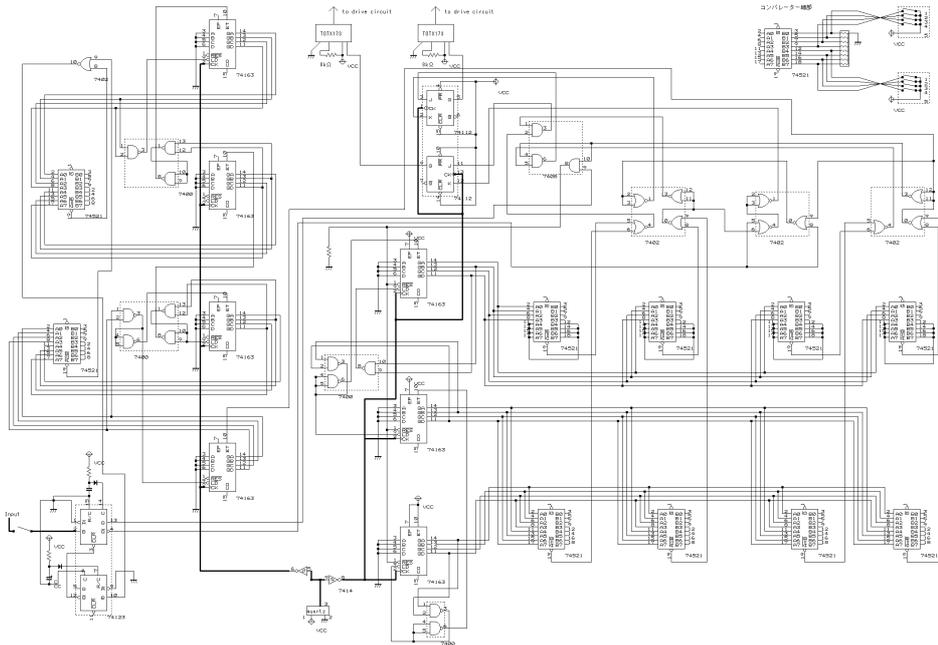
新しい電流駆動機構とは：磁化プラズマでは、イオンに比べ、電子の方がより強く磁化していることを利用する。即ち、電流を駆動したい方向に垂直な磁場を駆動の反方向に動かすことで、電子は随伴し、イオンはスリップすることをねらう。



z方向磁場によるプラズマ保持系では、 $\theta$ 方向の回転磁場が必要である

# タイミング回路

フルブリッジ回路を駆動するために、2系統のon, off時刻とパルス数をロータリーエンコーダで設定し、光出力する回路が必要

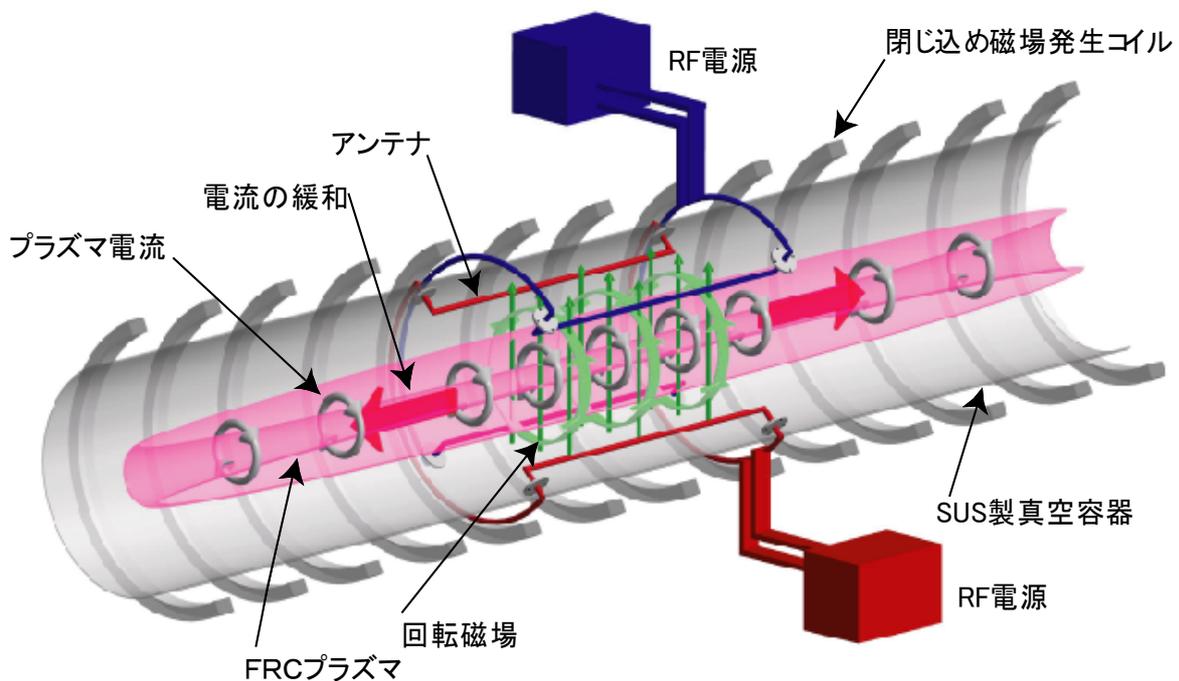


トスリンク (東芝製) による光出力  
74TTL LogicのACTシリーズを用いて高速化  
ベースクロックは50MHzで動作可能

# FIX-FRCプラズマへのRMF電流駆動の適用

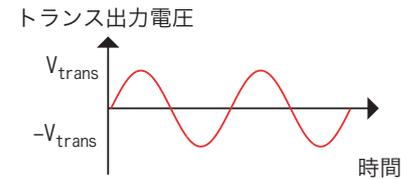
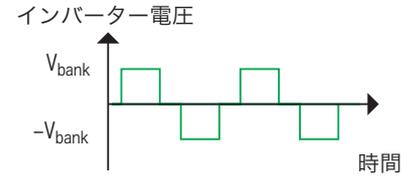
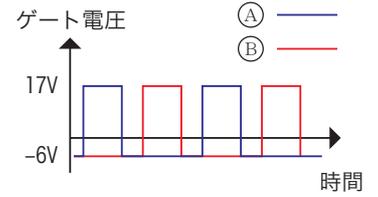
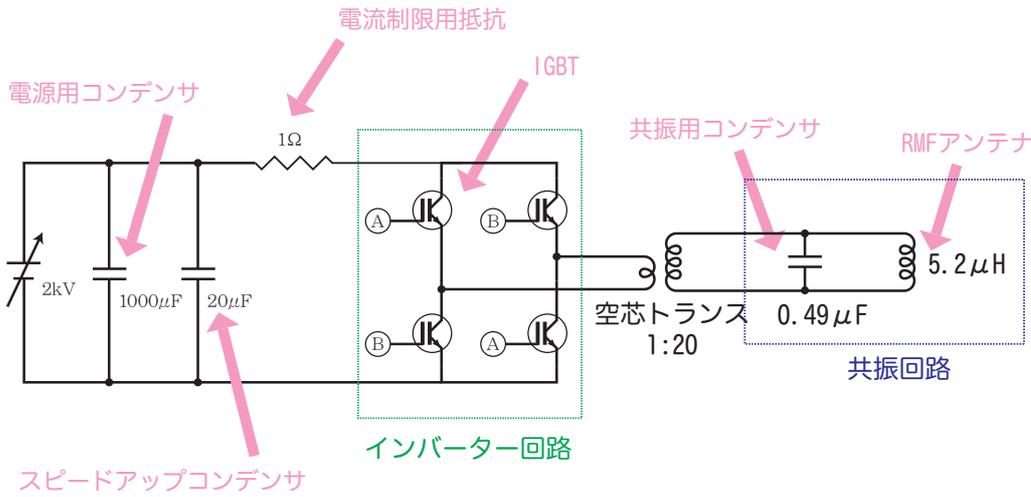
フラックスコンサーバー内で印加するメリットを生かす

米国ワシントン大学で類似の研究を行いつつある。我国では初めてであるとともに、局所的に回転磁場を印加したときの電流分布の空間緩和過程と平衡との関係に関する研究は国際的にも最初の仕事である。回転磁場の侵入効果 (異常抵抗)、電子とイオンの流体速度差、パワー注入効果 (加熱) と電流駆動の効率等に関する実験研究を行う。



# 大電力IGBTを用いたFull-bridge Inverter回路

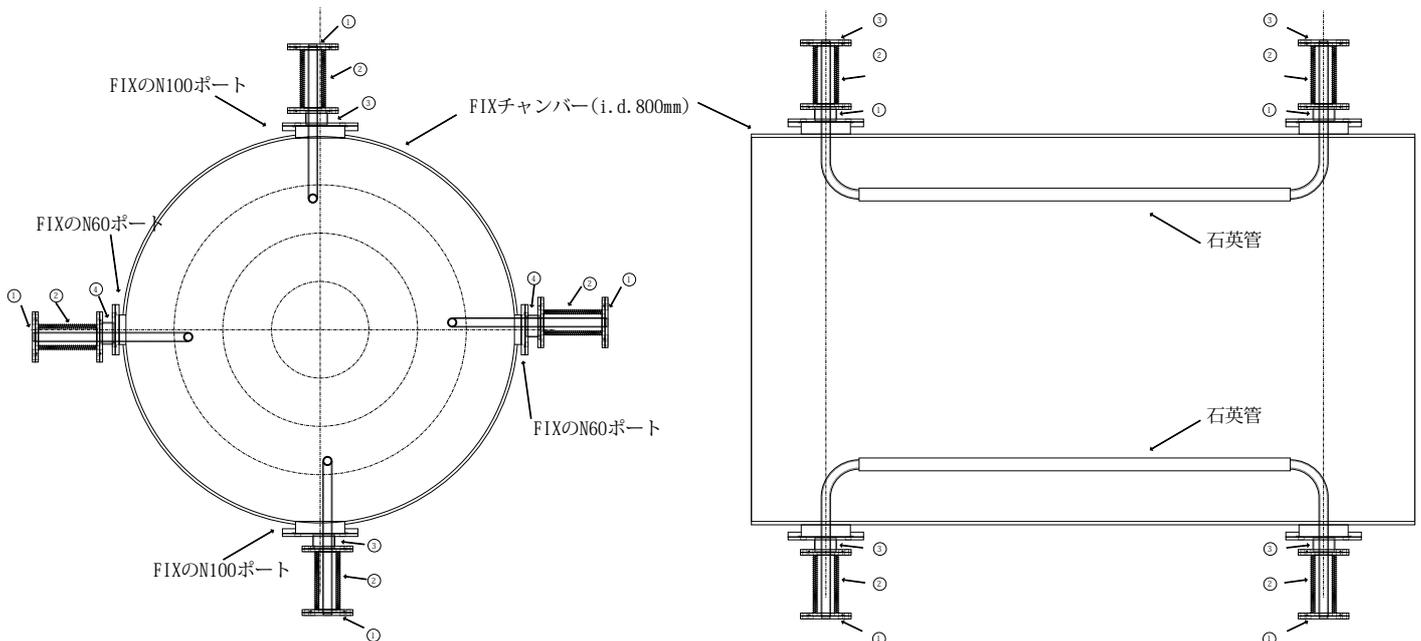
低インピーダンス駆動が可能なIGBTの特徴を生かし、トランスによって昇圧してから共振回路を駆動



100kHzと比較的高周波であるために、個々の部品には周波数特性が必要とされる。特に共振用コンデンサの誘電損失が共振回路のQを左右するために素子の選択は非常に重要

## RMFアンテナ

大電流が必要とされるのでRMFアンテナとコンデンサでLC共振回路を構成し、外部からエネルギーを供給する  
真空容器内部に設置可能なアンテナの設計



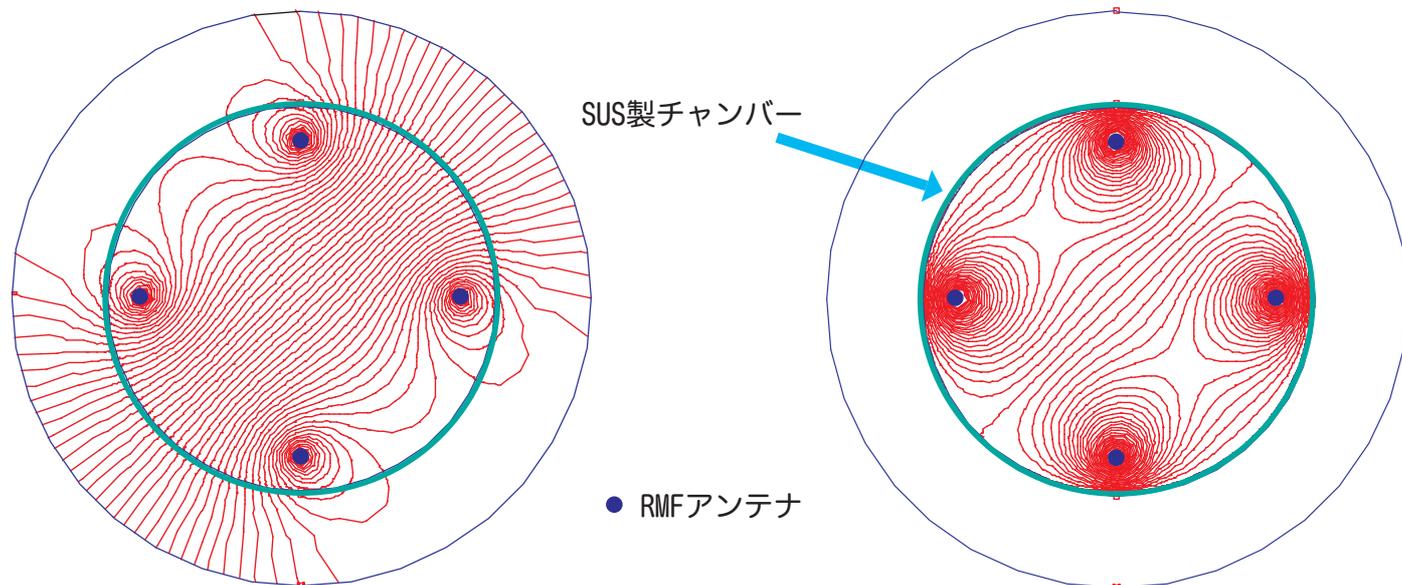
大気圧のパイプの内部に高電圧ケーブル(KIV-38)を通した構造  
径方向の位置は可変 予備テストによりコイル1組で5.2µH程度

# SUS製真空容器内におけるRMF形状

## 有限要素法による磁力線解析

磁力線がしみ出す場合

磁力線がしみ出さない場合

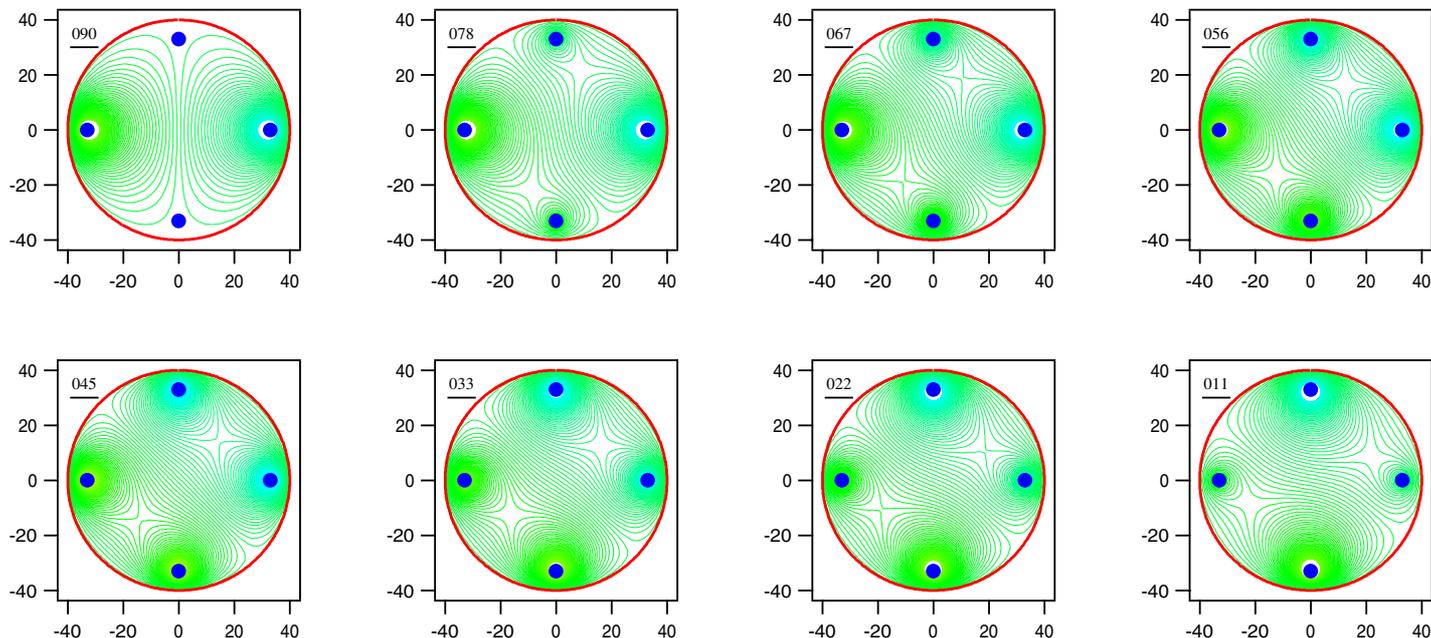


真空磁場では回転磁界の磁力線はそれほど直線ではない  
中央部に存在するFRCプラズマに対して印加するときはそれほど問題にならないのでは？

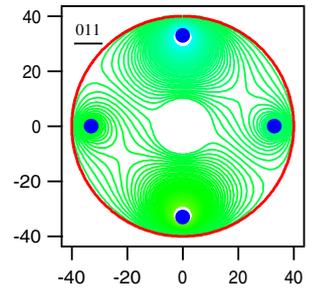
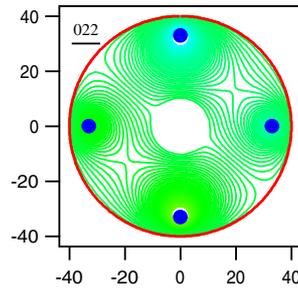
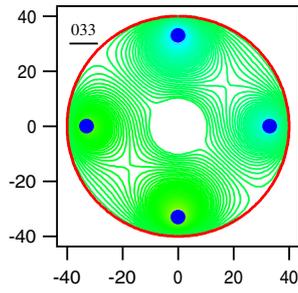
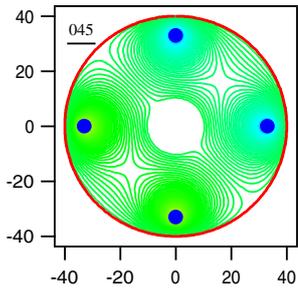
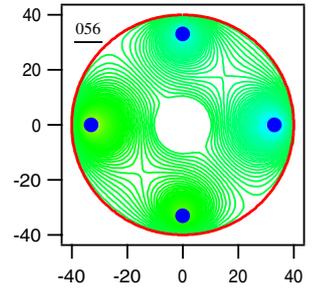
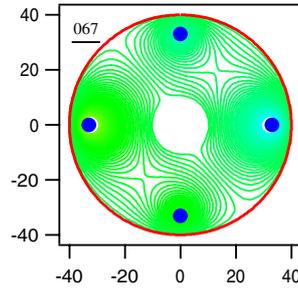
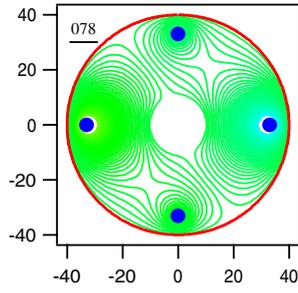
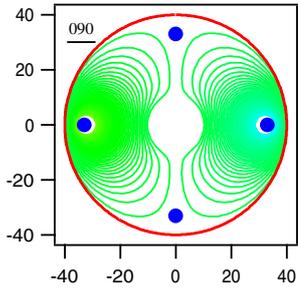
## 真空磁場の計算

磁束保存容器内でアンテナが形成する磁場形状を有限要素法により計算を行った

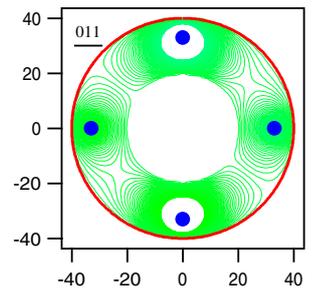
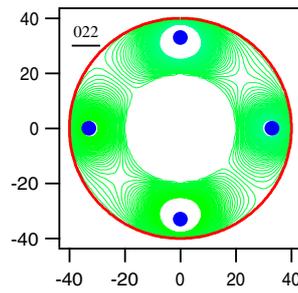
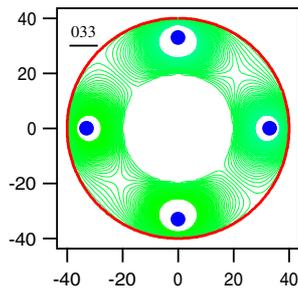
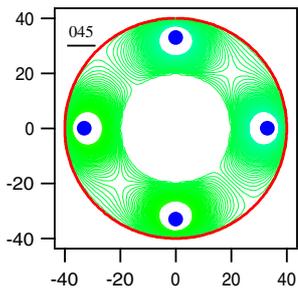
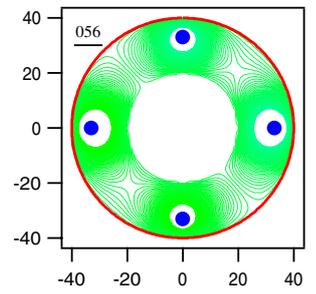
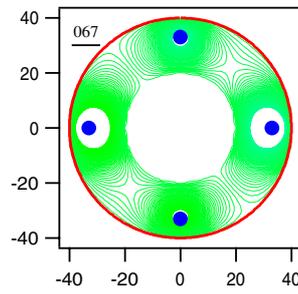
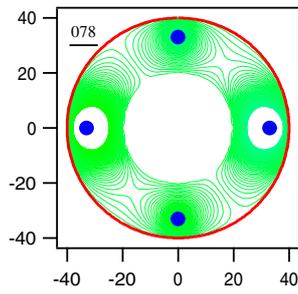
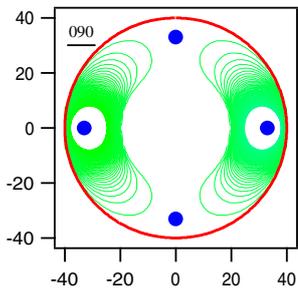
プラズマが存在しない場合



セパトリックス半径が10cmのところに銅管を置いた場合



セパトリックス半径が20cmのところに銅板を置いた場合



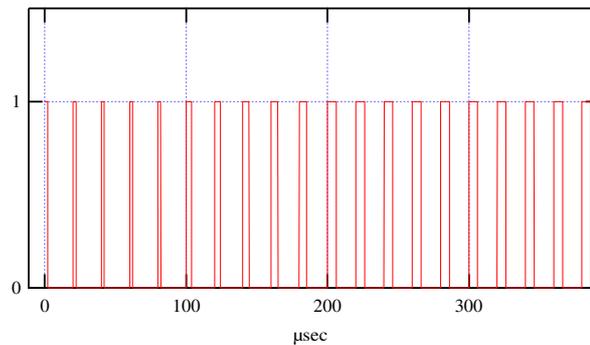
## ゲーティングの制御

ゲート駆動波形はコンピュータ上で自由に作ったデータを用いることが可能である。そのデータはデジタルアウトボードから出力され、光ファイバーを介してゲート駆動回路に伝送される。

インバーター駆動開始は突入電流が流れ、サージ電圧も大きい



徐々にデューティ比を上げるようにする

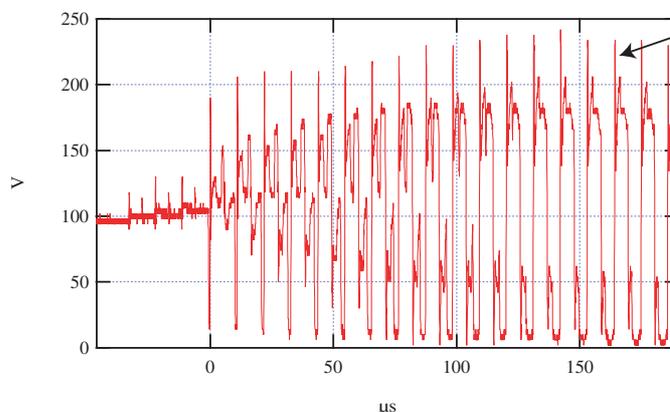


共振周波数、発振パルス数、デューティ比などを動的に変更できるアプリケーションの開発を行った。これにより、IGBTの安全マージンを有効に使ってオペレーションを行うことが可能となった。

## サージ電圧の抑制

高速スイッチングが可能なIGBTを用いたインバーター回路の場合、ターンオフ時に大きな電流変化が生じ、電源側のインダクタンスによってサージ電圧が発生する。一般的に半導体素子は過電圧に弱く、サージ電圧を抑制する必要がある。

IGBT両端の電圧



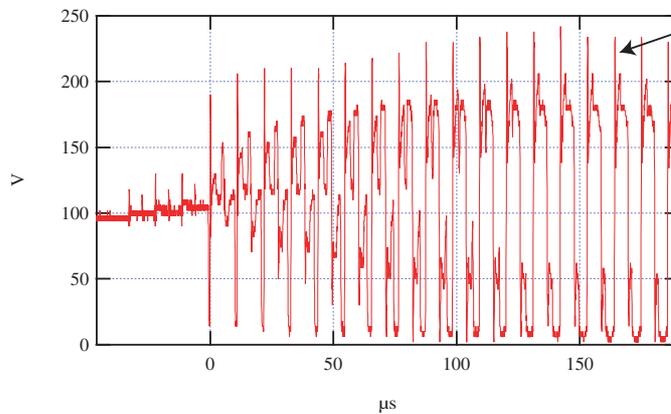
ターンオフ時に大きなサージ電圧が生じているのがわかる

充電型、非充電型のスナバー回路を組み合わせ  
ゲート抵抗を大きくして非飽和領域で運転  
パソコン挿入による電源インピーダンスの低減

# サージ電圧の抑制

高速スイッチングが可能なIGBTを用いたインバーター回路の場合、ターンオフ時に大きな電流変化が生じ、電源側のインダクタンスによってサージ電圧が発生する。一般的に半導体素子は過電圧に弱く、サージ電圧を抑制する必要がある。

IGBT両端の電圧

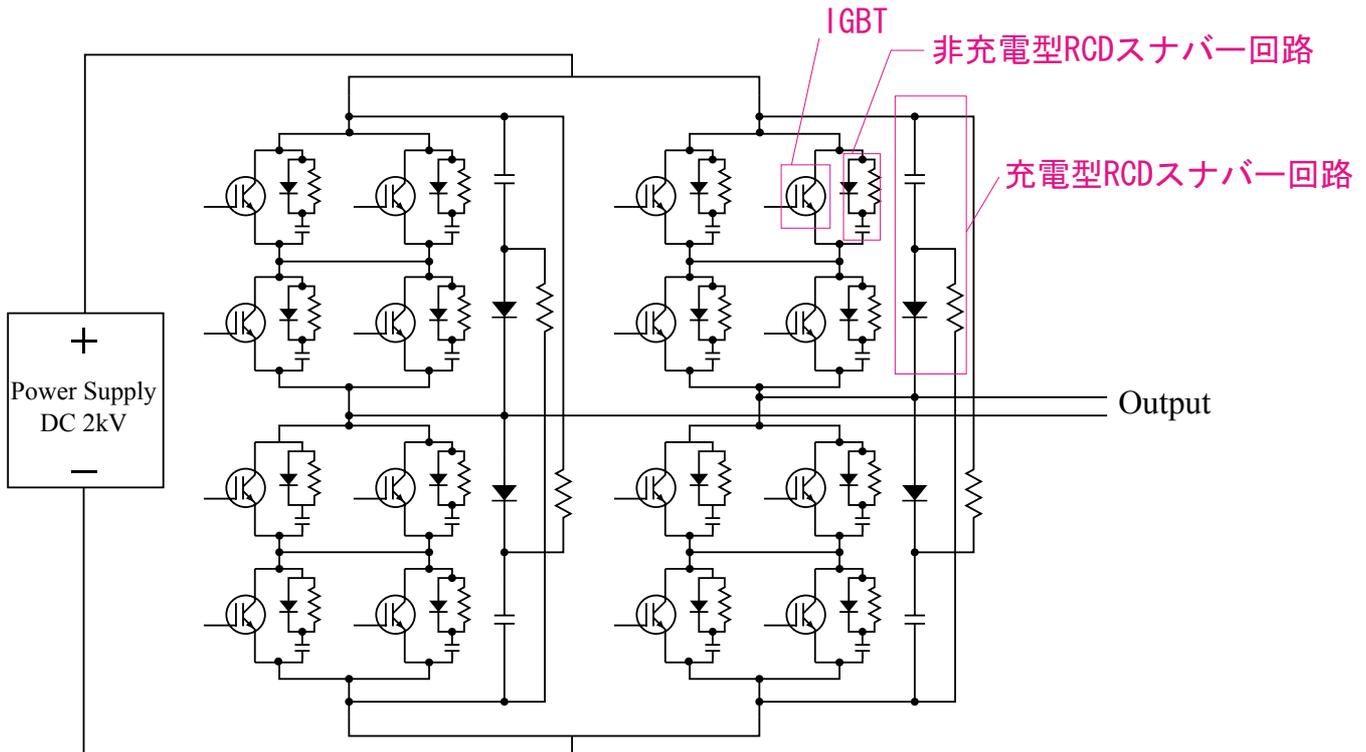


ターンオフ時に大きなサージ電圧が生じているのがわかる

充電型、非充電型のスナバー回路を組み合わせ  
ゲート抵抗を大きくして非飽和領域で運転  
パソコン挿入による電源インピーダンスの低減

# 多重接続のフルブリッジ・インバーター回路

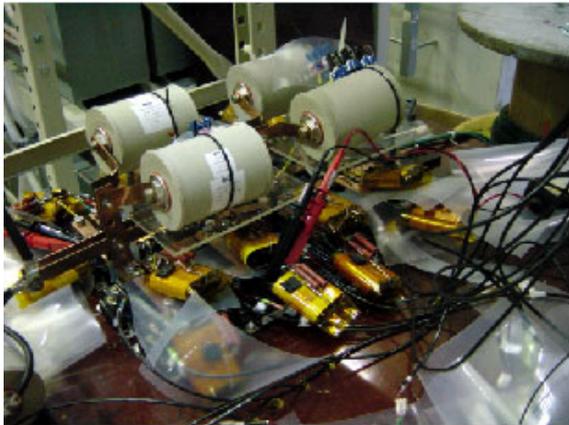
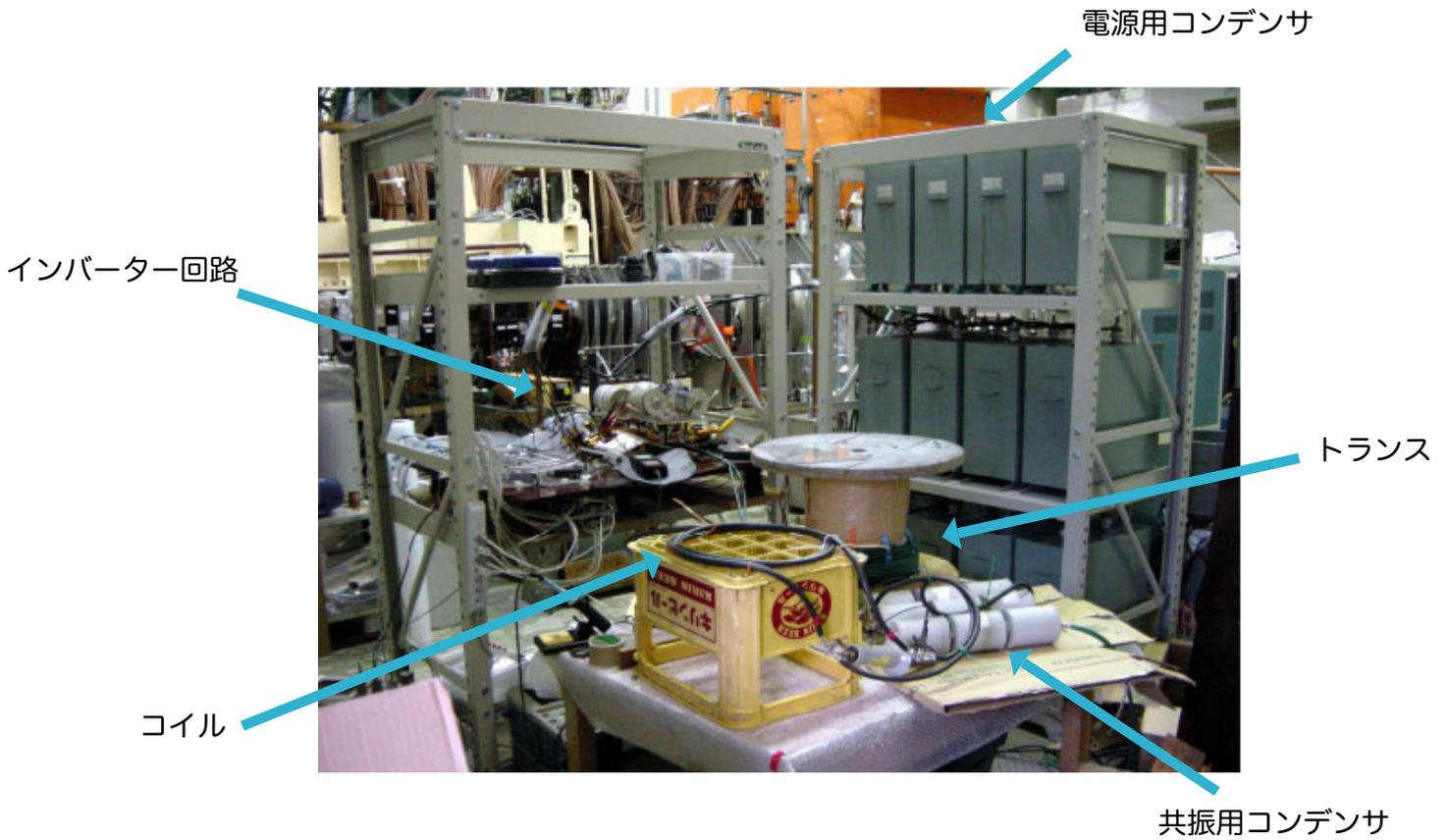
フルブリッジ型のインバーター回路のそれぞれのアームにIGBTを2直2並列接続



それぞれのIGBTに非充電型のスナバー回路を、それぞれのアームに充電型のスナバー回路を付置する

# 装置写真

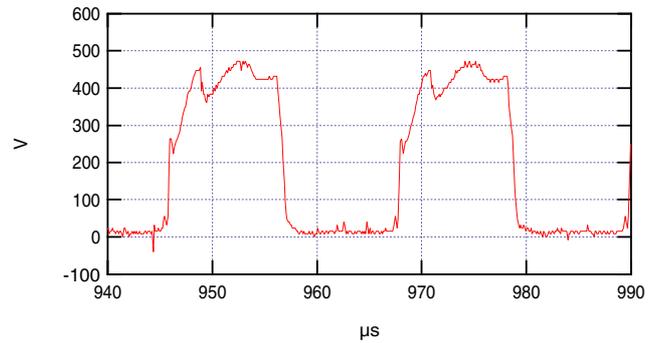
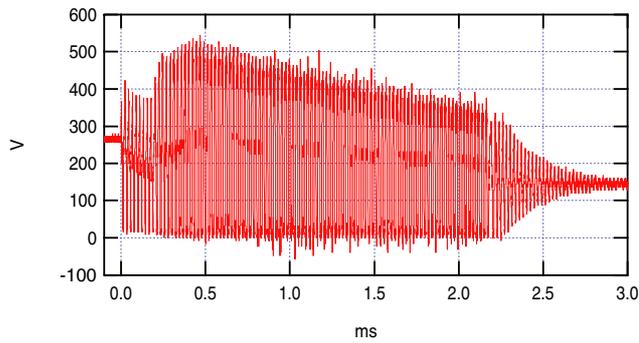
共振回路、インバーター回路、コンデンサーバンクから構成される



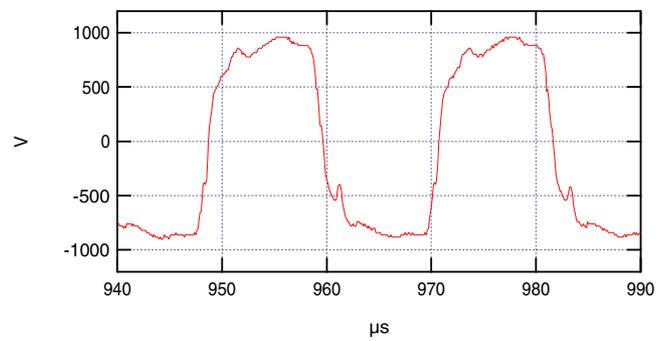
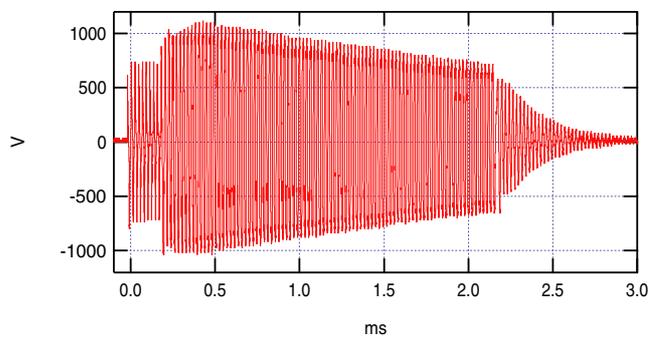
# 放電波形 (1kV)

充電電圧1kVで放電を行い、各地点での電圧、電流を差動プローブ、カレントトランスにて測定した

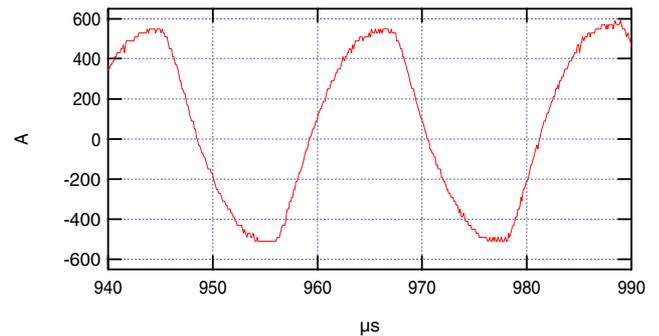
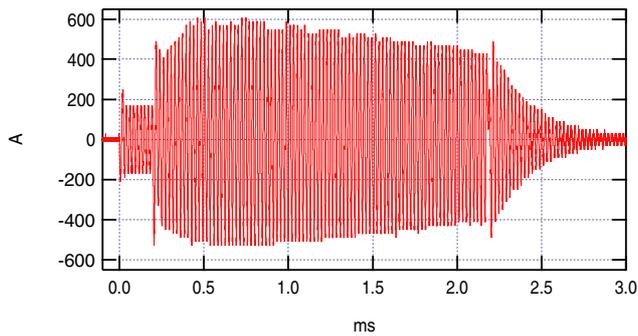
## 1つのIGBTにかかる電圧



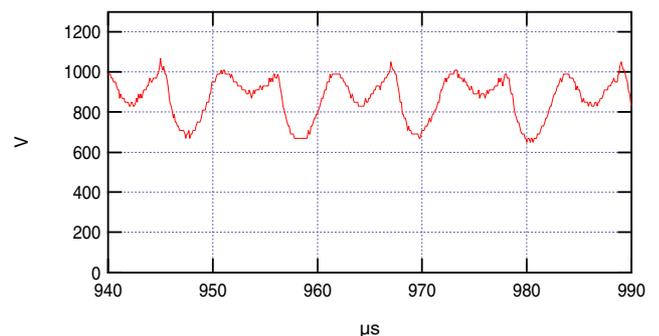
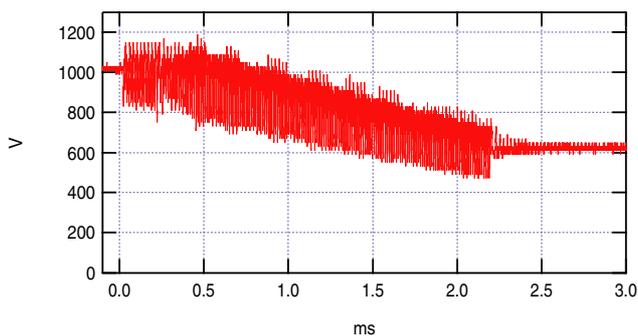
## インバーター回路の出力電圧



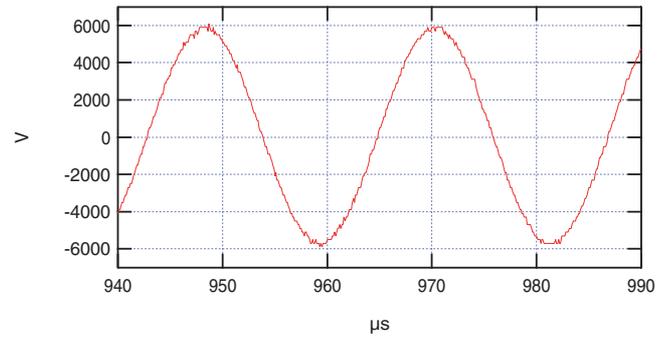
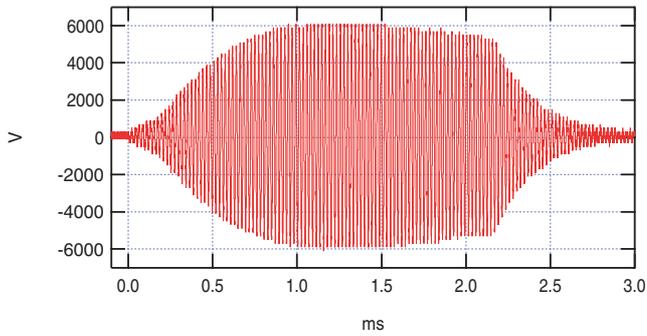
## インバーター回路の出力電流



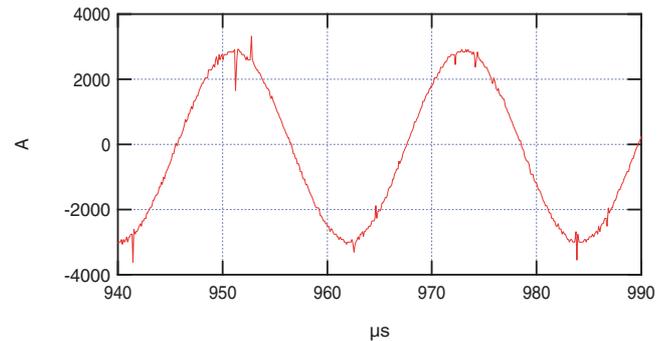
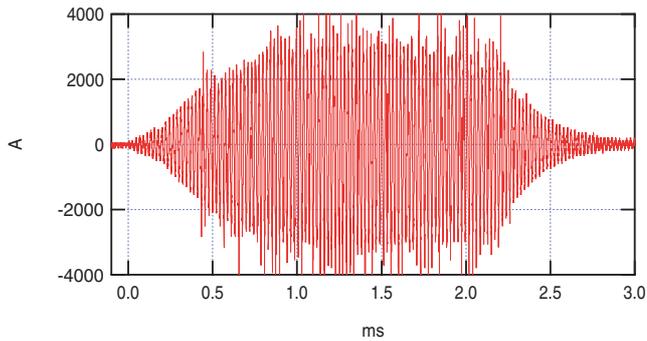
## コンデンサバンクの電圧



## LC共振回路にかかる電圧



## LC共振回路に流れる電流



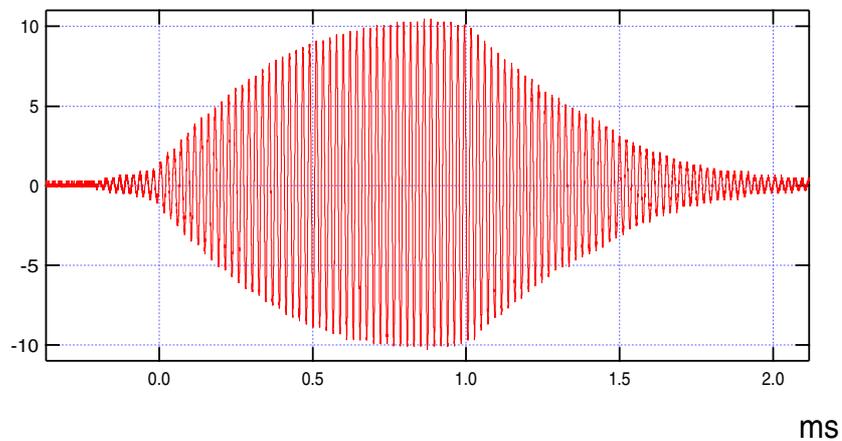
電圧ゲイン  $6\text{kV}/1\text{kV} = 6\text{倍}$

電流ゲイン  $3\text{kA}/0.5\text{kA} = 6\text{倍}$

## 充電電圧2kVでの共振部での電圧波形

IGBTに印加される電圧は1kVであり、サージ電圧を考えるとほぼ定格の1.2kVに近い

Voltage (kV)



0.7msかけて±10kVの電圧が共振回路にて得られた 電流は1kVでの放電結果から±5kA流れていることが期待される

## まとめ

FIX-FRCプラズマへのRMF電流駆動を提案した

真空容器内に設置可能なアンテナの製作を行った

電源としてIGBTを用いたインバーター回路とLCタンク回路を用いることを提案し、電源を製作した

フルブリッジ型のインバーター回路のそれぞれのアームにIGBTを2直2並列で配置することにより、必要とされる5kAの電流をダミーコイルに流すことが可能となった

今年度内にはFRCプラズマへの適用を行う予定である