



4. ITER 実験での課題と新たな取り組み

4.1 電子密度計測の課題と開発状況

秋山 毅 志

(核融合科学研究所)

(原稿受付：2011年5月20日)

本節では、ITER以降での電子密度計測の課題と、現在進められている信頼性の高い密度計測手法の開発状況について述べる。これまで密度計測で主流であったヘテロダイン干渉計を補完するものとして、ファラデー効果もしくはコットン・ムートン効果を利用した偏光計、ディスペーション干渉計が開発され、国内外の装置で実証実験が進められている。真空容器内に設置せざるを得ない反射鏡の光学特性保持も課題であり、受動的・能動的な手法が開発されつつある。

Keywords:

interferometer, polarimeter, Faraday effect, Cotton-Mouton effect, dispersion interferometer, first mirror, retroreflector

4.1.1 はじめに

プラズマの電子密度は物理解析に必要なだけでなく、磁場閉じ込め核融合では、燃焼プラズマを制御する上で重要な基本パラメータの一つである。そのため、核融合プラズマ研究の黎明期より、様々な密度計測手法が考案されてきた。主な電子密度計測方法に、静電プローブ計測、分光計測、干渉計測、トムソン散乱計測などがある。本節で扱う干渉計測は、積分計測であることからプラズマ全体の密度情報を反映するため、燃料供給制御の参照信号に適している。干渉計測はプラズマ計測として古くから用いられている手法で、ITERにおいても、密度計測の主力計測機器の一つとして計画されている[1]。

ITERや将来の核融合炉では、燃料供給制御のための密度計測に高い密度・時間分解能だけでなく、信頼性が求められる。燃料供給は核燃焼プラズマ（核融合出力）の重要な制御ノブの一つであるため、計測ミスがないこと、そして精度・信頼性が長期間に亘って保たれることが必要条件になる。一般に、干渉計測は密度・時間分解能が非常に高いことが特長である。例えば、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 Large Helical Device (LHD) に設置されている波長 $119\text{ }\mu\text{m}$ の CH_3OH レーザー干渉計では、時間分解能 $10\text{ }\mu\text{s}$ 、密度分解能 $5.6 \times 10^{16}\text{ m}^{-3}$ が得られている[2,3]。そのため、密度モニタとしての役割だけでなく、密度揺動計測などの物理研究にも利用されている。このような理由から、中型以上の装置のほとんどに干渉計が設置されている。また、干渉計は研究分野を問わず大変広範に用いられる計測手法であるため、技術として成熟しており、必要な光学素子・変調器も豊富で入手しやすいというメリットも

ある。

4.1.2 核融合装置におけるレーザー干渉計の問題点

大変有用な干渉計測であるが、ITERや将来の核融合炉を展望するにあたり、いくつかの問題点がある。

第2章で(25)式が導出されたとおり、干渉計測は屈折率の電子密度依存性を利用し、プローブ光の位相変化から電子密度を評価する。そのため、機械振動によって光路長が変化すると、それに起因する位相変化は計測誤差となる問題がある。計測誤差を減らすため、光学素子を取り付ける架台は振動しやすい装置本体から切り離し、頑丈な構造にしたり、空気ばね等による除振をしたりする必要がある。また、プラズマによる位相変化が波長に比例するのに対し、振動による位相変化は反比例する。これを利用し、2つの波長で同時・同一視線で計測（2波長干渉計）することで、振動成分を分離し、プラズマによる位相変化を評価することも機械振動対策として挙げられる。

高密度領域での「フリンジジャンプ」は、干渉計測の信頼性を低下させる大きな問題である。位相は 2π の不確定性を持つため、位相変化が 2π （1 フリンジ）を超える場合は、密度の位相変化を途切れることなく計測し続ける必要がある。しかし、プラズマの密度勾配が引き起こすプローブ光の屈折変位により、検出信号強度が低下して位相計測が途切れてしまうと、図1(a)に示すように、密度の絶対値がわからなくなる。これがフリンジジャンプであり、密度勾配が大きくなる高密度領域で深刻になる。プローブ光の屈折変位量は波長のほぼ2乗に比例して大きくなるため、波長

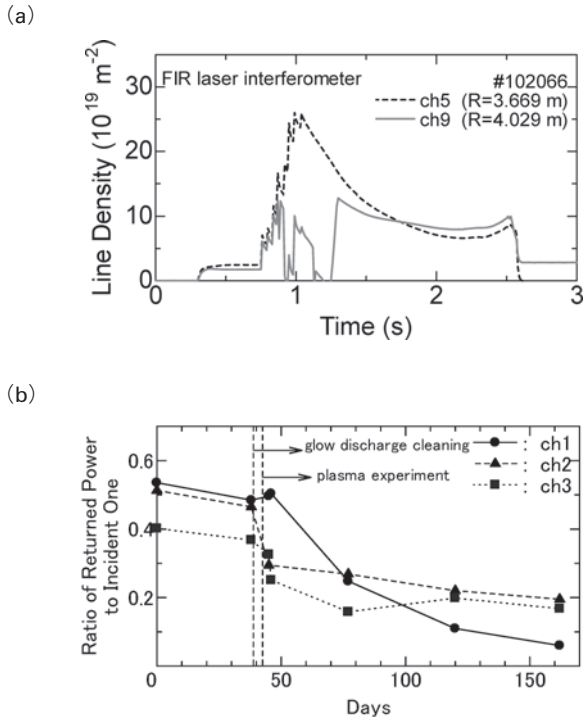


図1 (a)高密度領域での遠赤外レーザー干渉計のフリンジジャンプの一例。プローブ光の屈折変位が小さいプラズマ中心コード(ch5)では問題無く計測できているが、密度勾配が大きい周辺コード(ch9)ではフリンジジャンプが発生している。(b)LHDの真空容器内に設置した、ミラー(リトロ反射鏡)によって反射された炭酸ガスレーザー光の入射パワーに対する反射パワーの比[4]。強度比はミラーの反射率と真空窓(セレン化亜鉛)の往復の透過率を含む。

の短いプローブ光を用いることで、屈折変位を小さくしてフリンジジャンプのリスクを減らすことができる。このため、現在のLHD, JT-60U等の大型装置では、波長 $10 \mu\text{m}$ 程度の炭酸ガスレーザーも干渉計光源として用いられている。一方で、短波長レーザーを光源とした場合は、機械振動による計測誤差が大きくなるため、先に述べた除振構造や2波長干渉計が必須となる。

上記二つの問題点に対し、現在の大型装置でも除振構造や2波長干渉計を構成して密度計測が行われている。例えば、LHDの干渉計の光学架台には空気ばねが使用されており、LHD本体や加熱装置等の機器とも完全に切り離されている[2]。しかし、ITERや将来の核融合炉では、装置の巨大さや計測ポートの制約により、すべての光学部品の除振をすることは現実的に困難である。ITERではポートプラグ内に干渉計の伝送光路の一部が入るため、ある程度の振動が予想される。2波長干渉計による振動成分の補正は有効な手法であるが、補正しきれない成分が残る場合があり、計測精度を低下させる原因となる。高密度領域での短波長レーザーの有効性は既の実証されているが、ITERをはじめ将来は $1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 程度の高密度が標準的な運転領域になり、DEMO炉においては数カ月に及ぶ定常運転が求められる。そのため、原理的にフリンジジャンプのリスクがあることにより、密度計測に対する不安をぬぐい去ることができない。また、短波長レーザー光に対しては、真空容器内に設置するミラー表面の損傷・不純物堆積によって

反射率が低下しやすい問題がある。図1(b)は、LHD 真空容器内に設置したリトロ反射鏡によって往復する、波長 $10.6 \mu\text{m}$ のレーザー光の入射光に対する戻り光の強度比の変化である。約4カ月間のプラズマ実験により、反射率は最大で20%以下に低下していることがわかる[4]。

これらに加え、電子温度が 10 keV 以上の高温領域になると、屈折率への相対論的效果を考慮しなくてはならないが、その問題については4.3節で詳細に扱う。

4.1.3 干渉計以外の密度計測

将来の核融合炉で信頼性高く密度計測を行うためには、上記の問題を対処療法的ではなく、原理的に解決した密度計測手法を導入することが望ましい。ここでは、その解決手法として有望な、偏光変化(ファラデー効果、コットン・ムートン効果)を利用した密度計測や、ディスペーション干渉計について簡単な原理、開発状況や適用例を概説する。

① ファラデー効果を用いた密度計測

第2章(12)式で示されたように、磁場中のプラズマでは右・左回り円偏光の屈折率が異なる。そのため、図2(a)に模式的に示しているように、プラズマ中を透過することによって直線偏光の偏光面が回転する。その回転角は第2章の(30)式で与えられ、プローブ光に平行な磁場強度成分と電子密度の積の線積分値に比例する。これより、磁場強度が既知であれば、偏光角から電子密度が評価できることになる。機械振動によって光路長が変化しても偏光角は変化しないため、計測結果は振動の影響を受けにくい。また、機械振動による誤差がないことから、偏光角を1フリンジ

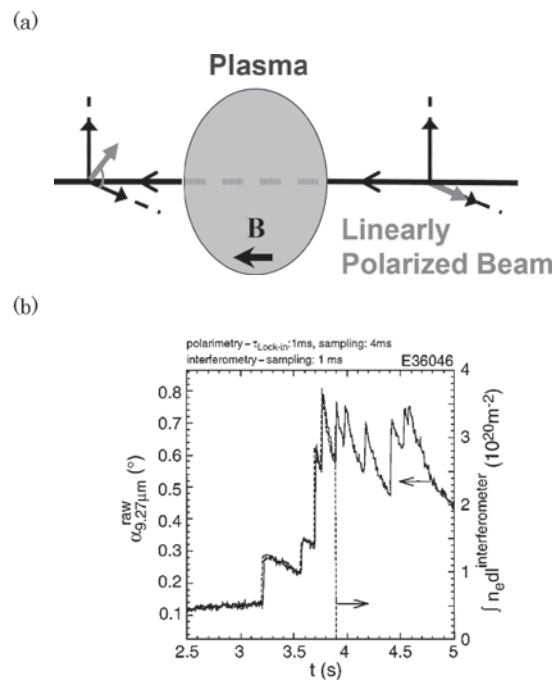


図2 (a)ファラデー効果の原理図、(b)JT-60Uにおける偏光計測結果の一例[5]。干渉計測(点線)では $t = 3.9 \text{ s}$ でフリンジジャンプしているのに対し、偏光計測(実線)では問題なく測定を継続できている。

より十分小さくする（短波長化）することで、回転角と電子密度を1対1対応させて原理的にフリンジジャンプをなくすることができる。

偏光角の測定には、いくつかの方式が提案され、既に実証されている。JT-60Uで採用されている光弾性変調器を用いた方式[5]は、光学系がシンプルで長時間の安定性が高く、また干渉計との組み合わせが容易であるという利点がある。また、LHDで用いられた、差周波を持つ右・左回り円偏光の混合波をプローブ光とするヘテロダイン方式[6]は、時間分解能を高く取ることができ、密度・磁場揺動計測も可能という特長がある。図2(b)は、JT-60Uでの炭酸ガスレーザー（波長10.6, 9.3 μm ）を光源とする偏光計測例であるが、固体水素燃料がプローブ光を横切ったためと考えられるフリンジジャンプが干渉計で発生しているのに対し、偏光計は影響を受けていない。このように、何らかの擾乱を受けた場合も、偏光計は問題なく計測を継続できる信頼性の高さを持つ。課題とされていた分解能も改善が進んでおり、JT-60Uでは時間分解能4 msにおいて、密度分解能 $3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ に相当する偏光角分解能0.01度が得られている[5]。偏光計測手法のいくつかは干渉計測との同時計測が可能であり、両者を組み合わせた干渉偏光計がITERにおいても計画されている[7]。これにより、偏光計単独による密度計測、もしくは偏光計による干渉計のバックアップによる信頼性の向上を図ることができる。

計測視線に関しては、密度計測の場合は通常プローブ光を接線入射させる。密度モニタとして最も重要な、プラズマ中心を通る視線をポロイダル断面で取ろうとすると、ファラデー効果に寄与するプローブ光に平行な磁場成分がほとんどない（トロイダル・ポロイダル磁場ともにプローブ光に直交する）ことから、偏光面の回転がほぼゼロになってしまうためである。光源波長の選択は、主に得られるファラデー回転角で決まるが、計測精度を高めるために回転角を大きくすると、後述するコットン・ムートン効果とのカップリングによって正しい偏光角の評価が難しくなる問題があるため、数度程度の回転角の場合が多い。接線入射でトロイダル磁場成分を利用した場合、炭酸ガスレーザーのように波長10ミクロン程度の光源が適当になる。JT-60U, LHD, DIII-Dでは炭酸ガスレーザーを光源とする接線計測が実施され、ITERでも同様の予定である。

② コットン・ムートン効果を用いた密度計測

ファラデー効果が右・左回り円偏光の屈折率の違いに起因するのに対し、コットン・ムートン効果は、2章(15)・(16)式に導出されたとおり、正常光・異常光（Oモード・Xモード）の屈折率の違いによって生じる。そのため、伝搬に伴って正常光・異常光成分間で位相差が生じ、プラズマ透過によって図3(a)に示すような偏光の楕円度に変化する。Oモード・Xモード成分間に生じる位相差 ϕ_{CM} は、 $\omega_{\text{pe}}^2/\omega^2 \ll 1$, $\omega_{\text{ce}}/\omega \ll 1$ の時、次式で与えられる。

$$\phi_{\text{CM}} = \frac{2\pi}{\lambda} \int (N_{\text{O}} - N_{\text{X}}) dl \cong 2.4 \times 10^{-11} \lambda^3 \int n_e B_{\perp}^2 dl$$

位相差 ϕ_{CM} はプローブ光に垂直な磁場成分の2乗と電子密

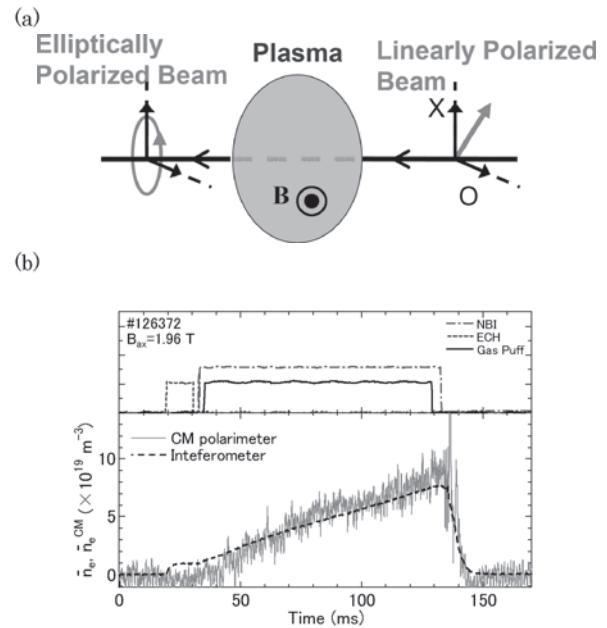


図3 (a)コットン・ムートン効果の原理図、(b)CHSにおける偏光計測結果の一例[10]。

度の積の線積分値に比例するため、①のファラデー効果と同様に磁場強度が既知であれば、電子密度が評価できることになる。①と同じく、偏光状態の変化は光路長に依存しないため、機械振動のある装置本体に光学素子に取り付けられていても大きな問題はない。また、適切な波長を選ぶことで、生じる位相変化を 2π 以下にすることができるため、フリンジジャンプも原理的になくせる。

本手法はミリ波領域ではT-11M[8], W7-AS[9], 遠赤外線領域ではCHS[10]にて実証されている。測定方式には、プラズマ透過光強度の直行成分比を直接測定し、楕円度を評価する方式[11]や、差周波を持つOモード・Xモードの混合波をプローブ光とするヘテロダイン方式がある[8-10]。図3(b)はCHSにおけるコットン・ムートン効果を利用した密度計測例である[10]。CHSでのシステムは、光源に波長337 μm のHCNレーザーを用い、一本のプローブ光で干渉計測と偏光計測が同時にできるシステムである。図3(b)のように、二つの計測結果はよく一致していることがわかる。偏光計の信号に数百Hzのノイズが載っているが、これはヘテロダイン検波のためにプローブ光に与えた差周波成分（ビート周波数）のノイズに起因し、差周波を与える手法を改良することで精度を向上できると考えられる。一方、干渉計測も同じビート信号を用いているが、プラズマによる位相変化が偏光計測よりも2-3桁大きいために、相対的に位相ノイズがほとんど無視できるレベルとなる。ファラデー効果の場合と共通であるが、計測する位相変化は通常数度程度であり大きくしないために、ビート周波数の質が偏光計測の精度を決める大きな要因となる。

ファラデー効果とは対照的に、コットン・ムートン効果の場合はプローブ光に垂直な磁場成分が寄与するため、ポロイダル断面でプラズマ中心を通る視線で計測ができる。

逆に接線視線にすると比較的弱いポロイダル磁場を用いることになり、有意な偏光状態の変化をさせるために光源波長が長くしなければならない。そのため、プローブ光の屈折変位が大きくなり、フリンジジャンプの問題がないにしろ、計測視線の変化が問題になる可能性がある。上記の適用例はすべてポロイダル断面での計測であり、ITERにおいても電流分布を計測するポロイダル偏光計にて、密度分布計測のためにコットン・ムートン効果を用いることが提案されている[12]。

③ ディスパーション干渉計

上記のファラデー効果やコットン・ムートン効果を利用した計測は、プラズマ中での電磁波と磁場の相互作用であるため、通常は計測が困難な内部磁場揺動等の情報が得られるメリットもある。しかし、視線上での磁場強度が一定とみなせない場合、正確な線平均電子密度を評価するためには磁場分布の情報が必要となる。また、ファラデー効果とコットン・ムートン効果は、その変化が大きくなると両者の相互作用が無視できなくなり、密度評価に系統的な誤差が生じる原因となる[13]。

ディスパーション干渉計は、2波長干渉計の変化形であり、機械振動成分を「自己補正」する新しいタイプの干渉計である。基本的に干渉計測であるため、磁場の情報を必要としない。

図4(a)にその原理図を示す。レーザー光を非線形素子に通し、2倍高調波を発生させる。レーザー光パワーのすべてが変換されるわけではなく、基本波と2倍高調波の混合したプローブ光となる。プラズマを透過後、両者を分離して受光すれば通常の2波長干渉計であるが、ディスパーション干渉計ではプラズマ透過後に混合プローブ光を再び非線形

素子に通して、基本波から2倍高調波を発生させる。その後、フィルタ等を用いて基本波成分を除去し、プラズマの前後で発生させた2倍高調波同士の干渉信号を検出する。干渉信号の位相 ϕ は、プラズマ透過前後で発生させた2倍高調波の位相 ϕ_1, ϕ_2 の差 $\phi = \phi_1 - \phi_2$ となる。それぞれ、 $\phi_1 = 2\omega t + 2\omega\Delta d + c_p \bar{n}_e L / (2\omega), \phi_2 = 2(\omega t + \omega\Delta d + c_p \bar{n}_e L / \omega)$ であり、ここで ω はプローブ光の角周波数、 Δd は機械振動による光路長変化、 c_p は定数、 $\bar{n}_e$ は視線上での線平均電子密度、 L はプラズマ中での光路長である。両者の間で機械振動による位相変化は共通である一方、プラズマによる位相変化は分散（ディスパーション）によって異なるため、干渉信号の位相は $\phi = \phi_1 - \phi_2 = 3c_p \bar{n}_e L / (2\omega)$ となる。このように、機械振動成分は自動的にキャンセルされるため、通常の干渉計のように振動対策をする必要がない。また、機械振動による計測精度の低下がないため、短波長光源を用いることで位相変化を1フリッジ以下にしても良く、これによってフリンジジャンプを原理的になくすることができる。

ディスパーション干渉計は80年代に表面形状の計測等に提案され[14]、90年代にはミラー磁場閉じ込め装置GDTでプラズマ計測に取り入れられている[15]。問題点としては、計測される干渉信号がホモダイン干渉計と同じ $A+B \cos \phi$ であるため、位相差 ϕ の抽出に直流成分 A と振幅強度 B の測定が必要となることである。これらは測定信号強度で決まるため、レーザーの出力変動やプローブ光の屈折変位がもたらす信号強度変化によって、計測誤差が生じる問題がある。また、コサイン信号であるために、位相の一意性が確保できるのが $\pi/2$ までであり、計測のダイナミックレンジが限定されることも短所の一つである。これらを克服するため、位相変調を与える方式[16,17]や、変調信号の強度比を用いる位相抽出方法[18-20]が提案され、計測精度向上の取り組みが進んでいる。

トカマク装置では、波長 $10.6 \mu\text{m}$ の炭酸ガスレーザーを光源とする多チャンネル計測がTEXTORで行われており[16,17]、そこでの計測結果の一例を図4(b)に示す。得られた密度の時間変化は、既存のHCNレーザー干渉計とよく合致している。現在の分解能は時間分解能 1 ms で線電子密度分解能 $2 \times 10^{17} \text{ m}^{-2}$ であり、鋸歯状振動等のMHD揺動計測にも利用できている[16]。高密度・長時間運転を指向するW7-Xでは、多チャンネルディスパーション干渉計の設置が予定されている[21]。ITERにおいては、現在は正式な設置予定はないものの、信頼性高い密度計測としてITPA計測トピカルグループでも検討が報告・議論されている。

4.1.4 真空容器内ミラーの課題と対策

干渉計・偏光計は、いずれもプラズマを透過したプローブ光を受光するため、対向する計測ポートを設置するか、真空容器内に反射鏡を設置してレーザー光を往復させる必要がある。しかし、特にトカマク装置の場合は、トーラス中心にはセンターソレノイドがあり、また上下にはダイバート構造を有するため、対向するポートの設置は現実的

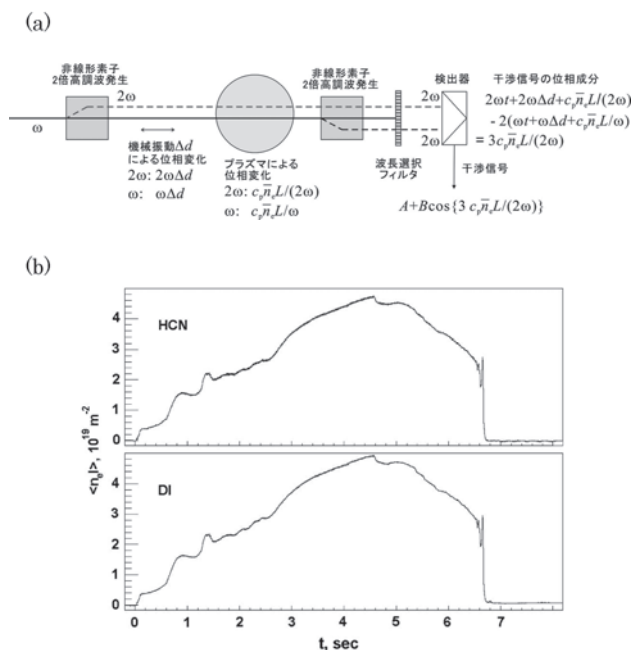


図4 (a) ディスパーション干渉計の原理、(b) TEXTORにおける計測結果[16]。上がHCNレーザー干渉計、下がディスパーション干渉計による計測結果。両者がよく一致していることがわかる。

に困難となる。そのため、反射鏡を設置せざるを得ないが、プラズマからの放射や中性子等による苛酷な環境で、第一ミラーと呼ばれる反射鏡は長期間に亘って反射率を保ち続けることが要求される。これはレーザー計測だけでなく、受動的な分光計測でも共通の課題である。

プラズマからの荷電交換粒子や炭素不純物等による表面損傷は、反射率を低下させる原因となる。図5にLHD真空容器内に設置した平面鏡の反射率変化を示す。CuCrZr合金、Cu、多結晶Mo、SUSミラーをスパッタリングが優勢なLHDの第一壁上に設置し、約5カ月半の第10サイクルでプラズマに暴露した結果である。スパッタリング率（入射粒子1個に対して叩き出される粒子の数）が高いCuやそれが主要な成分であるCuCrZr合金の場合、スパッタリングによって表面に数百nmの高さの凹凸構造が生じ、近赤外領域以下の波長に対して著しい反射率の低下が生じている。鏡表面への炭素や金属不純物の堆積も、表面に凹凸構造をもたらし反射率低下を招くことがある[22, 23]。また、堆積層が多層膜反射面を構成することで、反射時に偏光面の回転が生じることがある[24]。その回転角は入射偏光角依存性を持つため、偏光計測に計測誤差が生じる可能性も指摘されている。さらに、核融合生成物であるヘリウム原子が金属内部に侵入するとバブルを形成するため、鏡表面の平滑性が失われると共に、屈折率・消衰係数等の表面物性値が変化するために反射率が変化することも問題視されている[25]。現在の核融合実験装置であれば、実験サイクル後に交換することでこれらの問題は軽減される。しかし、ITERを始め将来の核融合炉においては、炉内構造物の交換は頻繁に行うことはできないため、受動的・能動的な手法で鏡表面状態を良好に保って反射率の低下を抑制し、反射鏡の長寿命化を図る必要がある。

その方策としては、①適切なミラー材料の選定と使用条件の最適化、②構造的に表面損傷・堆積を「受動的に」抑制する工夫を図る、③堆積物については能動的な堆積抑制や表面クリーニング、が挙げられる。これら広範に亘るR&Dは、ITPAの計測トピカルグループ内の専門家ワーク

ンググループで組織的に行われている[26]。

まず、①のミラー材料としては、表面損傷を抑制するという観点からスパッタリング率が低いMoやWが挙げられる。図5に示すように、LHDにおいてもMoミラーの反射率はほとんど劣化していない。多結晶金属の場合は結晶方位によってスパッタリング率が異なるため、スパッタを受けた際に表面に結晶構造に応じた凹凸が生じる。そのため、単結晶金属の方が好ましく、実験的にも単結晶構造の方が多結晶構造の場合よりも紫外～近赤外領域で反射率の低下が小さいことが確認されている[27]。現在、単結晶Moでの大口径ミラー製法の研究開発等が進められている[28]。この他、最近ではスパッタリング率の低いRhをコーティングする研究開発が行われている[29]。鏡表面への炭素堆積の抑制に関しては、ミラー温度が重要な要素の一つとなる。堆積した炭素は、水素原子の化学スパッタリングによって炭化水素として除去できる。化学スパッタリング率は温度依存性を持ち、数百度で最大となるため、使用温度条件の最適化により、炭素不純物の堆積を抑制できる可能性がある[30]。

次に、②の構造的な工夫として、反射鏡に保護円筒を取り付けたり、計測ダクトの奥に反射鏡を設置したりして、受動的に表面損傷・不純物堆積を抑制することが挙げられる。これにより、飛来する荷電交換粒子やプラズマを減少させることができる。しかし、単純な保護円筒だと、円筒内部に荷電交換粒子が衝突した際に不純物が叩き出され、鏡表面にそれが堆積するなど、逆に不純物源となる弊害もある。円筒材にスパッタリング率が低い材料を用いたとしても、炭素等の不純物がその表面に堆積し、それが再びスパッタされるため、材料の選定だけでは不十分である。そのため、保護円筒構造として、円筒内壁にフィン構造を取り付け、スパッタされた粒子の輸送を妨げることやコーン形状の保護構造が提案されている。それぞれ、LHD、HL-2Aにてその有用性が実証されている[31, 32]。不純物堆積の抑制は、三面鏡構造のリトロ反射鏡（コーナーキューブミラー）で特に重要である。リトロ反射鏡は窪んだ構造をしているために、一旦不純物が鏡表面に堆積すると、荷電交換粒子やプラズマ粒子によるスパッタリングによって不純物がミラー中心部に向かって輸送され、ミラーの外に出ることなく厚い不純物堆積層が形成される。例えば、LHDで4カ月間使用したリトロ反射鏡の中心部には、厚さ2μm程度の堆積層が観測され、赤外領域でも大きな反射率低下を引き起こした[22, 23]。したがって、不純物や、スパッタして不純物を中心に輸送させるプラズマの粒子が直接飛来することを抑制する必要がある。そのため、フィン付き円筒を折り曲げた構造も提案されている[31, 33]。ミラー損傷・堆積物抑制を効果的にするため、保護円筒の口径/長さ比の最適化等[34]も課題であり、実験とモデリングの両面から開発していくことが不可欠である。不純物が落ち込まないように、リトロ反射鏡の前面に窓材を置くことも提案されている[33]。このように、堆積物の受動的抑制については、様々な工夫の余地が残されている。

③の能動的な堆積抑制やクリーニングとしては、②でも

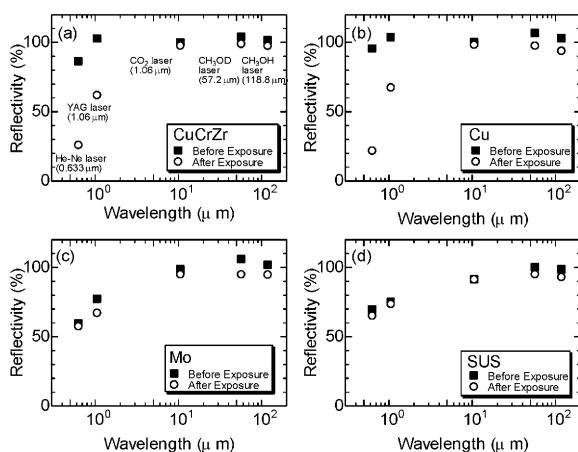


図5 LHD真空容器内に設置したミラー（4つの材質）の実験サイクル開始前後の反射率。(a)CuCrZr合金、(b)Cu、(c)多結晶Mo、(d)SUS316。

触れた化学スパッタリングを利用する方法と、高いエネルギー密度を持つレーザー光を用いた手法が検討されている。前者に関しては、堆積物が炭素不純物の場合、ミラーを高温にしたり、化学スパッタリングに寄与する水素（重水素）ガスをミラー近傍から積極的に供給したりして反応率を高め、堆積の緩和やクリーニング効果を高める原理実証的な実験が TEXTOR[35]や DIII-D[30]にて行われている。ただし、ITER 等の環境下で、炭素堆積量に対し化学スパッタリングによる除去が追いつくかどうか、主放電に影響を及ぼさない程度で供給するガス量を最適化できるか、主放電以外に別途クリーニングのための放電が必要かどうか等、クリーニング手法として確立できるか十分な検証が必要である。また、高温にすることは、バルク・不純物の金属原子と炭素が結合して炭化物を形成することを促す効果もあり、この場合は炭素の除去が困難になる。形成される炭素不純物堆積層の組成・結合状態に対する化学スパッタリング効果の大きさについても、更なる研究の余地がある。化学スパッタリングでは金属不純物や ITER の第一壁に由来する Be には効果がない。Be は炭素のように炭化水素の形で除去できないばかりか、炭素の化学スパッタリング率も低下させるため、炭素の除去にも弊害をもたらす。それらは物理スパッタリングによる除去が考えられ、高いエネルギー密度を持つレーザーによるクリーニングが候補になる。現在、実験室レベルで、母材に損傷を与えずに堆積物だけスパッタさせるためのレーザーエネルギー密度や繰り返しの最適化が行われている[36, 37]。また、ヘリウム入射によって表層に発生したバブルに対し、ある閾値以上のエネルギーのパルスレーザー光を照射することで再結晶化させ、バブルを消失できることが報告されている[38]。これらレーザーを用いた能動的なクリーニング方法については、堆積物、母材に応じて適切なエネルギー密度で照射することが不可欠である。また、光ファイバ等で核融合炉内にレーザー光を導入すると予想されるが、遠隔操作の R & D などは今後の課題である。できる限り、堆積が優勢な領域に第一ミラーを置くことは避け、正味の堆積が起こりにくい場所、若しくは②で議論したような堆積を抑制する条件に整えた上で損耗に強いミラー材を用い、わずかに生じた堆積に対して上記のクリーニングを実施するということが肝要だと考えられる。

4.1.5 おわりに

ITER およびそれ以降の核融合炉での電子密度計測法の課題と、それに向けた現在の開発状況について概説した。干渉計などによる電子密度計測は古くから行われてきたので、既に確立した手法と考えられがちだが、定常運転、高い放射線環境という条件のため、将来も高い精度・信頼性を担保できるとは限らない。そのため、偏光計やディスペーション干渉計等の研究開発が進められており、既存の装置でその有用性が示されつつある。また、真空容器内反射鏡の性能維持も大きな課題であり、材料開発・構造の工

夫・クリーニング方法の確立など、いくつかの視点からの研究開発が盛んに進められている。

謝 辞

本節を執筆するにあたり、第一ミラーの課題に関して大変有用な議論・コメントを下された九州大学の吉田直亮教授、レーザー計測に関して議論・コメントを下された核融合科学研究所の川端一男教授に心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] A.J.H. Donné *et al.*, Nucl. Fusion **47**, S337 (2007).
- [2] T. Akiyama *et al.*, Fusion Sci. Tech. **58**, 352 (2010).
- [3] K. Kawahata *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **70**, 707 (1999).
- [4] T. Akiyama *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **78**, 103501 (2007).
- [5] Y. Kawano *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **72**, 1068 (2001).
- [6] T. Akiyama *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **74**, 1638 (2003).
- [7] M.A. VanZeeland *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10E719 (2008).
- [8] V.F. Shevchenko *et al.*, Plasma Phys. Rep. **22**, 28 (1996).
- [9] Ch. Fuchs and H.J. Hartfuss, Phys. Rev. Lett. **81**, 1626 (1998).
- [10] T. Akiyama *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **77**, 10F118 (2006).
- [11] G. Braithwaite *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **60**, 2825 (1989).
- [12] A.J. H. Donné *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **75**, 4694 (2004).
- [13] S.E. Segre, Phys. Plasmas **2**, 2908 (1995).
- [14] F.A. Hopf *et al.*, Opt. Lett. **5**, 386 (1980).
- [15] V.P. Drachev *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **64**, 1010 (1993).
- [16] P.A. Bagryansky *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **77**, 053501 (2006).
- [17] A. Lizunov *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 10E708 (2008).
- [18] T. Akiyama *et al.*, Plasma Fusion Res. **5**, S1041 (2010).
- [19] T. Akiyama *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **81**, 10D501 (2010).
- [20] T. Akiyama *et al.*, Plasma Fusion Res. **5**, 047 (2010).
- [21] R. König *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **81**, 10E133 (2010).
- [22] T. Akiyama *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **78**, 103501 (2007).
- [23] N. Yoshida *et al.*, Proc. 22nd Int. Conf. on Fusion Energy (2008) FT/2-1.
- [24] V.S. Voitosenya *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **76**, 083502 (2005).
- [25] A. Ebihara *et al.*, J. Nucl. Mater. **363-365**, 1195 (2007).
- [26] A. Litnovsky *et al.*, IAEA-FEC, Korea, ITR/P1-05 (2010).
- [27] V.S. Voitosenya *et al.*, J. Nucl. Mater. **290-293**, 336 (2001).
- [28] A. Litnovsky *et al.*, Nucl. Fusion **49**, 075014 (2009).
- [29] L. Marot *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **78**, 103507 (2007).
- [30] D.L. Rudakov *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **77**, 10F126 (2006).
- [31] N. Yoshida *et al.*, 13th ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics, Chengdu, China, October 29 - November 2, 2007.
- [32] Y. Zhou *et al.*, 12th ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics, Princeton, USA, March 26-30, 2007.
- [33] T. Akiyama *et al.*, 18th ITPA Topical Group Meeting on Diagnostics Meeting, Oak Ridge, USA, May 11 - 14, 2010.
- [34] A. Litnovsky *et al.*, Proc. 23rd Int. Conf. on Fusion Energy (2010) ITR P1-05.
- [35] A. Litnovsky *et al.*, J. Nucl. Mater. **363-365**, 1395 (2007).
- [36] E. Mukhin *et al.*, Nucl. Fusion **49**, 085032 (2009).
- [37] Y. Zhou *et al.*, J. Nucl. Mater., in press.
- [38] S. Kajita *et al.*, J. Nucl. Fusion **47**, 1358 (2010).