



解説

速波干渉・反射計による密度計測の新展開

New Developments of Density Measurement by Fast Wave Interferometer/Reflectometer

秋山毅志

AKIYAMA Tsuyoshi

General Atomics

(原稿受付：2022年5月29日)

速波干渉計・反射計はそれぞれプラズマ中の荷電粒子の質量密度、水素同位体密度比を計測することができる。探査波の周波数帯は10–100 MHz程度であり、真空容器内に設置する伝送系は光学系ではなくアンテナ等になる。これらはプラズマによる損耗・不純物堆積、高い放射線や温度変化の影響も受けにくいという長所がある。そのため、多くの計測器にとって過酷な環境となる将来の核融合炉でも、その利用が可能と考えられている。速波干渉・反射計は、DIII-Dにて原理検証がなされた後、更に性能向上の改良が進められ、現在揺動計測などの新しい試みも行われている。本解説では、速波干渉計・反射計の計測原理やこれまでの計測結果を紹介し、将来の核融合炉への展望と今後取り組むべき課題について解説する。

Keywords:

fast wave, Alfvén velocity, mass density, isotope ratio, interferometer, reflectometer, DEMO reactor

1. はじめに

将来の核融合炉は、高い放射線量やプラズマによる損耗・不純物堆積、高い炉内機器温度など、計測器を含む多くの機器にとって過酷な環境となる。更に、炉の経済的な観点から炉内機器は頻繁には交換できないため、過酷な環境下でも寿命が十分長いものが求められる。そのため、現在の核融合プラズマ実験装置で使用されている計測器は、そのすべてが核融合炉で使用できるわけではなく、かなり限定されることが予想される[1, 2]。その一方で、核燃焼を制御して定められた核融合出力を維持し、かつ安全に核融合炉を運転するのに十分な計測機器を備える必要がある。

プラズマを所定の運転領域に設定する上で、燃料ガス供給は重要なアクチュエーターの一つである。プラズマ中の平均的な電子もしくはイオンの密度は、燃料ガス供給量の制御参照信号として不可欠であり、現在でもレーザー干渉計による線平均電子密度がその役割を担っている。また、核燃焼を開始・維持するためには、重水素・三重水素の比を制御することも必要となる。現在の装置では、核燃焼維持ではなく、水素同位体比がプラズマ性能に与える影響を調べる物理研究が主眼で、目的は少し異なるが、同位体比の測定にHaとDaの発光強度比や中性粒子分析装置(Neutral Particle Analyzer: NPA)が用いられてきた。

しかし将来の核融合炉では、これらの計測器の使用に幾つかの懸念が指摘されている。レーザー干渉計は伝送用ミラーを炉内にもある程度設置せざるを得ないが、プラズマや荷電交換粒子による損耗や不純物の堆積により、炉内ミ

ラーの表面に凹凸が生じる可能性がある。レーザー光の波長は短いため、数 μm 以下の僅かな凹凸でも反射率が低下し、長期間使用していると、最終的には計測に必要なレーザー光量が確保できず、計測不能になることが懸念されている。また、HaとDaの発光強度比やNPAによる同位体比計測は、周辺プラズマでの同位体比の情報が主であり、核融合反応が起こる高温の中心領域での水素同位体比が得られにくいという課題もある。

速波を利用した干渉・反射計は、上記の課題を解決できる可能性を持つ。これらは、周波数が凡そ10–100 MHzの電磁波をプラズマに入射し、透過した電磁波の位相変化、もしくは反射された電磁波の位相変化を計測することで、それぞれ荷電粒子の質量密度の線平均値、同位体比を計測する。速波の伝送にはミラーは使用せず、真空容器の内外で導波管もしくは同軸ケーブルで伝送させる。そのため、レーザー干渉計で懸念事項である炉内での反射率低下の問題はない。ルーブアンテナなどの炉内機器は、高い放射線や運転温度等での性能劣化は少ないと考えられ、そのため保守交換の必要性も低いと考えられる。反射計は局所計測であり、適切な周波数を選ぶことで、プラズマ中心部を含む任意の空間位置で同位体比を直接計測することができる。周波数掃引や複数の周波数を同時入射することで、同位体比の径方向分布を得ることも可能である。上記のような利点から、ITER建設やDEMO炉設計に向け、核融合炉環境下にも適合する燃焼制御用計測器として、速波干渉・反射計の有用性が指摘されてきた[3, 4]。

General Atomics, P.O. Box 85608 San Diego, CA 92186-5608, USA

author's e-mail: akiyamat@fusion.gat.com

本解説では、第2章にて速波干渉計・反射計の計測原理を紹介し、第3章では近年のデータも含めたDIII-Dでの試験結果を示す。第4章では将来の核融合炉での利用に向けた課題とまとめを述べる。

2. 速波干渉・反射計の原理

簡単のため、ここでは冷たいプラズマモデルを使用すると、磁力線に垂直に伝搬する波の屈折率 n_{\perp} は、プラズマの分散式[5]から導出される

$$n_{\perp}^2 = \frac{RL}{S}, \quad n_{\perp}^2 = P \quad (1)$$

で与えられる。ここで、

$$R \equiv 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega(\omega + \Omega_s)}$$

$$L \equiv 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega(\omega - \Omega_s)}$$

$$S \equiv \frac{1}{2}(R+L), \quad P \equiv 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega^2}$$

であり、 s 種の荷電粒子がプラズマ中に含まれているとする。 ω_{ps} 、 Ω_s はそれぞれ粒子 s のプラズマ周波数、サイクロトロン周波数である。ここで、 Ω_s は符号を含む値であり、電子及びイオンサイクロトロン周波数は、それぞれ $\Omega_e = -|\Omega_e|$ 、 $\Omega_i = +|\Omega_i|$ であることに注意されたい。

2.1 速波干渉計の原理

速波干渉計は、プラズマの屈折率をもつ密度依存性を利用し、速波がプラズマを透過することで生じる位相変化から密度を求める。この点では、広く知られているレーザー干渉計やミリ波干渉計の原理[6]と同一である。しかし、速波のプラズマ中での位相速度の近似式がレーザー光やミリ波の場合と異なるため、最終的な位相変化と密度の関係は両者で異なる。速波干渉計で計測される位相変化 ϕ は、

$$\begin{aligned} \phi &= \int_0^l (k_p - k_0) ds = \frac{\omega}{c} \int_0^l (n_{\perp} - 1) ds \\ &\sim \frac{\omega}{c} \int_0^l n_{\perp} ds = \frac{\omega}{c} \int_0^l \frac{c}{v} ds \quad (2) \end{aligned}$$

で与えられる。式(2)中の近似は、速波領域での屈折率が1より十分大きいことによる。ここで、 l はプラズマ中での電磁波の光路長、 k_p 、 k_0 はプラズマ、及び真空中での波数、 ω は入射波周波数、 c は光速、 $v (= c/n_{\perp})$ はプラズマ中での電磁波の位相速度である。速波の領域では、プラズマ中の位相速度 v がAlfvén速度 V_A で良く近似できることが知られている[5]。Alfvén速度 V_A は

$$V_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \sum_s m_s n_s}} \quad (3)$$

で与えられ、 B は磁場強度、 μ_0 は真空の透磁率、 m_s 及び n_s はプラズマ中に含まれる荷電粒子の質量及び密度である。 $m_s n_s$ は質量密度と呼ばれる。図1に、式(1)及び式(3)から得られる位相速度を示す。凡そ100 MHz程度ま

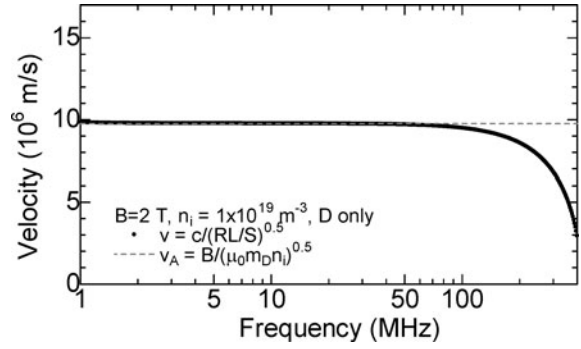


図1 重水素プラズマ中での位相速度。プラズマの分散式から得られた位相速度(実線)と、Alfvén速度(破線)を示す。

で、Alfvén速度が位相速度の良い近似値となることがわかる。そのため、Alfvén速度近似を用いて式(2)は簡略化でき、速波干渉計で測定される位相変化と線平均質量密度の関係が以下のように得られる[7]。

$$\sum_s m_s \bar{n}_s = \frac{(\overline{B\phi})^2}{\mu_0 (\omega l)^2} \quad (4)$$

また、式(4)より、位相変化の揺動成分は、粒子密度及び磁場の揺動成分に起因することがわかる。

2.2 速波反射計の原理

電磁波の反射(カットオフ)、または吸収は、それぞれ屈折率 $n = 0$ 、または ∞ にて起こるが、式(1)によると、単一イオン種の場合はコアの閉じ込め領域にカットオフ層は現れない。しかし、水素/重水素混合プラズマのように、2種類以上のイオン種が含まれる場合は、カットオフ層、及び共鳴層が現れる。これらはイオン-イオン混成カットオフ層(ion-ion hybrid cutoff layer)、イオン-イオン混成共鳴層(ion-ion hybrid resonance layer)と呼ばれる。反射条件は式(1)にて $L = 0$ により満たされ、例えば水素/重水素プラズマの場合、カットオフ周波数 ω_{cutoff} は

$$\omega_{\text{cutoff}} = \left(1 - \frac{1}{2} f_H\right) \Omega_H$$

$$f_H = \frac{n_H}{n_H + n_D}$$

で与えられる[8]。ここで Ω_H は水素イオンのサイクロトロン周波数である。なお、共鳴周波数 $\omega_{\text{resonance}}$ は

$$\omega_{\text{resonance}} = \sqrt{\frac{1 - f_H/2}{1 + f_H}} \Omega_H$$

となる[8]。これらをトーラスプラズマでの典型的な条件で図示したのが図2である。カットオフ及び吸収層は、水素、重水素イオンのサイクロトロン周波数に挟まれる領域に現れる。特定の入射周波数に対するカットオフ層の径方向位置は、同位体密度比 f_H によって変化する。そのため、反射波の位相を測定することで、その周波数のカットオフ層の径方向位置が同定でき、それにより同位体比を求めることができる。周波数掃引や複数の周波数を同時入射することで、同位体比の空間分布を求めることも可能であ

る。強磁場側、弱磁場側両方から計測すること[8]は、分布計測を行う上で有益である。なお、強磁場側から入射した探査波は、図2からわかるように反射層手前の吸収層で減衰を受ける。そのため、強磁場側からの計測には、減衰を考慮した入射パワーが望ましい。

この章では、冷たいプラズマモデルに基づいた議論を行った。有限の温度のプラズマでは、速波干渉・反射計に対して考慮すべき熱的な効果は、サイクロトロン共鳴での吸収の可能性である。しかし、偏光が異なることから、その効果は十分小さいと考えられる。

3. 速波干渉・反射計による密度計測の進展と展望

速波干渉・反射計は、DIII-Dにて開発がなされてきた。速波干渉計による密度計測は、Ikezi等によって実証された後[9]、Heidbrink, Watson等が更に開発を進めた[7]。Ikezi等は、反射計によって同位体比測定が可能なることも指摘し[3]、Heidbrink, Watsonがその実証に成功して[8] ITERでの利用を提唱した[4]。現在、筆者らが速波干渉・反射計の開発を進め、計測器としての特性の理解を深めるとともに、信頼性や付加価値の向上を図っている[10]。

3.1 速波干渉計

図3(a)にDIII-Dでの計測視線、及び真空容器内のアンテナ配置を示す。現在、DIII-Dでは二系統の計測が可能であり、一つは送信・受信にループアンテナを用いる垂直視線、もう一つはより大きな電力を入射できる加熱・電流駆動用速波アンテナを用いた斜め視線である。探査波周波数は、60 MHz程度である。この周波数帯は、第2章で議論したように、プラズマ中の速度がAlfvén速度で良く近似ができると同時に、水素/重水素混在プラズマでもカットオフが無いように、水素のイオンサイクロトロン周波数以上となるようにしている(図2)。図3(b)に示すように、干渉計としては標準的なヘテロダイン干渉計である。中間周波数を5 MHzとし、探査波と参照波との間の位相差をIQ復調器もしくはdigital demodulation[11]を用いて計測している。

近年のDIII-Dでの密度計測結果を図4に示す。図4(a)は、水素放電にて速波干渉計で測定した質量密度を水素イオン質量で割った値と、CO₂ レーザ干渉計[12]で測定し

た線平均電子密度の比較である。質量密度には不純物の寄与があり、DIII-Dでは第一壁に起因する炭素イオンが主と考えられる。不純物が少なく、実効電荷数 Z_{eff} が1に近い状況であれば、質量密度を主イオン質量で割った値が、電子密度のように主イオン密度の指標となる。ただし、不純物が無視できない場合は、主イオン密度からの差異が大きくなる。この場合、主要な不純物イオンを単一種と近似できるならば、参考文献[10]に示されるように、 Z_{eff} を用いて主イオン密度を評価することができる。このようにして、質量密度と Z_{eff} 、及び電子密度と Z_{eff} から評価した主イオン密度を比較したのが図4(b)である。両者がよく一致していることから、速波干渉計の計測値が妥当であることがわかる。

このことは逆に、質量密度と電子密度の計測から、 Z_{eff}

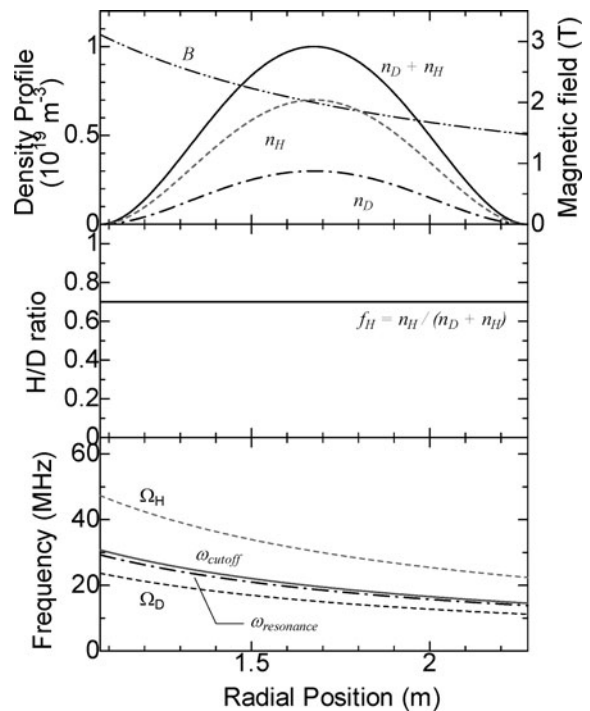


図2 中心磁場2 Tのトカマク装置におけるイオン-イオン混成カットオフ周波数 ω_{cutoff} 、イオン-イオン混成共鳴周波数 $\omega_{resonance}$ の径方向分布を示す。水素密度と重水素密度の分布形状は等しく、密度比を D:H = 3:7 とする。

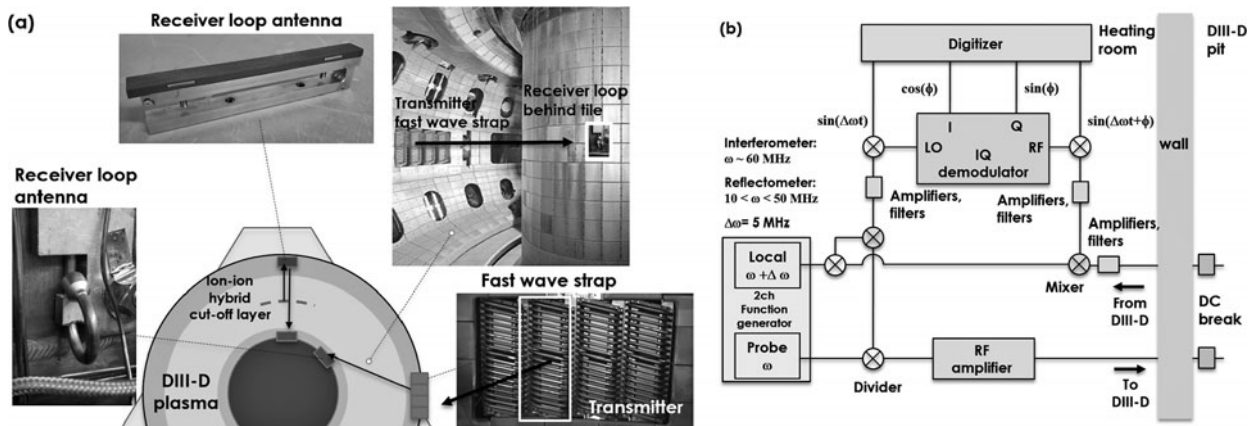


図3 DIII-Dにおける(a)速波干渉計・反射計のRFアンテナとその配置図、(b)干渉計・反射計の構成図。

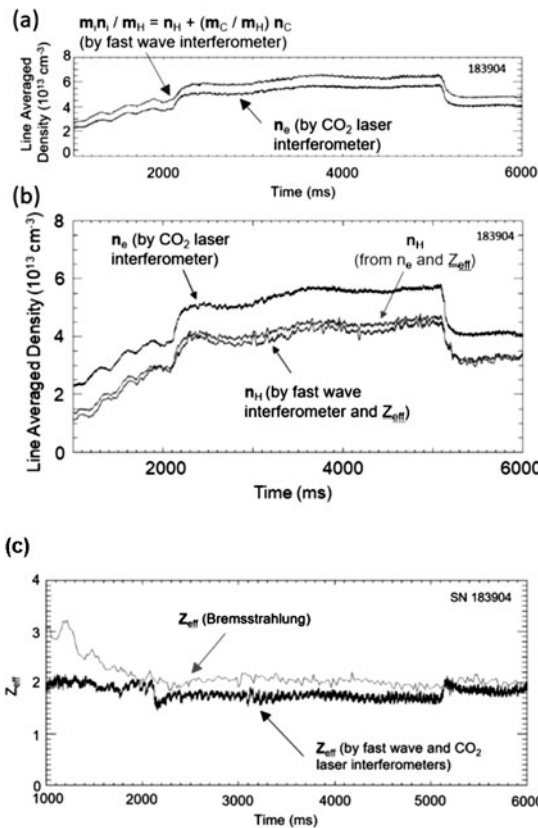


図4 DIII-Dでの速波干渉計計測結果。(a)速波干渉計で計測した質量密度を水素イオン質量で割った値とCO₂レーザー干渉計で計測した線平均電子密度。(b)質量密度または電子密度と実効電荷数Z_{eff}から求めた水素イオン密度。(c)質量密度及び電子密度、またはBremsstrahlungから求めたZ_{eff}(参考文献[10] T. Akiyama *et al.*, "Fast wave interferometer for ion density measurement on DIII-D", JINST 17, C 01052, published on January 17, 2022 より Fig.3 及び 4 を引用。© IOP Publishing Ltd and Sissa Medialab. Reproduced by permission of IOP Publishing. All rights reserved).

の評価が可能であることも示唆している。それを実証したのが図4(c)である[10]。可視Bremsstrahlung光計測[13]で評価したZ_{eff}と比較して、放電初期に見られる差異は現在検討中であるが、後半は比較的良い一致を示している。速波干渉計とレーザー干渉計の併用は、代替的なZ_{eff}の評価方法となり得ることが示されている。

速波干渉計による密度計測の帯域は、中間周波数や位相抽出手法などによって決まるが、100 kHz から MHz 程度の帯域が期待できる。そのため、速波干渉計は揺動計測にも利用でき、DIII-D での一例を図5に示す。ここで、2.1章で指摘したように、速波干渉計で測定する位相変化は密度だけでなく磁場強度にも依存するため、計測される揺動は両者の揺動成分を含むことになる。本放電では、時間的に周波数が変化する連続的揺動成分と、 $t=3.51\sim 3.58$ s 及び $t=3.65\sim 3.72$ s にて、3次程度までの高調波成分を伴う突発的な揺動成分を計測することができている。なお、本実験はELMy H-mode放電であり、100 kHz程度まで広がるスペクトルはELMによるものである。

3.2 速波反射計

DIII-Dでは、幾つかの計測器で同位体比の計測が可能で

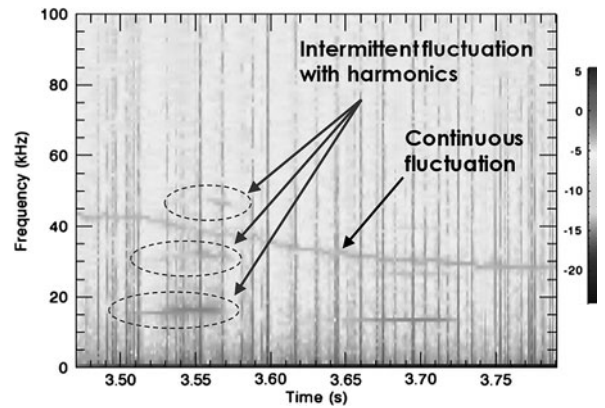


図5 DIII-Dの速波干渉計で計測した位相変化のスペクトル。100 kHzまで広がる広帯域のスペクトルは、ELMによるものである。

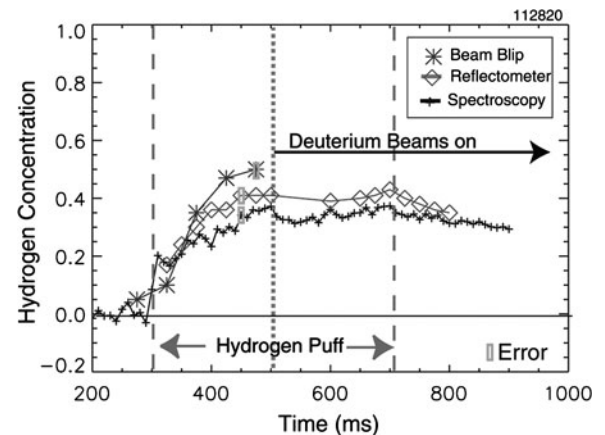


図6 速波反射計、分光計測、及びBeam blip法にて計測した水素同位体密度比(参考文献[8] G.W. Watson *et al.*, "Plasma species mix diagnostic using ion-ion hybrid layer reflectometry", Plasma Phys. Control. Fusion 46, 471, published on 4 February, 2004 より Fig.14 を引用。© IOP Publishing. Reproduced with permission. All rights reserved).

ある。それらと比較検討することで新しい同位体計測器の実証実験や特性を理解でき、計測器開発の非常に良いプラットフォームになっている。図6は、DIII-Dでの速波反射計の原理検証実験結果であり、Ha/Da可視分光、及びBeam blip法で評価した同位体比と比較を行っている[8]。この放電では、重水素プラズマに $t=300$ msより水素ガスパフを行い、放電中に同位体比を変化させている。本放電で使用した送信・受信アンテナは、弱磁場側の赤道面付近で垂直方向に離して設置したループアンテナであり、入射電力・周波数はそれぞれ20 mW、19.5 MHzであった。図2からわかるように、弱磁場側からの入射では、イオンイオン混成カットオフ層はアンテナから見て共鳴層の手前にあるため、プラズマ中での入射波の大きな減衰は避けることができる。なお、強磁場側に設置された同様なループアンテナを用いた際は、予測された通り受信波の減衰が観測されている[8]。本放電では、いずれの計測でも水素ガスパフ開始後に水素の密度比が増大し始め、その後重水素ビーム入射に伴う重水素供給によって頭打ちとなることが観測されている。速波反射計及び可視分光では、水素ガスパフ停止後、徐々に水素密度比が減少する様子が測定でき

ている。これらの計測器は計測位置が異なっており、可視分光と Beam blip 法はそれぞれ周辺プラズマ、コアプラズマでの同位体比を反映している。入射周波数が 19.5 MHz で重水素密度の方が高い場合は、速波反射計は上記計測器計測位置の中間領域を計測している。速波反射計で計測された同位体比は、可視分光と Beam blip 法で測定された同位体比の中間程度となっており、速波反射計の結果は概ね妥当であろうと考えられている。

3.3 速波計測の展望

Ikezi 等が DIII-D にて速波干渉計・反射計を提唱・実証したのは90年代後半であった。当時、既に他の計測器で線平均密度や同位体比が計測できており、耐放射線などの速波計測の利点が生かされるような状況ではなかった。しかし、原型炉の設計が進む現在、速波計測は将来の核融合炉での計測として大きな魅力を持つに至っている。

現在電子密度計測の主流であるレーザー干渉計は、引き続き将来の核融合炉でも有力な計測器と考えられている [1, 2]。しかし、第1章で概説した通り、炉内ミラーの反射率の低下により、長期的な使用では計測の継続が困難になることが懸念されている。これに対して、第一ミラー設置位置の工夫など工学的なアプローチで問題を回避することが模索されている [1] が、速波を利用することでそもそもミラーを使う必要がなくなり、根本的な解決を図ることができる。そのため、速波干渉計は長期間に亘ってメンテナンスの必要性が少ない計測器となり得る。これらの利点は現在の装置ではあまり重要視されないが、経済性の観点から炉を頻繁に停止して劣化した炉内機器を交換できない核融合炉では、非常に大きな利点となる。

また、ITER も含めた将来の核融合炉で、レーザー計測で必須技術の一つが、信頼性の高いレーザー光軸の帰還制御である。巨大な装置ではレーザー光の伝送距離が長くなり、光学素子の機械振動による光軸の変動が大きな問題となる。それに加え、装置本体や内部の光学素子の熱的な変形による光軸変化も、ITER 以降は無視できなくなる。ITER の Toroidal Interferometer Polarimeter (TIP) では、レーザー光の位置センサーとピエゾ素子制御ミラーマウントからなるレーザー光軸の帰還制御システムを開発している [14]。一方、ループアンテナから放射される速波は大きく広がって伝送するため、装置の熱変形による多少のアンテナ位置の変化は、プラズマ透過波を受信する上であまり問題とならない。ITER の計測開発によってレーザー光の帰還制御技術が進んでいるとは言え、速波計測のように機械振動や熱変形の影響を受けにくい計測器は、装置設計を容易にし、制御機器の故障など潜在的なリスクを避ける上で有益な選択肢である。

速波反射計で計測される同位体比は、核融合出力を決めるパラメータの一つであり、核融合炉では制御対象と考えられている。同位体比の計測法としては、前述の Beam blip 法や可視分光 ($D\alpha$, $T\alpha$) に加え、バルク荷電交換分光 [15] や ITER でも計画されている NPA や中性子スペクトルメータがある。核燃焼制御の上では、燃焼が起こるプラズマ中心付近での同位体比計測が望ましく、また定常炉を考える

上で計測のための中性粒子ビーム入射が不用である方がよい。2.2章で議論した通り、速波反射計は周波数掃引や複数の周波数の同時入射によって、プラズマ全体で同位体比の分布を得ることができる。中性粒子ビーム入射も不要で探査波の定常的な入射にも問題が無い。そのため、速波反射計は幾つかの同位体比計測法の中でも定常核融合炉に適した手法と言える。

将来の核融合炉においても、速波計測に必要な炉内機器は、DIII-D での原理検証実験と同じく、送受信に二つのループアンテナと導波管/同軸ケーブルだけである。炉内で占める体積・面積が少ないことは、炉設計にも適合しやすく、三重水素増殖ブランケットの設置を妨げにくいという観点からも非常に望ましい。得られるデータの重要性に比して、炉内機器設計が容易なことも、核融合炉用計測器としての大きな利点と言える。

なお、ITER での速波干渉計・反射計を考えるならば (中心磁場を 5.3 T とする)、干渉計にはカットオフを避けるために重水素イオンサイクロトロン周波数より高い凡そ 70 MHz 以上、反射計には重水素・三重水素のイオンサイクロトロン周波数に挟まれた 20–60 MHz が適しているであろう。周波数帯は既存の速波干渉計・反射計とほぼ同程度であり、計測器設計に既存のシステムからのギャップは大きく無いと考えられる。

4. 課題とまとめ

速波計測は将来の核融合炉で多くの利点があることを述べてきたが、幾つかの課題が残っている。

良く指摘される課題の一つに、入射波とプラズマとの結合がある。速波によるプラズマ加熱や電流駆動では、アンテナから放射される波のプラズマへの結合が問題となる。一方、速波計測の受信や信号処理に必要な波の電力は大きくなく、高い効率も追及する必要がない。そのため、本課題は低い結合効率を考慮して入射電力を決めたり、受信アンテナの工夫で解決ができる。DIII-D では、図 4、図 6 の垂直視線の実験では、計測用ループアンテナに送信した電力は 20 mW 程度であり、より大電力を扱える加熱用速波アンテナを用いた図 5 の斜め視線の実験でも 20 W 程度の電力で計測が可能であった。加熱のために通常入射される電力を考えると、核融合炉においても計測に必要な電力を入射することは容易であると考えられる。

なお、入射電力及び周波数を検討する際、周波数帯に近い ICRF 加熱やプラズマからの放射を考慮する必要がある。加熱電力は非常に大きいため、それらを受信した場合はアンブ等の破損が予想されるうえ、大きなノイズ源となる。プラズマからのイオンサイクロトロン放射 (Ion Cyclotron Emission: ICE) 等の周波数帯は数十 MHz であり、速波計測と周波数が近いため、これもノイズ源となりうる。そのため、これらの周波数を避けて入射周波数を決定したり、適切なフィルターを組み込んだりする必要がある。

3.1章では DIII-D での軽水素単一放電での計測結果を示し、得られたイオン質量密度から Z_{eff} を考慮して線平均イオン密度を導出した。これは主に、速波干渉計の計測結果

が妥当であることを確認するためである。将来的には、質量密度が直接プラズマ制御に使用されるのが望ましい。核融合炉では重水素と三重水素の混合プラズマであるため、質量密度は同位体比にも依存する。一方、現在の実験装置と異なり、核融合炉では運転パラメータ領域は限定され、パラメータ間の相関も良く理解されていると考えられる。そのような状況下で、質量密度を使った有効な制御方法を確立することが望まれる。この際、速波反射計などの他の計測器のデータや synthetic diagnostic [16]などを併用することも助けになるであろう。これは、これまでのプラズマの計測制御では一般的な考えではないが、実は速波計測に限ったことではない。1章でも述べたように、核融合炉は計測にとって厳しい環境となり、従来の計測値が必ずしも得られるとは限らない。例えば、レーザー干渉計で計測される位相変化は、核融合炉では電子密度だけでなく、相対論効果のため電子温度にも依存する。空間的にも時間的にも、核融合炉では得られる計測データが限られてくる。そのため、核融合炉で実装可能であれば、質量密度のようなこれまで物理研究ではあまり使われてこなかった計測値や、近似的・代替的な計測値の活用、実時間シミュレーションと併用していくことが、核融合炉での計装制御の課題を解決するブレイクスルーになっていくであろう。

前述の相対論的效果については、ITERの運転開始に向け、電子密度を計測するレーザー干渉計や偏光計では、温度項を含めた位相変化やファラデー回転角変化が既に導出されている [17]。イオンを反映する速波計測では、相対論効果がどの程度影響するか興味深いところであり、同様な解析が待たれる。

本解説では、速波を用いた干渉計測・反射計測の原理と開発の歴史、そして将来の展望を概説した。将来の核融合装置の過酷な環境では、計測に求められる要求は現在の計測とは異なり、寿命やメンテナンスが容易であることなどが重要になる。速波計測はそれらに良く適合することから、核融合炉の計画や設計が世界中で盛んになるにつれ、注目度が高まっている。DIII-Dにて核融合炉に向けた性能評価が継続的に進められているが、今後、他の装置へ普及

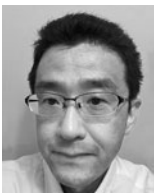
してより多くの知見が蓄積されると共に、核融合炉へ向けた設計検討が進むことが望まれる。

謝 辞

速波計測の開発や本解説の執筆にあたり、有益な議論を行った R.L. Boivin 博士, W.W. Heidbrink 博士, M.A. Van Zeeland 博士, R.I. Pinsker 博士, B. Coriton 博士に感謝致します。本解説の企画、及び執筆にあたり多くのご助言を下さった大谷芳明博士に感謝申し上げます。速波干渉・反射計の開発は、General Atomics Internal R&D, U.S. DOE under Grant Nos. DE-FC02-04ER54698 and DE-SC0020337, US DOE subcontract SC-G903402 of US DOE contract DE-AC 03-99ER54463 によってなされました。

参考文献

- [1] W. Biel *et al.*, Fusion Eng. Des. **146**, 465 (2019).
- [2] F.P. Orsitto *et al.*, Nucl. Fusion **56**, 026009 (2016).
- [3] H. Ikezi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **68**, 478 (1997).
- [4] W.W. Heidbrink *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3862 (2004).
- [5] T.H. Stix, *Waves in plasmas* (American Institute of Physics, New York, 1992), p9.
- [6] D. Veron, *in Infrared and Millimeter Waves* (Academic, New York, 1979), Vol. 2, p67-135.
- [7] G. Watson and W.W. Heidbrink, Rev. Sci. Instrum. **74**, 1605 (2003).
- [8] G.W. Watson and W.W. Heidbrink, Plasma Phys. Control. Fusion **46**, 471 (2004).
- [9] H. Ikezi *et al.*, Phys. Plasma **3**, 2306 (1996).
- [10] T. Akiyama *et al.*, JINST **17**, C01052 (2022).
- [11] D.W. Choi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **57**, 1989 (1986).
- [12] M.A. Van Zeeland and T.N. Carlstrom, Rev. Sci. Instrum. **75**, 3423 (2004).
- [13] D.P. Schissel *et al.*, Phys. Fluids **31**, 3738 (1988).
- [14] M.A. Van Zeeland *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **59**, 125005 (2017).
- [15] K. Ida *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **90**, 093503 (2019).
- [16] L. Shi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **87**, 11D303 (2016).
- [17] V.V. Mirnov *et al.*, Phys. Plasma **14**, 102105 (2007).



あき やま つよ し
秋山毅志

General Atomics Scientist. 2003年東京工業大学大学院・理工学研究科・原子核工学専攻修了, 博士(工学). 核融合科学研究所を経て2018年より現職. CHS, LHD等にて

レーザーやミリ波を用いた計測器の開発を行ってきました。レーザーとの勝手の違いに戸惑いつつ、現在は速波に手を広げています。