

# 遠赤外レーザーを用いた電子密度計測用 Cotton-Mouton偏光計の開発

秋山 毅志、川端 一男、岡島 茂樹\*、中山 和也\*、  
CHS 実験グループ

核融合研、中部大\*

## 発表の概要

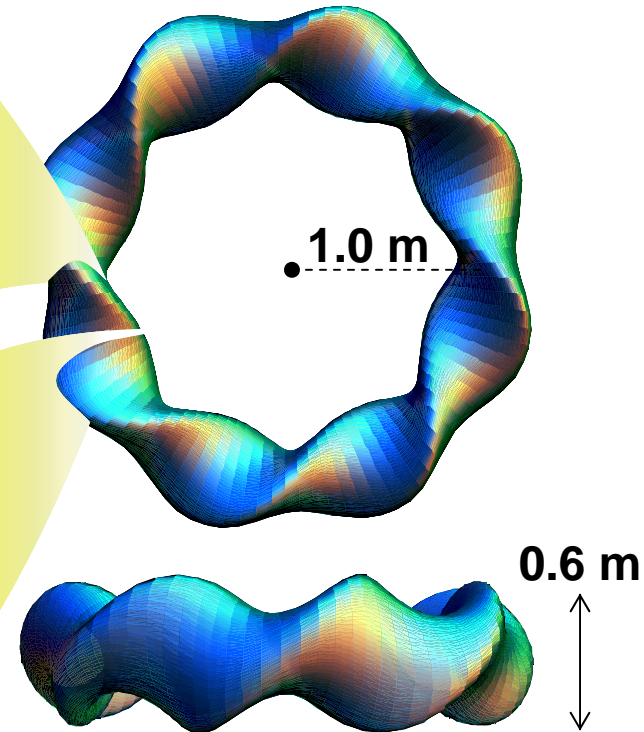
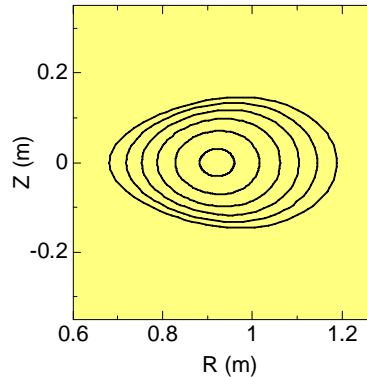
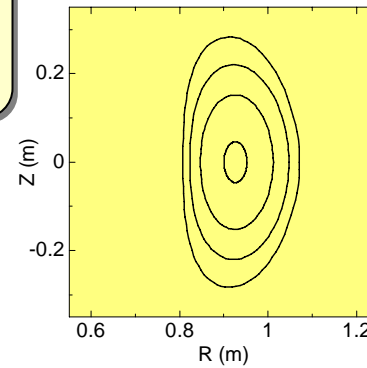
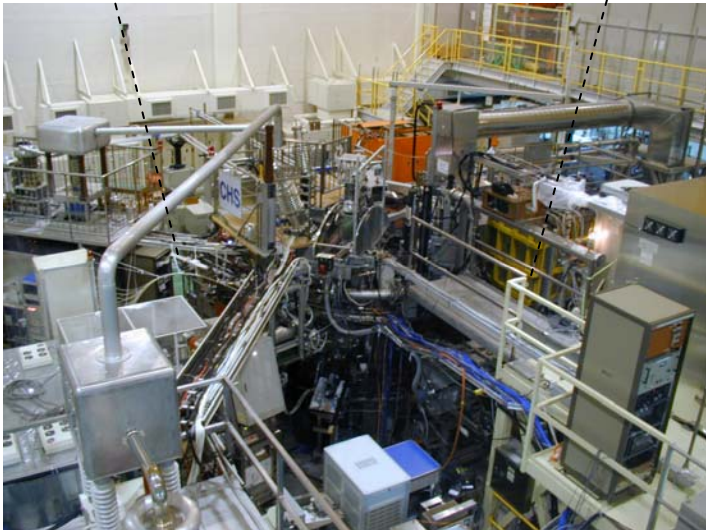
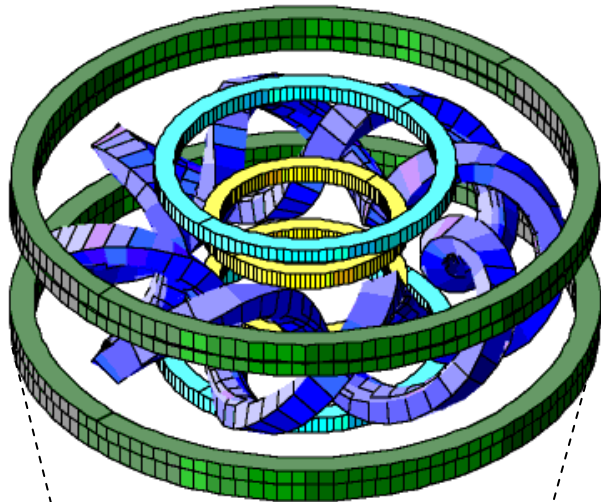
1. 背景と目的
2. 計測の原理
3. 計測システムの概要
4. 計測結果と問題点
5. まとめ



# Compact Helical System (CHS)

CHS is a low-aspect-ratio (5) middle sized helical device.

## Shape of CHS Plasma



<b>Major Radius</b>	<b>:</b>	<b>1.0 m</b>
<b>Ave. Minor Radius</b>	<b>:</b>	<b>0.2 m</b>
<b>Max. of <math>B_t</math></b>	<b>:</b>	<b>2 T</b>
<b>Max. of <math>n_e</math></b>	<b>:</b>	<b><math>\sim 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}</math></b>
<b>Max. of <math>T_e</math></b>	<b>:</b>	<b><math>\sim 3 \text{ keV}</math></b>

# 開発の背景と目的

電子密度制御は、プラズマ制御の上で最も基本的なものの1つ

➡ 密度計測には**高い信頼性(常にミス無く計測できる)**が必要

## 干渉計測

- 広く利用されている
- 高い密度分解能
- 機械的振動の影響
- 「フリンジジャンプ」という計測ミスが原理的にある

通常、位相変化は $2\pi$ を超えるため、ビームの屈折などにより信号が途切れると、位相変化(密度)の絶対値が分からなくなる。

高密度ほど起こりやすく、核燃焼プラズマで想定される $10^{20} \text{ m}^{-3}$ 程度のプラズマでは深刻。

## 偏光計測

プラズマ中のFaraday効果(偏光面の回転、接線計測)またはCotton-Mouton効果(楕円度の変化、垂直計測)を利用したものがある。

- 機械的振動の影響を受けない
- フリンジジャンプが原理的に無い
- 位相変化が小さい
- Cotton-Mouton偏光計は、実機への適用例が非常に少ない。

Cotton-Mouton偏光計の計測精度を決める要因や特性を探り、核燃焼プラズマ計測への適用可能性を検証することを目的に、CHSにて、遠赤外レーザーを用いたCotton-Mouton偏光計を開発した。

# ITERにおけるCotton-Mouton偏光計測

プラズマ高性能化及び燃焼制御の観点から、  
電流分布計測は極めて重要

プラズマ中の電流分布(内部磁場分布)を評価するために、プラズマ中での偏光面の回転角(ファラデー回転) $\alpha$ を計測する。

$$\alpha \propto \lambda^2 \int n_e B_{\parallel} dl$$

$\alpha$ から $B_{\parallel}$ を評価するには、密度分布が必要

同一コードで同時計測できることが望ましい  
偏光角計測 + 密度計測  $\Rightarrow$  磁場(電流)分布

• 干渉計測 • Cotton-Mouton偏光計測

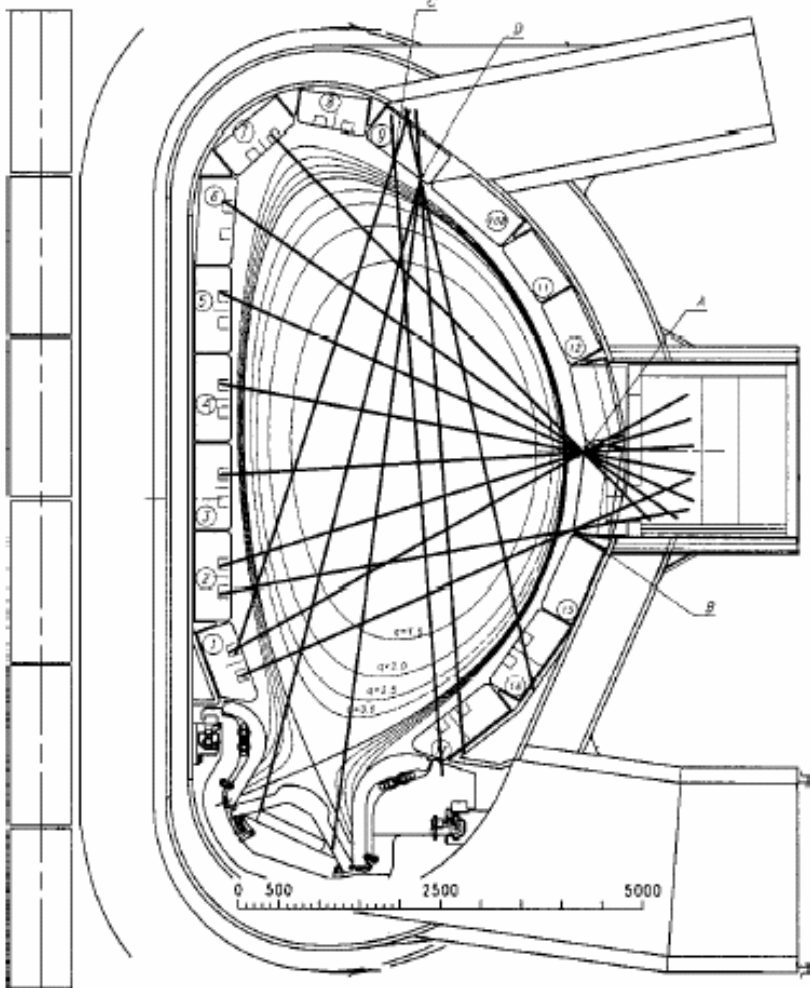
- フリンジジャンプが原理的にない
- 適用するには精度などの情報が乏し過ぎる

• これまでの多くの実績、高精度  $\rightarrow$  検証実験

• 光源の短波長化、2波長振動補正光学系

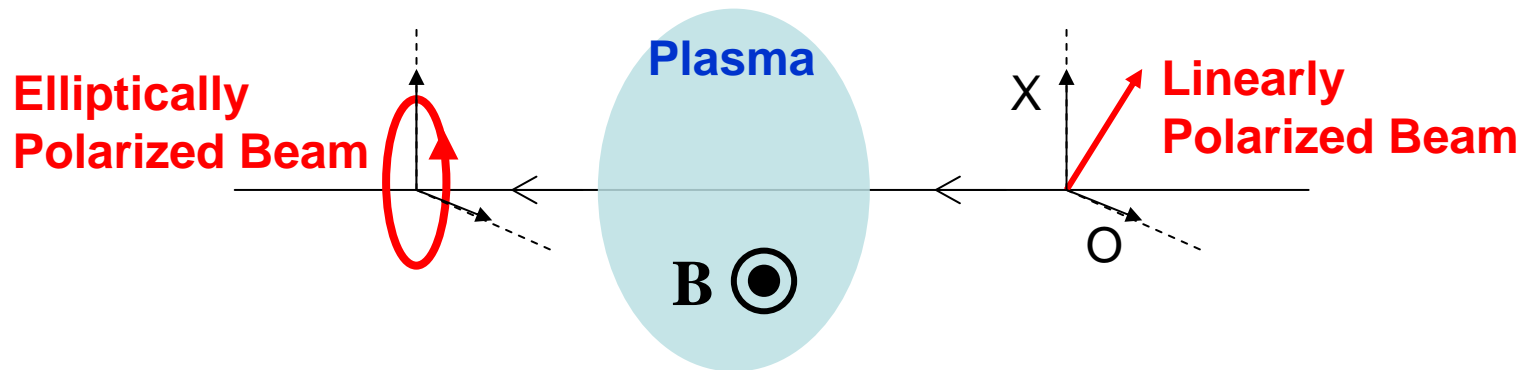
$\rightarrow$  57&48  $\mu\text{m}$ レーザーの開発(川端・岡島)

ITERでの電流分布計測  
ポロイダル偏光計



# Cotton-Mouton (CM) 効果

Cotton-Mouton偏光計は、磁場中のプラズマではO-/X-modeで屈折率が異なること(複屈折性)を利用している。これにより、プラズマ透過後に偏光状態が変化し、「**Cotton-Mouton 効果**」と呼ばれている。



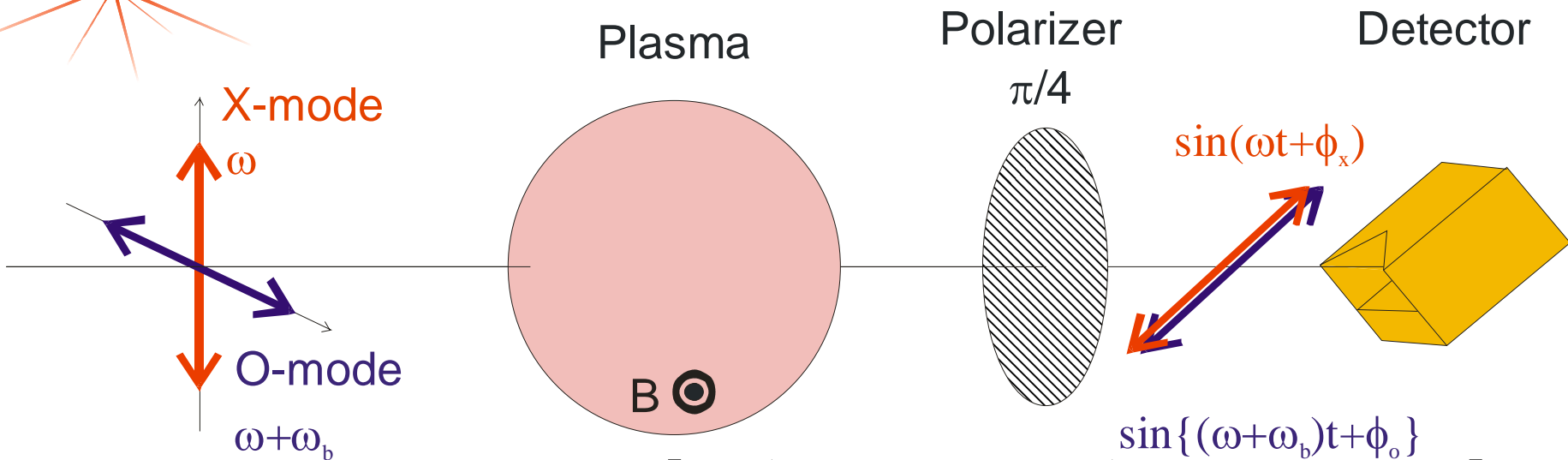
O-/X-mode間の位相差  $\phi_{CM}$  は、

$$\phi_{CM} [\text{rad.}] = \phi_O - \phi_X$$

$$= 2.4 \times 10^{-20} \lambda [\text{mm}]^3 \int n_e [\text{m}^{-3}] B_{\perp} [\text{T}]^2 dl [\text{m}]$$

$\phi_{CM}$ より、(磁場の重みのついた)線平均電子密度が得られる。

# CM偏光計の計測原理



Probe signal:

$$I_{\text{probe}} = \left[ \sin\{(\omega + \omega_b)t + \phi_o\} + \sin(\omega t + \phi_x) \right]^2$$

$$\propto \cos\{\omega_b t + (\phi_o - \phi_x)\} + \text{Const.}$$

$$= \phi_{\text{CM}}$$

Reference signal:

$$I_{\text{ref}} \propto \cos(\omega_b t) + \text{Const.}$$

S.E. Segre, Phys. Plasma 2 2908 (1995)

O-/X-modeの間の位相差を、プローブ光・参照光の位相差として測定する。

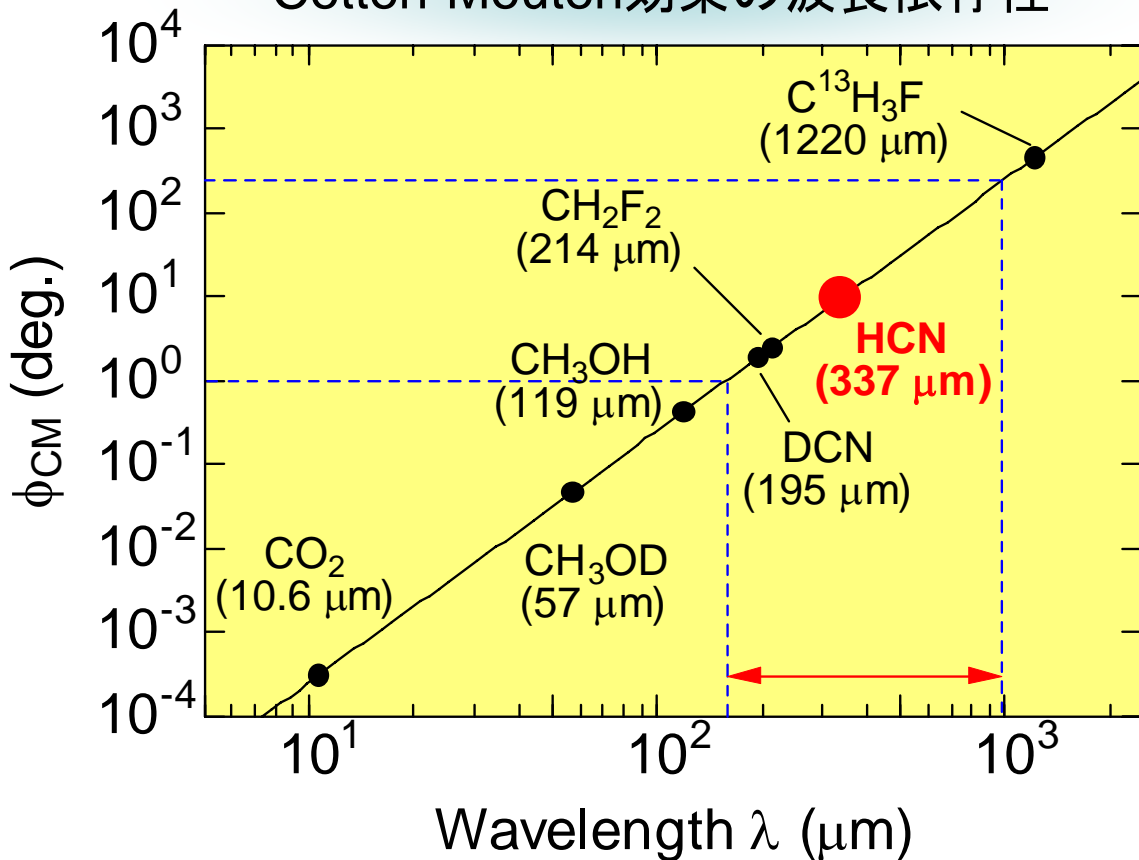
# CM偏光計の光源

$$B_t = 1.8 \text{ T}$$

$$n_e = 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

$$L = 0.57 \text{ m}$$

Cotton-Mouton効果の波長依存性



## ○波長下限値

CM効果の位相差 $\phi_{CM}$

## ○波長上限値

プラズマ中での過度なビームの屈折を抑制。

## HCNレーザー(337 $\mu\text{m}$ )

$$\phi_{CM}^{\text{HCN}} \approx 10 \text{ deg.}$$

位相変化としては小さいが、デジタルバンドパスフィルタと組み合わせたcomplex demodulation法を利用して位相分解能を向上させる。

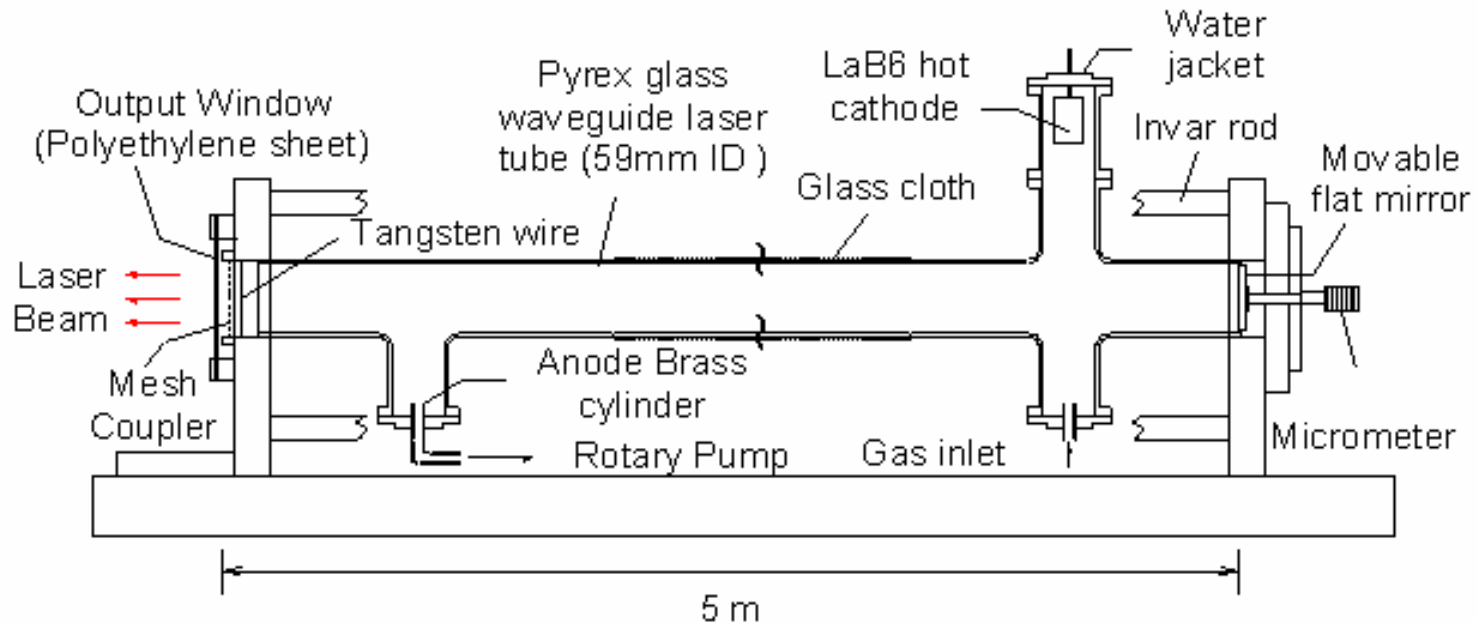
(T. Akiyama et al., RSI 74 (2003) 2695)

CHSでは、より長波長の方が計測精度の点で望ましいが、レーザー出力が大きいこと、屈折変移量が小さいことから、既存のHCNレーザーを適用する。

# 計測システム - HCNレーザー -

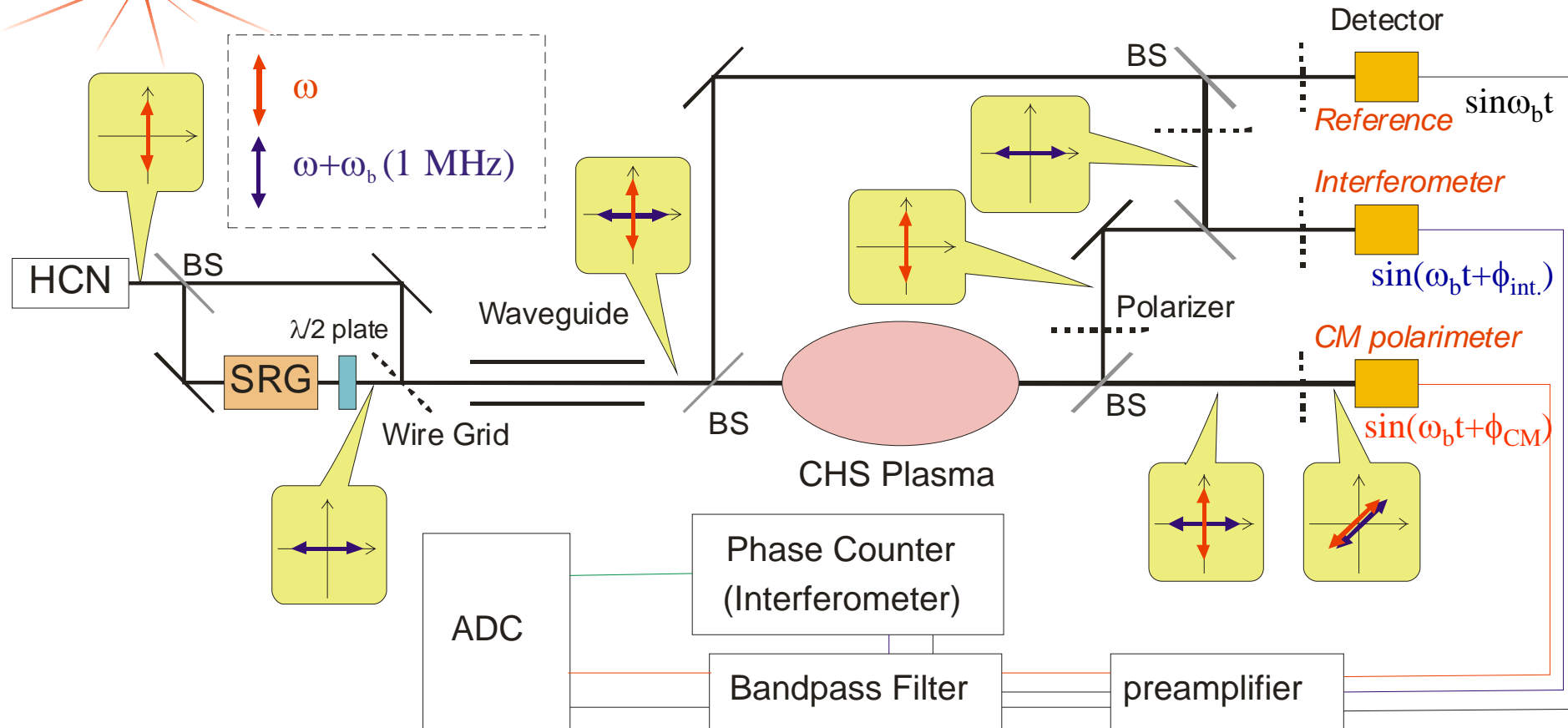
## Hydrogen Cyanide (HCN) laser

- 波長: 337  $\mu\text{m}$
- 放電励起レーザー
- 共振器長: 5 m
- 出力: 約 100 mW (最大500 mW)



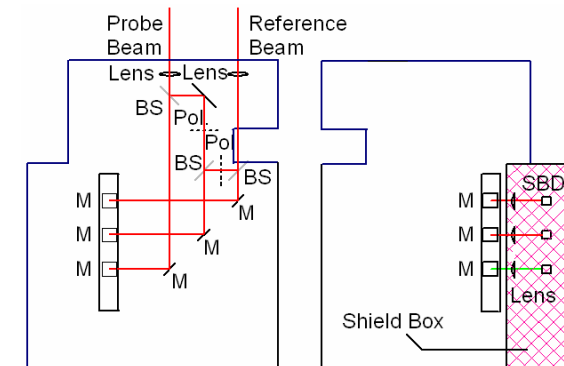
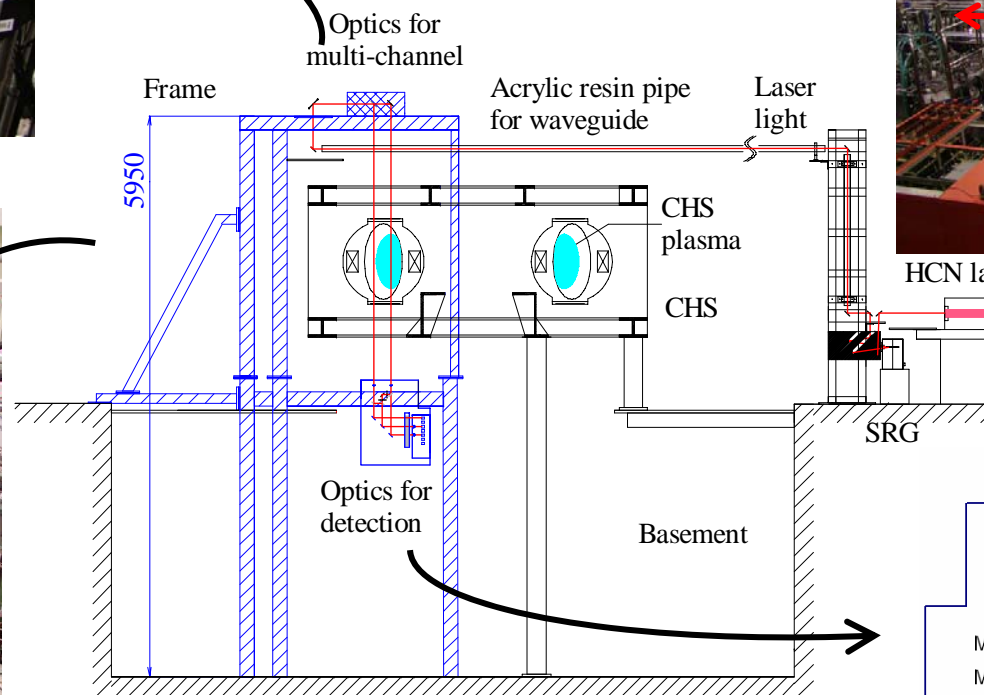
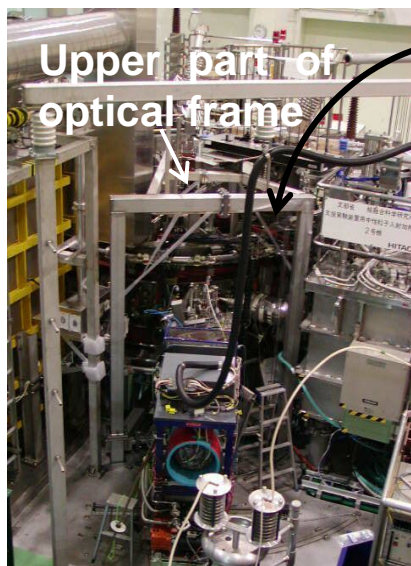
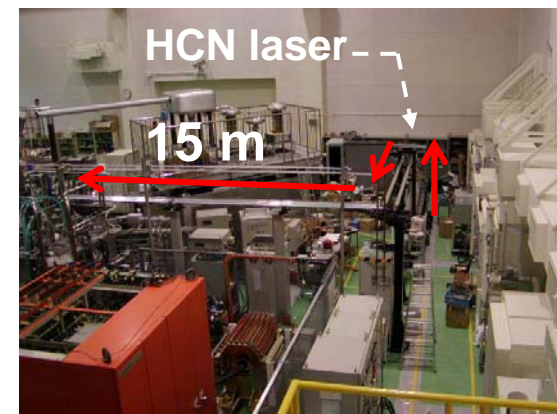
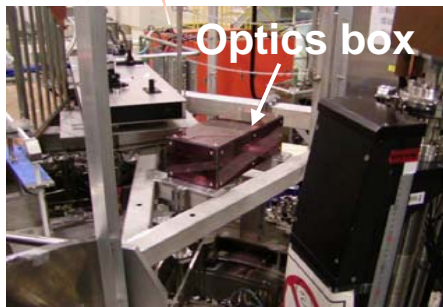


# CHSにおけるCM偏光計の光学系



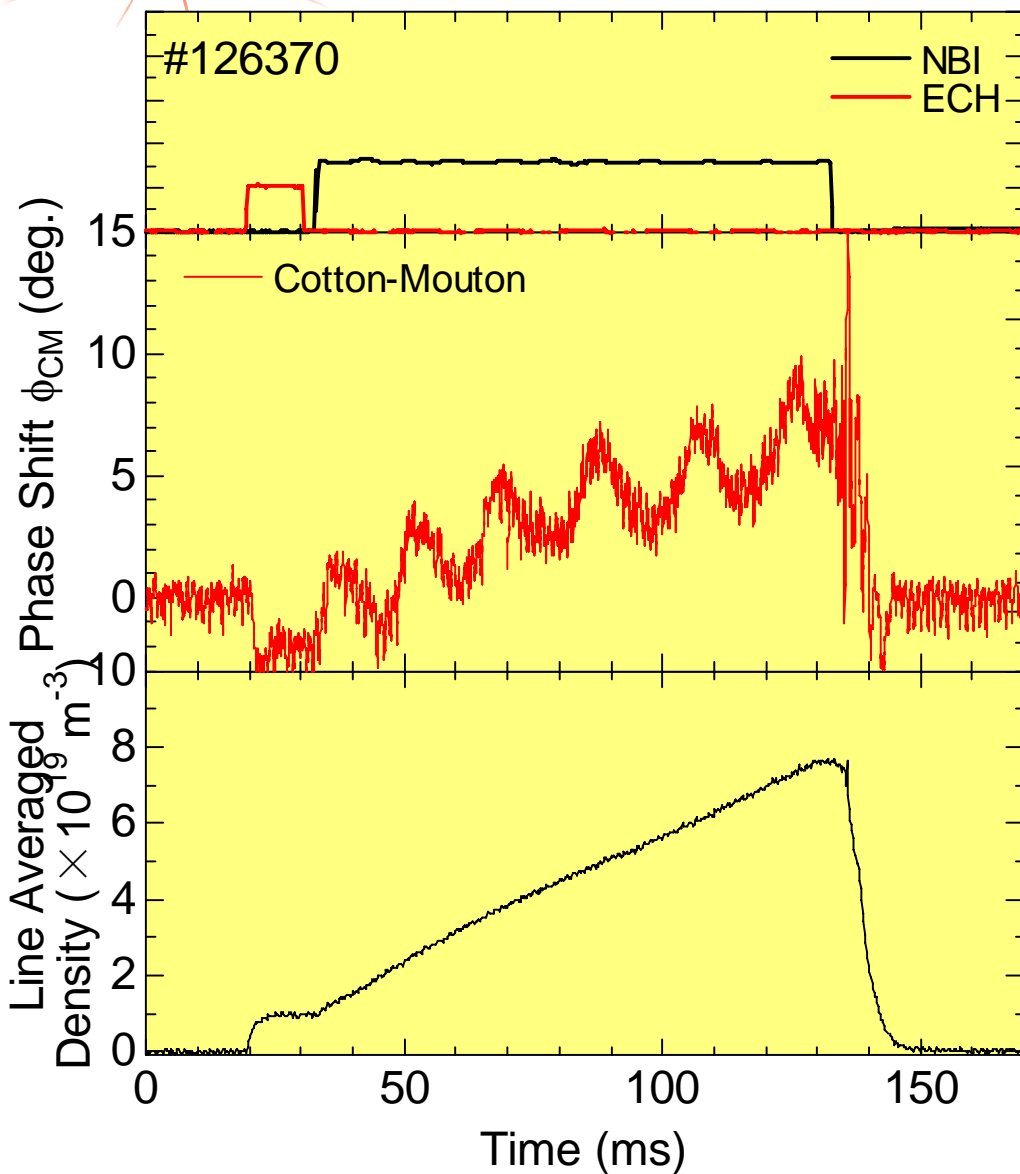
- ビート周波数: 1 MHz
- Cotton-Mouton偏光計の計測精度等を評価するため、同時・同一コードで干渉計測が可能な光学系にしている。

# 計測システム – システム鳥瞰図 –



- レーザーからCHSまでの光路長は約15 m.
- 伝送にはアクリル製誘電体導波管を使用し、伝送効率は約80%
- 検出器はShottky barrier diodeを使用。

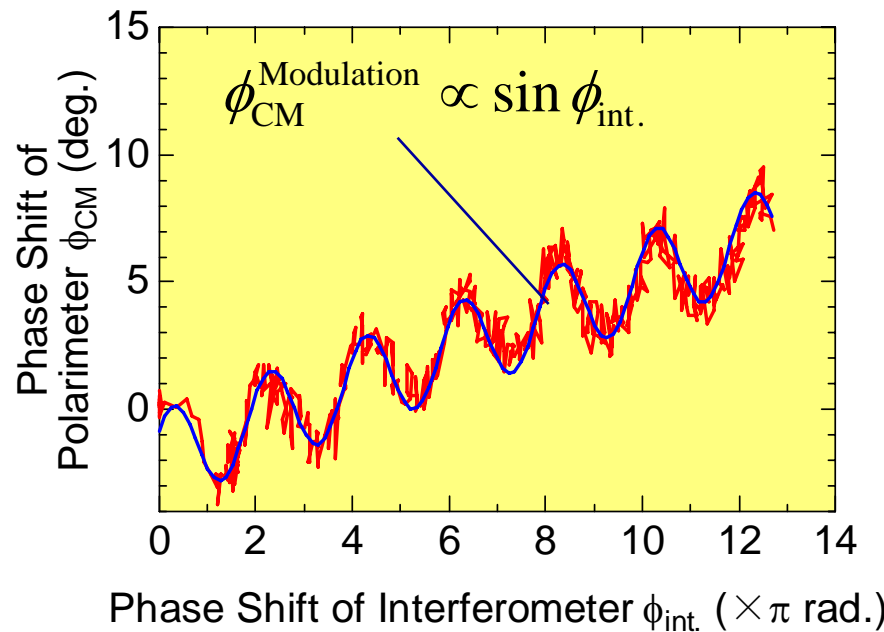
# 計測結果とその問題点



## CM 偏光計の問題点

密度ランプアップ時に位相差信号に変調成分が乗る

変調成分は、干渉計測の位相変化  $\phi_{int}$  と相関がある。



# 位相変調の原因

## 変調が生じる原因

1. 偏光計・干渉計の間の電氣的なクロストーク
2. 検出器-光学素子間の多重反射で生じる光学的バックトーク

原因 1 の場合、偏光計のビート信号  $I_{\text{pola}}$  は、

$$I_{\text{pola}} = \underbrace{\sin(\omega_b t + \phi_{\text{CM}})}_{\text{Polarimeter}} + \underbrace{A \sin(\omega_b t + \phi_{\text{int.}})}_{\text{Interferometer}}$$

Polarimeter Interferometer

$$= \sin \omega_b t (\cos \phi_{\text{CM}} + A \cos \phi_{\text{int.}}) + \cos \omega_b t (\sin \phi_{\text{CM}} + A \sin \phi_{\text{int.}})$$

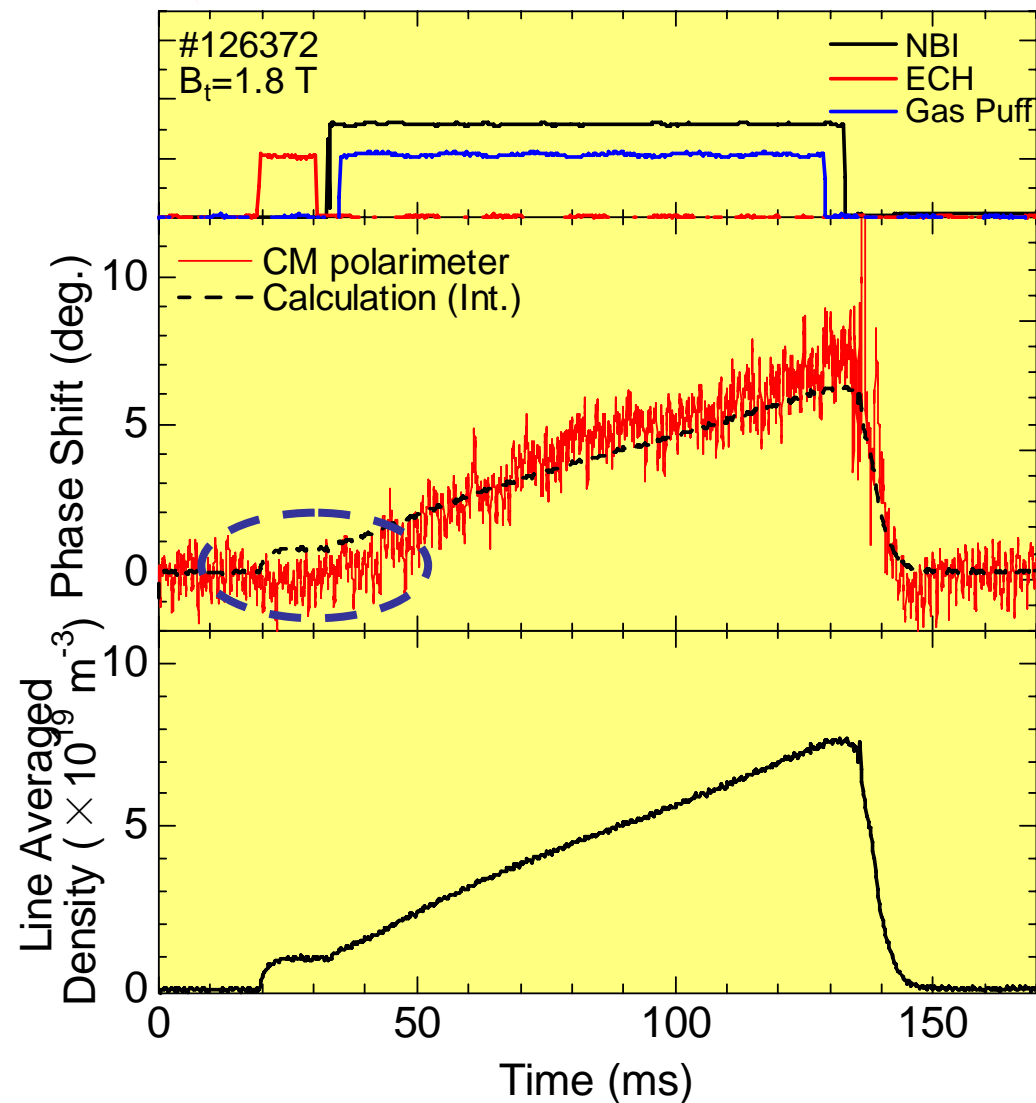
$$\propto \sin(\omega_b t + \phi_{\text{CM}}^{\text{Mod}})$$

$$\phi_{\text{CM}}^{\text{Mod}} = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \phi_{\text{CM}} + A \sin \phi_{\text{int.}}}{\cos \phi_{\text{CM}} + A \cos \phi_{\text{int.}}} \right) \approx \phi_{\text{CM}} + A \sin \phi_{\text{int.}} \quad (A \ll 1, \phi_{\text{CM}} \ll 1)$$

バンドパスフィルターでのクロストーク → データ収集系の改良  
光学的バックトーク → 検出器の前にアッテネーションを挿入  
(反射光は複数回通過するために強度が減少する)

➡ 変調成分はほぼ抑えることに成功した。

# 改善後の計測結果



• 干渉計のデータを用いた計算値と、概ね合致するCM偏光計の結果が得られた。

(計算では、CHSでNBIプラズマで典型的なフラットな密度分布( $1-\rho^8$ )を仮定)

• 若干の時間変化の違いは、除去しきれないクロストーク成分、有限 $\beta$ 効果、分布の変化などが原因として考えられる。

• 放電の初期で、干渉計で有限の密度にも関わらず、偏光計の位相変化がない。原因はまだ不明。

• 現状では、時定数0.3 msで位相変動は $\pm 1$ 度程度。



## まとめ

- Cotton-Mouton偏光計の計測精度・特性を探り、核燃焼プラズマ計測への適用可能性を検証することを目的に、CHSにてHCNレーザーを用いたCotton-Mouton偏光計測を行った。このシステムは同時・同一計測コードで干渉計測を可能としている。
- Cotton-Mouton効果をO-/X-mode成分の位相差として計測する方式を採用した。この方式は、レーザーの出力変動及びプローブ光のプラズマでの屈折の影響が少ない。
- 干渉計の結果とほぼ合致するCotton-Mouton効果による位相変化が測定できた。現状では時定数0.3 msで±1度程度の位相変動がある。電氣的・光学的クロストークは致命的な位相変動の原因となり、光学設計の際にはクロストーク抑制に十分留意しなければならない。

## Future Works

- 放電初期・終了直後及び放射崩壊時の干渉計との差異の原因究明