

氏名	谷池晃
学位（専攻分野）	博士（学術）
学位記番号	総研大甲第134号
学位授与の日付	平成7年3月23日
学位授与の要件	数物科学研究科 核融合科学専攻 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	The Study of Energy Loss Mechanism of a Gold Ion Beam on a Tandem Acceleration System
論文審査委員	主査 教授 藤田順治 教授 佐藤哲也 教授 濱田泰司 助教授 笹尾眞實子 助教授 森義治 助教授 俵博之 (核融合科学研究所)

論文内容の要旨

A heavy ion beam probe (HIBP) is used as a reliable method to measure a plasma potential and its fluctuation in a magnetically confined fusion plasma. A singly charged positive ion beam of mass about 200 amu with energy of 6 MeV is required in order to apply the HIBP to a large and strong magnetic field device such as the Large Helical Device (LHD) which is under construction at National Institute for Fusion Science, Japan. A primary beam with small energy spread and current larger than 10 μ A is required to measure the plasma potential as small as a few keV.

Among possible origins of the energy spread on a tandem acceleration system, the problems of the energy spread of negative ions produced in an ion source and the energy broadening caused in a charge stripping gas cell are studied experimentally and theoretically in the present work.

In order to study energy loss mechanism on a tandem acceleration system, a tandem acceleration test stand has been constructed, and the charge state fraction, the beam profiles and the beam energy spectrum of an Au^+ beam have been measured. The test stand consists of a negative gold ion source, a tandem acceleration system, a movable Faraday cup and an energy analyzer.

The energy spectrum of an Au^- beam extracted from the ion source has been measured. The energy width is less than 6 eV when Cs vapor is introduced to reduce the surface work function of the gold target. The dependence of the energy width on the work function is well explained by the theory of the surface production of a negative ion.

The energy shift between the primary negative ion beam and a positive ion beam converted in a gas cell at small gas thickness has been measured and found to be about 12 eV. The shift is caused by the two-electron loss process, and amounts to the sum of the electron affinity and the first ionization energy of the projectile.

Energy loss spectra of Au^+ ions produced from Au^- ions by electron stripping in He, Ar, Kr and Xe have been measured in the impact energy range from 24 to 44 keV, under the condition that the charge stripping gas thickness is thin enough so that the two-electron stripping process ($\text{Au}^- \rightarrow \text{Au}^+$) is dominant and the multiple collision processes are negligible. The full width at half maximum (FWHM) is typically 20 to 80 eV, and it increases with the impact energy. In general, a broader width is observed at the target of a lower mass number.

The energy broadening of the Au^+ beam is caused by elastic and/or inelastic loss processes. The amount of energy loss due to the elastic and the inelastic processes depends upon the impact parameter. The range of the impact parameter, which contributes to the energy loss spectrum is determined by the

apparatus geometry (b_{\min}) and by the necessary energy for charge stripping (b_{\max}). The sum of elastic and inelastic energy losses causes the energy broadening of an Au^+ beam. There is no significant contribution of the elastic energy loss to the energy broadening in the energy range in the present experiment (24 keV \sim 44 keV).

A simple model is proposed using the semi-classical internal energy transfer function of Firsov's and the scattering by the unified potential of Ziegler's. The theoretical prediction of the present model reproduces the energy and mass dependences of the broadening. However, the absolute values of the theoretically predicted width are much smaller than the measured widths. The present model predicts that the energy spectrum in the higher energy region saturates with a FWHM of less than 10 eV, and the target mass dependence disappears.

In the target density region that the multiple collision is not negligible, the energy straggling of a beam is generally explained by the L.S.S. (J. Lindhard, M. Scharff and H. E. Schiøtt) theory. In this theory, the squared energy straggling is given by an integral of the squared energy loss function over the impact parameter from zero to infinity. However, when an energy loss spectrum of a singly-charged component of a beam is measured at forward angle, the energy loss function in a small impact parameter region does not contribute to the straggling. Therefore, the lower limit of integral region is taken into account. It is determined by the minimum impact parameter, b_{\min} , or the impact parameter which corresponds to the inelastic energy transfer to produce an Au^{++} . Energy straggling of the present calculation is closer to the measured value than that calculated by the original L.S.S. theory.

The energy broadening of an Au^+ beam produced by a tandem system can be estimated by the present theoretical prediction. The gas cell of the 3 MV tandem accelerator of LHD will have the same geometry as that of the present test stand. The energy broadening due to the electron stripping can be calculated to be 7 eV, and it does not depend upon the target mass. The calculation of the charge fraction predicts that the optimum gas thickness for Au^+ beam production is about $6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Together with the energy broadening due to the multiple collision at this target thickness, the total energy width of the Au^+ beam produced by a tandem system might be less than several tens eV. The voltage ripple of the tandem power supply is also about several tens eV. Therefore, the total energy spread of an Au^+ beam is about a hundred eV. It will be small enough for a HIBP diagnostics on LHD where the plasma potential is a few keV.

論文の審査結果の要旨

磁場を用いて高温のプラズマを閉じ込める装置では、プラズマ中の空間電位の分布がプラズマの挙動や閉じ込め特性に深く係わっており、その精度と信頼性の高い測定は極めて重要である。電位分布を直接測定し得る手法として重イオンビームプローブ法が用いられているが、現在核融合科学研究所で建設が進められている大型ヘリカル装置(LHD)のような、大型で強い閉じ込め磁場を用いる装置に適用するためには、質量数 200 程度以上の重いビームを 6 MeVという高いエネルギーに加速して打ち込む必要がある。この要請を満たすビーム生成法としては、イオン源を高圧に浮かす必要がないこと、電源電圧の2倍の加速が得られることなどの特長をもつタンDEM加速を用いることが得策となる。一方、電位分布を精度良く測定するためには、一次ビーム自身のエネルギー広がりには十分小さいことが必要となる。しかし、このタンDEM加速におけるビームエネルギーの広がり機構については、ほとんど解明されていないのが現状である。

谷池晃氏は、従来のスパッター型負イオン源では、引出しビームのエネルギー幅が約 100 eVと大きく、精密なエネルギー広がり測定には不向きであるため、エネルギー幅を約 10 eV に下げ得る、プラズマスパッター型の新しいタイプの金の負イオン源を製作した。また、機能的な物理実験を行うことのできるタンDEM加速試験装置を製作した。さらに、小型永久磁石を併用することによって、簡便にビームの質量分析を行った上でエネルギーを分析することのできる静電型シリンドリカル分析器を考案し、製作した。これらの装置を用いて、ガスセル中で負イオンが正イオンに変換される過程におけるエネルギー損失について、ビームエネルギーに対する依存性、ターゲットガス種依存性等、系統的な実験を行い、精度の良い測定結果を得た。

同氏は、これらの実験結果は従来の理論では説明がつかないことを示し、古典的統計モデルに基づく独自のモデルを打ち立てた。すなわち、タンDEM加速装置で生成されるイオンビームのエネルギー広がり、電荷移行時のエネルギー損失と、正イオンに変換された後の多重散乱に伴うエネルギー損失とで決り、加速装置の現実的な幾何学的形状によって規定される小散乱角の場合には、弾性衝突によるエネルギー損失よりも非弾性衝突に伴うエネルギー損失が支配的であること、その結果生じるビームエネルギーの広がり、ガスセルのガス厚(ガス圧×実効ビームパス)が薄い場合、数10 eV程度に抑えられること、衝突エネルギーとともにエネルギー広がりが増加するが、エネルギーの高い領域では飽和し、ターゲットガスの質量依存性も消える傾向をもつことなどを示した。したがって、タンDEM加速方式の重イオンビームプローブ法を大型ヘリカル装置へ適用する場合に、エネルギー広がり約 100 eV と見積もられ、精度の高い電位分布計測が可能であると推定されることなど、多くの有用な結論を得た。以上のことから、本論文は学位授与の対象として十分な内容を持っていると判断した。

試験は、審査員全員の出席のもとに、出願者に対し、論文内容及び基礎学力に関する質疑応答の形式で行った。出願者は質問に対して的確に答え、原子分子物理学の基礎、専門的知識、実験技術等を十分習得しており、研究の意義や研究内容についても良く理解していることが確認された。また、本人の外国語に関する能力は、英語で書かれた提出論文から、十分であると判定した。

公開発表会において、出願者はよく整理された論理に従って充実した内容の発表を行い、質問に対する回答も適切であった。

以上のように、口述試験、公開発表の内容はいずれも十分評価に値するものであり、合格と認定した。