

2-10 東工大タンデム加速器による核融合・環境測定研究

小栗慶之, 長谷川純, 福田一志, 小川雅生

東京工業大学原子炉工学研究所

1. はじめに

東京工業大学原子炉工学研究所の原子科学研究室には SSDH-HC2 型 1.7 MV 小型タンデム加速器が設置されている。1984 年に線型加速器への入射用・材料照射用として設置されたが、1995 年からはプラズマ・核融合、環境科学を主要テーマとして使用されている。イオン源は独自に開発した冷陰極 PIG[1], 及び SNICS II であり、それぞれ気体、固体原料から負イオンを発生している。1997 年には TOF 測定のために 100 MHz ビームパルス化装置が設置された。

現在、加速器は通常 1.0~1.4 MV 程度のターミナル電圧で運転されている。設置後 16 年を経過したが、最近は致命的な故障もなく順調に稼働している。昨年度に発生した比較的大きなトラブルは、高圧ターミナル内のプリー軸のベアリング固定箇所がゆるみ、ペレットチェーンがインダクターに当たって大量の金属粉がタンク内に飛散したことである。幸い、チェーンとインダクターの交換、及びタンク内部の清掃によって性能は回復した。

運転時間は核融合に関係したプラズマとイオンビームの相互作用実験、及び PIXE 法による環境試料測定に分けられ、その割合はほぼ 1 対 1 である。以下に最近の研究について報告する。

2. 重イオンビーム・プラズマ相互作用

1) プラズマ標的中の阻止能測定

重イオン慣性核融合研究の一環として、プラズマ標的とイオンビームの相互作用を調べる実験を行っている[2,3]。図 1 はプラズマ中の阻止能の入射エネルギー依存性に関する測定結果を示す。標的は最大エネルギー 4 J のガラスレーザーを照射して発生した電子密度 $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、温度 $\sim 10 \text{ eV}$ の水素化リチウム (LiH) プラズマで、 H^+ 、 Li^+ 、及び電子にほぼ完全電離している。測定にはパルスビームを用い、TOF 法によりエネルギー損失を求める。等価な常温標的と比較して、阻止能が約 2~3 倍上昇していることが分る。しかもエネルギー依存性に注目すると、ブラッグピークに対応する阻止能のピーク位置がプラズマ標的では全く異なることが明らかになった。

このプラズマ中における阻止能増大の原因の一つは、等価常温物質中と比較して入射イオンの荷電状態が増大することである。そこで上記の阻止能測定と並行し

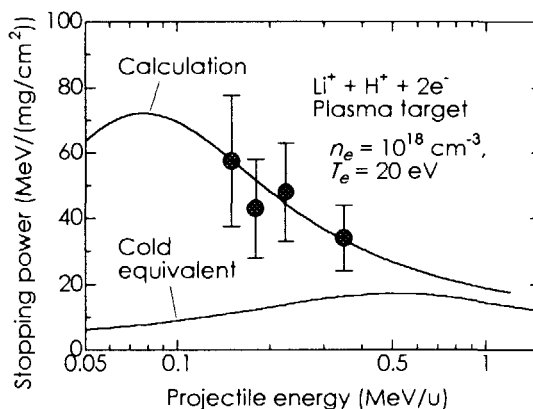


図1： ^{16}O イオンの阻止能の入射エネルギー依存性。

て、プラズマを通過した重イオンの荷電状態分布及び有効電荷の測定を行っており、既に ^{12}C 及び ^{16}O イオンについて常温標的中に比べて高い荷電状態を観測している。さらにこの現象を理論的に説明するために、入射イオンの内殻励起に伴う自動電離 (Autoionization) を考慮した荷電状態分布の数値解析が進行中である。

2) 水素プラズマ発生用固体水素標的の開発

本加速器施設には上記のガラスレーザーの他に、最大エネルギー10 J の炭酸ガスレーザーが設置されている。これを用いてバルクのリチウムや炭素標的を照射してプラズマ標的を発生してきたが、完全電離 (束縛電子の全くない) プラズマ標的の発生を目的として、固体水素標的の開発を

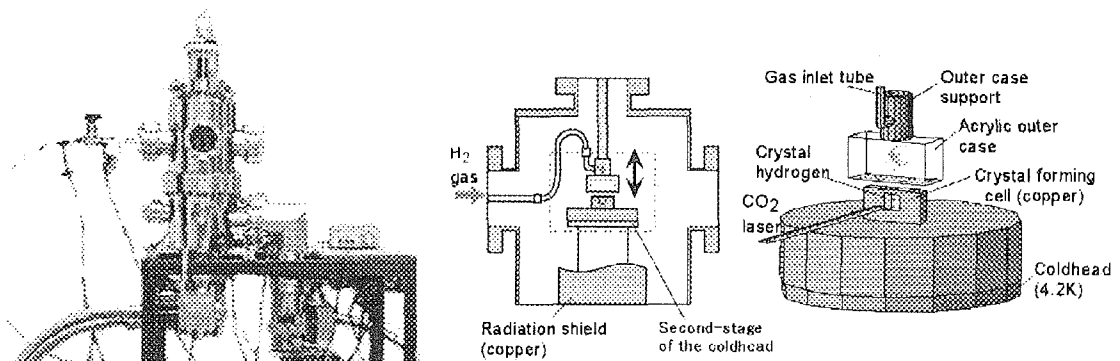


図2：固体水素標的製造装置の外観と氷塊生成機構。

開始した。図2にその装置系を示す。ヘリウム冷凍機により冷却された銅ブロック上の枠とアクリルケース内に水素氷塊を形成した後、ケースを外してレーザーを照射する。図3は可視分光法によるプラズマ電子密度・温度の予備的な測定結果である。電子密度 $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、温度 $1 \sim 10 \text{ eV}$ の水素プラズマが得られている。今後はより精密な診断測定を目指すとともにプラズマの電離度を決定するために中性水素原子の定量を行うことが課題である。

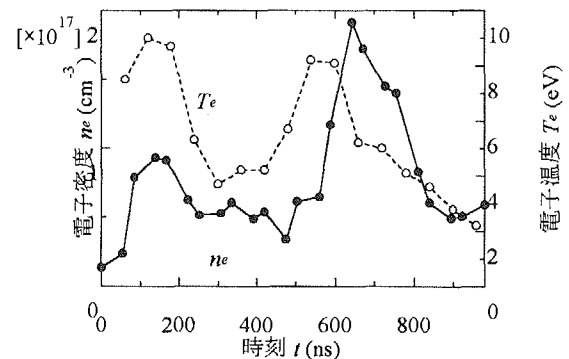


図3：電子密度・温度の時間変化。

3. PIXE 分析法による環境測定

1) 幹線道路周辺の大气エアロゾル粒子による汚染分布の測定

自動車交通は都市部における最も強い大気汚染源の一つである。エアロゾル粒子による汚染についてこの影響を調べるために、幹線道路から異なる距離で同時刻に粒子を採取して元素分析し、エアロゾル濃度の空間分布を調べた。

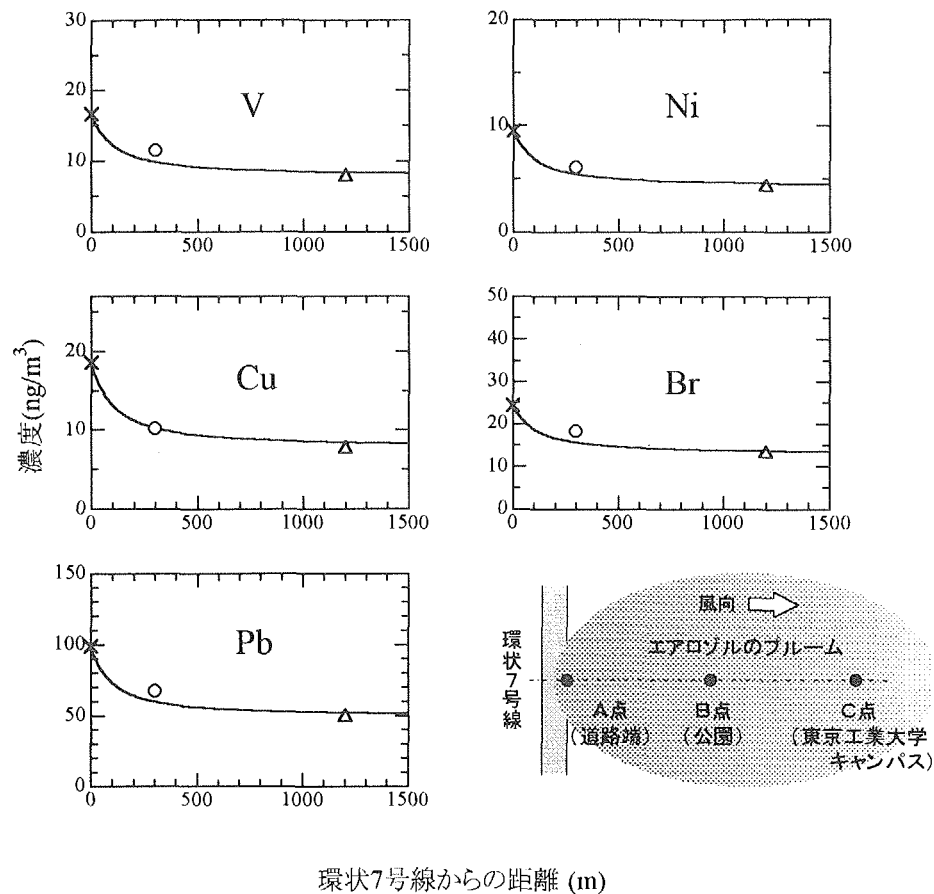


図4：微小粒子濃度の位置依存性．”x”はA点，“o”はB点，“Δ”はC点の濃度を表す．

エアロゾルの採取位置は都内環状7号線の道路端（A点），そこから1200 m 東に位置する東京工業大学大岡山キャンパス内（C点），及びこれらの中に位置する公園（B点）である．採取は平成11年8月から11月の平日，11:00～12:00の1時間行い，採取延べ日数は63日である．孔径8 μm 及び0.4 μm のニュクレポアフィルターを直列に接続し，分級採取を行った．

図4に微小粒子に関する順風時（風が環状7号線から測定点A → B → Cに向かって吹くとき）の元素別の測定結果を示す．全ての場合について，距離とともにエアロゾル濃度が減少することが分った．実線はプルームモデル[4]による移流拡散のシミュレーション計算結果であり，汚染源から最も遠いC地点での濃度をバックグラウンドとしている．計算では発生源の鉛直方向強度分布として，同様な道幅・交通量の場合の一酸化炭素に関する実測値[5]を高さ30 mまで外挿して用いた．バックグラウンドの評価，プルームモデルの精度等には問題はあるが，シミュレーション計算結果は実測結果を比較的良く再現している．この結果により，幹線道路周辺において自動車交通の影響が明らかに見られるのは道路から大体300 mまでの範囲であることが分った．

2) 厚い標的を用いたPIXE分析法の開発

本加速器施設においては，PIXE法を用いた環境分析として現在までに大気エアロゾル粒子の測定，雨水・河川水の測定等を行ってきた．この場合，標的はいずれもフィルター等に付着させた薄い標的であり，データ解析は比較的容易であった．昨年度より土壌，沈殿物等の測定を行うため，厚

い標的の作成法及びその測定・データ解析法の開発を開始した。

標的の一様性を確保するために、試料を一度粉碎し篩にかけた後、再び成形する。図5に試料形成用のプレス器、及び土壌から形成されたペレットを示す。

図6に予備的な測定結果を示す。土壌試料は自動乳鉢により20分間粉碎され、100 μm の篩を通した後、2 ton/cm^2 の圧力でペレット化された。今のところ Al, Si, K, Ca, Ti, Fe 等の典型的な土壌の主要成分に混じって Pb 等の微量成分も検出されている。厚いターゲットを用いた場合、標的内で陽子ビームのエネルギーは減衰し、またX線の自己遮蔽も起こる。現在、これらを考慮して元素を定量するための解析用プログラムを開発中である。

4. おわりに

東工大タンデム加速器は建設後16年を迎え、今のところ致命的なトラブルはないものの、各種電源や空調設備等の老朽化によるトラブルが懸念されている。また維持費も年々削減されており、いつまで運転を続行できるかは極めて不確定な状態である。

いずれにしても本加速器は他の主要研究機関の装置に比較して、もはや加速電圧が極めて低いため、今後とも低エネルギーの特殊な実験を主に研究を展開する予定である。

参考文献

- [1] E.Arai, K.Hayashi, Y.Oguri, Qui-Qi and K.Satoh : "A Heavy-ion Acceleration System Using a Low Energy Van de Graaff" ; Nucl. Instr. and Meth. B5 (1984) 58.
- [2] A.Sakumi, T.Watanabe, K.Shibata, J.Hasegawa, M.Ogawa and Y.Oguri : "Stopping Power Measurement of 225 keV/u Oxygen Ions in Laser-Produced Lithium Hydride Plasma" ; J. Nucl. Sci. Technol. 36 (1999) 326.
- [3] Y.Oguri, K.Tsubuku, A.Sakumi, K.Shibata, R.Sato, K.Nishigori, J.Hasegawa and M.Ogawa : "Heavy Ion Stripping by a Highly-Ionized Laser Plasma" ; Nucl. Instr. and Meth. B161-163 (2000) 155.
- [4] F.Pasquill and F.B.Smith : "Atmospheric Diffusion", 3rd Edition ; John Wiley & Sons (1983).
- [5] 副島海夫 : 「自動車排ガスの道路周辺における拡散現象の観測と考察」 ; 自動車技術 25 (1971) 242.

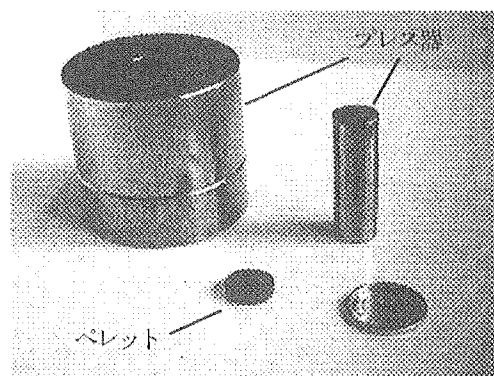


図5：試料形成用プレス器（奥）と製作されたペレット（手前）。

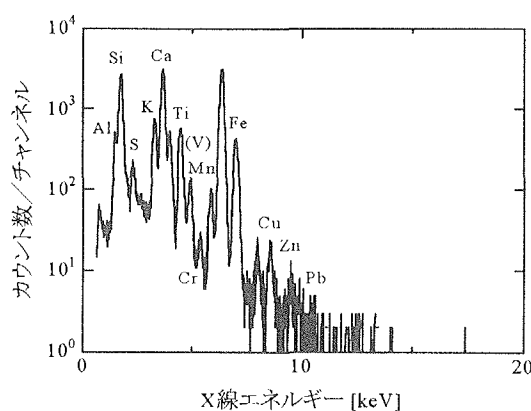


図6：土壌試料のPIXEスペクトル。