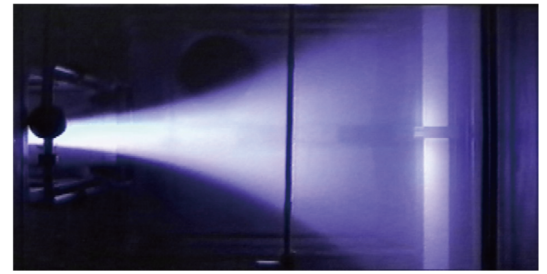


GAMMA10 における周波数逡倍型干渉計の開発

Development of the Frequency Multiplied Interferometer System in Gamma10

嶋 頼子

筑波大学研究推進部研究企画課（プラズマ研究センター）



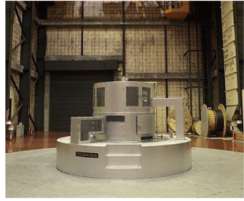
プラズマ研究センターでは磁場によるプラズマ閉じ込め装置 GAMMA10 により、プラズマ閉じ込めの実験を行っている。プラズマの電子密度は、プラズマの状態を知る上で大変重要な値であり、常に安定した計測が求められている。プラズマの電子密度を計測する方法として、マイクロ波を利用した干渉計があり、GAMMA10 においては主に 70GHz の電磁波をプローブ波とする干渉計を用いている。しかしながら、高周波回路である為に測定が不安定になることが多く、システムの改良が常に行われてきた。本報告では、周波数逡倍器を用いた干渉計の開発について報告する。

プラズマ研究センター

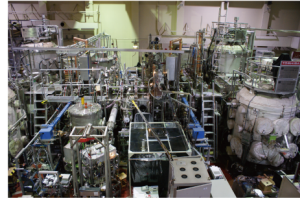
将来のプラズマ核融合実用に向けた研究を推進



800MJの立型電動発電機でミラー磁場を発生させ、装置両端でプラズマ閉じ込め電位を形成し、中央部にプラズマを閉じ込めている



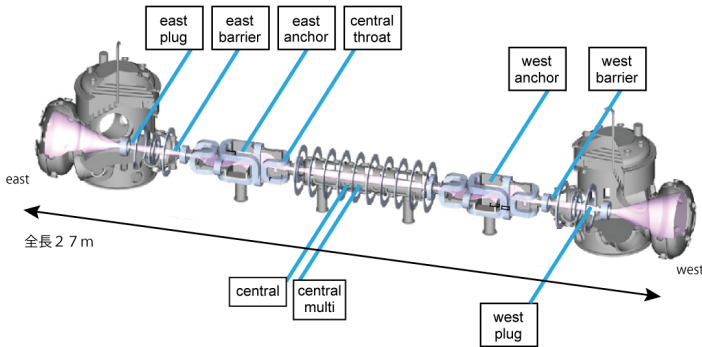
800MJの立型電動発電機



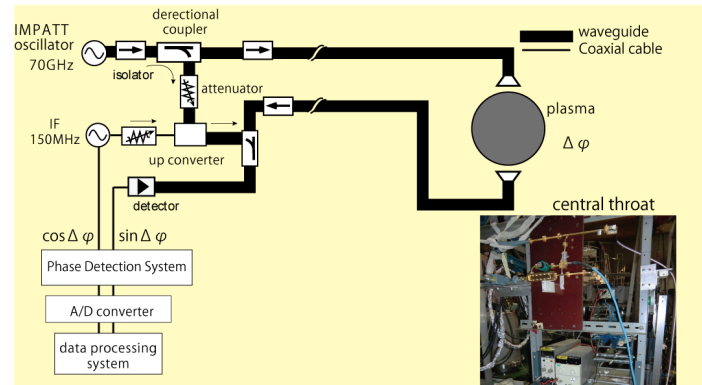
タンデム・ミラー実験装置GAMMA10

GAMMA10のマイクロ波干渉計

全長 27 メートルの装置の径方向 9 箇所に干渉計を設置



インパット発振器とアップコンバータを用いた方式が主流

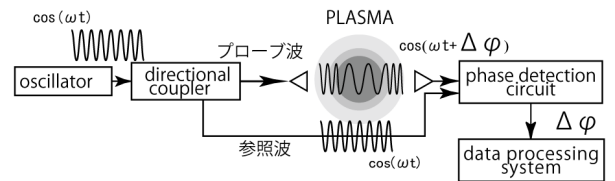


問題点

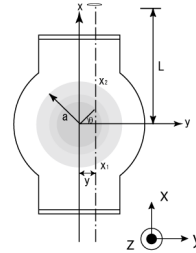
- 70GHz の発振器の入手が困難
- 周波数が不安定 → 計測データの信頼性が低い
- 回路の構成が導波管中心 → 調整が難しい

マイクロ波干渉計

マイクロ波をプラズマ内部に透過させてその位相の変化を計測し、プラズマの電子密度を測定する



プラズマ中を電磁波が伝搬すると位相が変化する



$$\phi(y) \cong \frac{k_0}{2n_c} \int_{x_1}^{x_2} n_c(r) dx$$

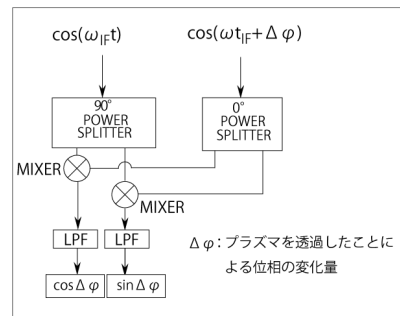
線密度

n_c : カットオフ密度
 $n_c = m_e \epsilon_0 \omega^2 / e^2$
 $\omega / 2\pi$: 入射波の周波数
 k_0 : 真空中の波数

位相の変化から線密度（電子密度の線積分）を求めることができる

Phase Detection System

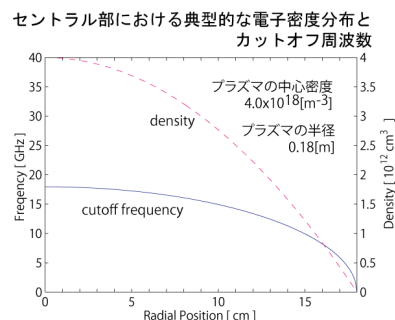
位相差を検出するために位相検出回路を用いる



位相検出回路では、 $\cos \Delta \phi$ 、 $\sin \Delta \phi$ の 2 つの実験データを得ることができる。この 2 つの信号の \arctan を計算機で計算することによりプラズマを透過したことによる位相の変化量を導出することができる。

入射波の周波数

最大密度に対応するカットオフ周波数よりも低い周波数の電磁波は、プラズマ中を伝搬できず反射してしまう



カットオフ周波数よりも十分高い周波数を選ぶ必要がある

プラズマ研究センターでは
 ・ 69.85GHz
 ・ 70GHz
 の2種類を使用

通倍型マイクロ波干渉計

発振源_PLDRO 17.5 GHz

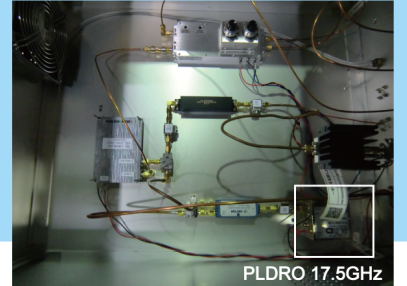
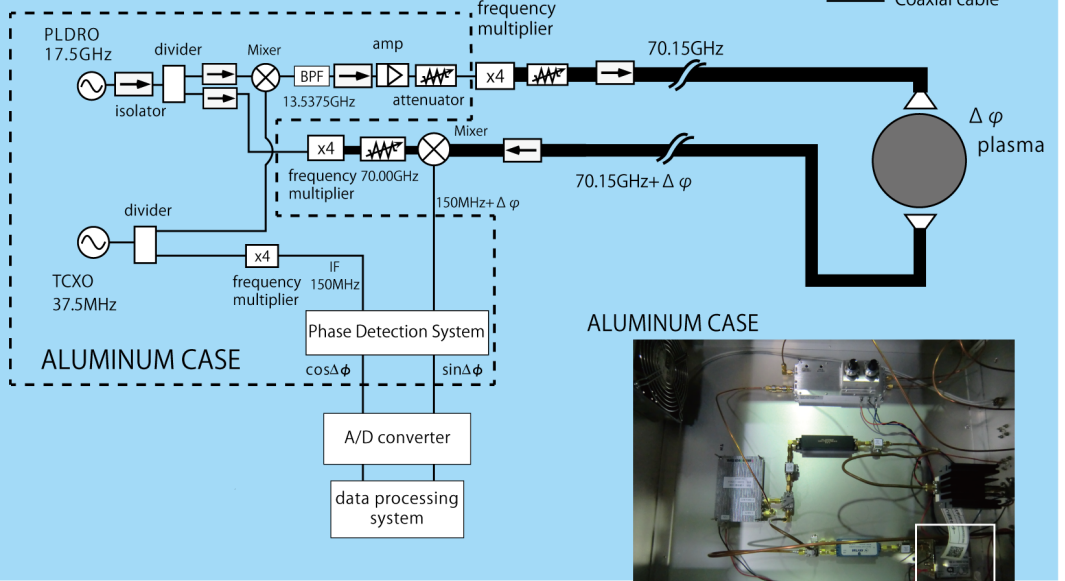
Phase Locked Dielectric Resonator Oscillator
→周波数安定良

IF 信号源_TCXO 37.5MHz

Temperature-Compensated Crystal Oscillator
→通倍後 150MHz
→従来のシステムのパーツが使用できる

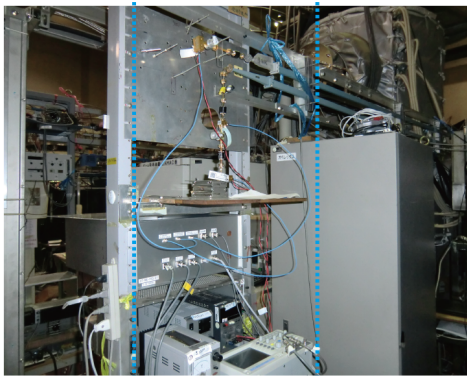
- 入手しにくかった 70GHz の発振器の代わりとして、PLDRO 17.5 GHz を 4 通倍してプラズマに入射する
- IF 信号を 150MHz になるように設計し、現在のシステムとの入れ替えをしやすいとする
- 回路の部品が多くなるが、18GHz 以下のパーツが主であり、取り扱いが簡単で同軸ケーブルでの接続により調整も簡単になる

通倍型干渉計



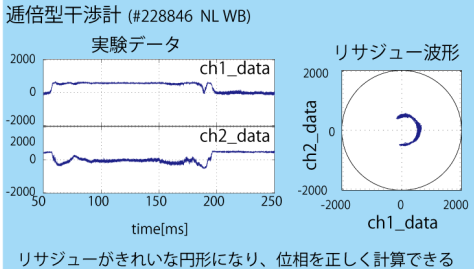
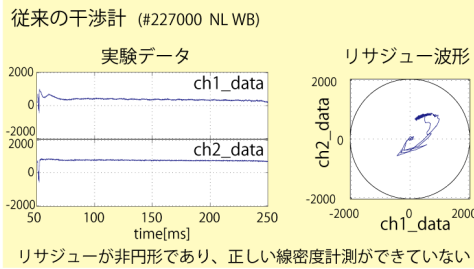
実験結果

west barrier 部のアップコンバーター方式の干渉計を通倍型に変更



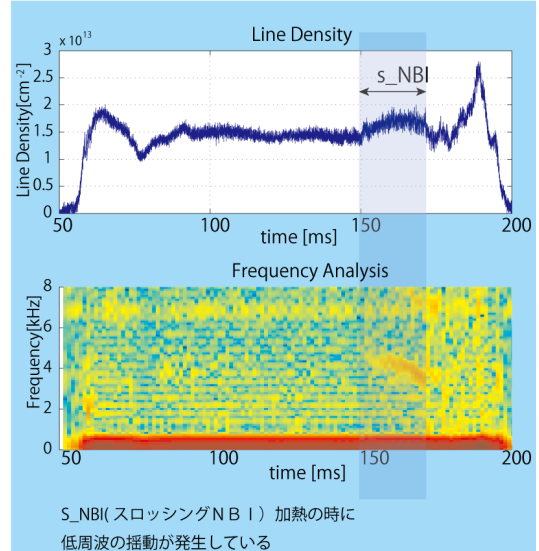
改造した部分

真空容器までの導波管等は既存のものを利用
システムの入れ替えは 30 分程度で完了



データ解析

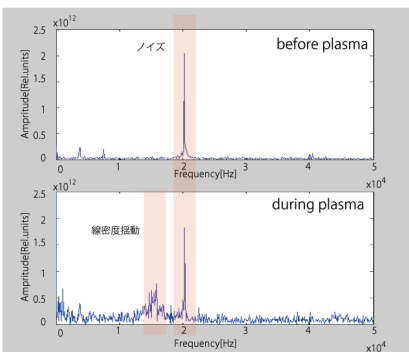
得られたデータから線密度を計算→周波数解析を行う



PILOT PSI での使用

線密度計測

オランダの DIFFER 研究所の Pilot-PSI 装置に、今回製作した通倍型干渉計を設置して、プラズマ線密度、線密度揺動計測を行った周波数解析結果

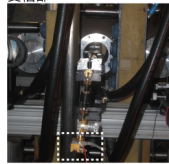


プラズマ発生時に揺動が発生しているのが分かる

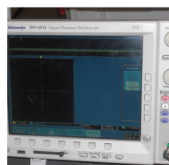
現地研究者による取り付け



受信部

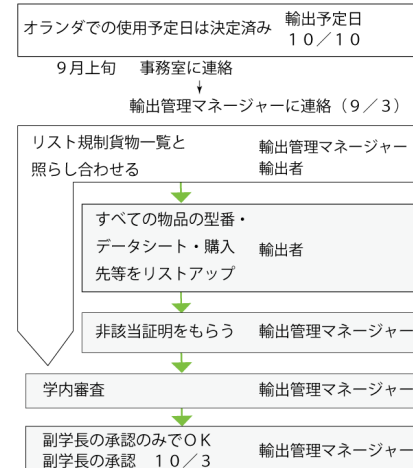


リサージュ波形



装置の輸出

実験装置を輸出するに当たっては、貨物が輸出貿易管理令別表第1の1～15項に触れるかどうかを考えなければならない。これに触れる場合経産大臣の許可がなければ輸出できない。またそうでなくてもリスクありの貨物は 副学長の承認が必要



今回輸出の装置に関係した部分
経済産業省令で定める仕様の
7-2) マイクロ波用機器若しくはその部分品
またはミリ波用機器の部分品
"貨物等省令第6条第十五号"
マイクロ波用試験受信機であって、次のイ及びロに該当するもの
イ 70(平成25年10月15日より110GHz)ギガヘルツを超える周波数で使用することができるように設計したもの
ロ 振幅及び位相を同時に測定できるもの

経産大臣の許可も必要だった場合には間に合わなかった

- 何が該当するか分からない
- 該当リスト(省令)の表記の仕方が難しい
→ 早めに輸出管理マネージャーと連絡を取り合う

- 手作り製品だと昔の物品を使用することも多くデータシート・購入先などが不明になっていることがある