レーザーノート 2

レーザー核融合用ペレットの作り方

椿原 啓*・中塚正大*・久保宇市*

Fabrication of Pellet for Laser Fusion Experiments

Hiroshi TSUBAKIHARA*, Masahiro NAKATSUKA* and Uichi KUBO*

1. はじめに

レーザー核融合用燃料材料としては重水素原子密度が高くレーザーエネルギーの変換効率の良いことが必要である。現在候補に挙げている材料としては(1)高压重水素ガス(50~1000気圧)を封入した中空の金属およびガラス球、(2)極低温に保持された固体重水素、(3)リチウムの重水素化合物、(4)重水素で置換したパラフィン、ポリエチレン等がある。レーザービームによって一様に照射され均一に圧縮され十分な核融合反応を行なうためには、ターゲットとしては直径数十から数百ミクロンの直球状ペレットが要求される^{1,2)}。実用上の観点からは製造、取扱い、保存の容易さが第一に挙げられる。パラフィン、ポリエチレンは融点が室温以上であること、大気中に放置しても比較的安定なことから特に有望な材料であると考えられる。

初歩的な燃料構造としては中実球体燃料が考えられる。この場合にはレーザー加熱により発生するX線や平均自由行程の長い高速電子がペレット中央部を加熱膨張させ、十分な圧縮ができないいわゆる前駆加熱現象が予想される。ペレット構造に工夫を加えレーザー出力および波形整形に対する厳しい要求を緩和しながら十分な圧縮を達成させるための計算機シミュレーションが行なわれている。³⁾ 基本的な構造とし

ては、中空燃料球とそれを被覆するPusherおよびAbsorber領域を持つ多層構造ターゲットが考えられている。Absorber領域はレーザー光を吸収し蒸発してペレットを圧縮する。Pusher領域は圧縮率の増大化に寄与すると共に、レーザー光吸収時に発生する電子やX線から燃料が前駆加熱されるのを防ぐ。

本研究はペレット製作の第一歩として、中実パラフィンターゲットを想定して行なった。重水素置換していないパラフィンを用い、ペレットの真球性に関係する主たる要因を明らかにし、適切な寸法および真球形状を持つペレットの製作条件を決定した。以下にその詳細について述べる。

2. 実験装置および方法

製作に当っては、比較的真球に近い造粒が可能である溶融噴射法⁴⁾を用いた。自作した装置の概略をFig. 1に示す。用いた材料は融点68~70℃のパラフィン(和光純薬工業)である。パラフィンは金属容器内で溶融され、所定の温度に達した後、直径115μmのノズルを通して加圧、噴射される。加圧には窒素ガスを用い、圧力調整器で2~6 kg/cm²の圧力に設定した。加圧時間は1.9秒とし、噴射によって生じたパラフィン液滴は落下中に冷却固化し、ノズルの下方約230cmに設置した捕集器に集められた。

* 近畿大学理工学部電気工学科 (東大阪市小若江3-4-1)

* Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Kinki University, Higashi-osaka, Osaka.

Fig. 1. Melt-spray apparatus.

各噴射毎に50～60個ずつサンプリングし、光学顕微鏡観察により粒子径分布、真球度分布をFig. 2のように求めた。100倍程度に拡大した顕微鏡写真の上に同心円に切った透明セクションペーパーを置き、ペレットの輪郭線を平均化してペレットの中心を決定し粒子径 d を求める。次にペレットの輪郭線に接する同心最小円と最

Fig. 2. Schematic microphotograph of paraffin pellet and definition of sphericity.

大円を描きその直径の差を Δd とする。本実験においては真球度を $(d - \Delta d) / d \times 100 (\%)$ と定義した。

3. 実験結果

溶融温度 130°C で噴射圧力を $2 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ としたときの粒子径分布をFig. 3に示す。噴射圧力を高くするに従い粒子径は小さくなり分布の幅も狭くなっていることがわかる。 6 kg/cm^2 の圧力で噴射造粒した場合、最多頻度粒子径は約 $180 \mu\text{m}$ であり、ノズル径の1.6倍程度となっている。粒子径の溶融温度依存性についてもほぼ同様の結果を得ており、温度の高いほど粒子径は小さくなる傾向を示す。Fig. 4に噴射圧力をパラメータとして算術平均粒子径の溶融温度依存性を示す。噴射圧力 2 kg/cm^2 の場合、平均粒子径の溶融温度依存性は少ないが、噴射圧力を高くするに伴い、温度の上昇が粒子径を小さくしていることがわかる。

溶融温度 120°C で噴射圧力を $2 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ としたときの真球度分布をFig. 5に示す。噴射圧力が 2 kg/cm^2 のときは真球度97.5%をピークとして100～92%の範囲で幅広く分布しているが、 3 kg/cm^2 の場合は99.5%をピークとして真球度の高い側に偏った狭い分布を示す。 4 kg/cm^2 以上の噴射圧力においては再び真球度

Fig. 3. Size distribution as a function of spray pressures (at 130°C).

Fig. 4. Variation of arithmetical mean diameter of paraffin pellet with a spray temperature, spray pressure as a parameter.

Fig. 5. Distribution of sphericity as a function of spray pressure (at 120°C)

の低い側に分布し、6 kg/cm²においては明瞭なピークが見られない。Fig. 6は99.5～100%の真球度を持つペレットの割合を各噴射圧力、溶融温度に対しプロットしたものである。噴射圧力3 kg/cm²、溶融温度100℃付近において最も高く、約30%の値を得た。

4. 考察

Fig. 6. Variation of normalized frequency of pellets having the sphericity between 99.5 and 100% with spray temperature, spray pressure as a parameter.

4.1 粒子径

溶融噴射法においては、独立な液滴は加圧による不安定な噴流によって形成される。液滴の大きさは噴流にそって発生する流れのゆらぎの波長とノズル口径によって決定される。ゆらぎの波長は主に噴射速度に依存しており、噴射速度の増加に対して波長は短くなる。

各溶融温度、噴射圧力における噴射速度は粘性を考慮したノズルの流量公式⁵⁾より計算で求めた。計算上必要なパラフィンの粘度の温度依存性は文献値⁶⁾を用いた。Fig. 7に算術平均粒子径の噴射速度依存性を示す。溶融温度の上昇に伴う粘度の低下、および噴射圧力の増加は共に噴射速度を高め平均粒子径を減少させる原因

Fig. 7. Variation of arithmetical mean diameter on the spray velocity with various spray temperatures and pressures.

となっていることがわかる。一定の噴射速度と比較すると熔融温度の低い方が粒子径が小さくなる傾向を示している。このことは粒子径は単に噴射速度のみならず、そのとき噴射される流体の粘度、表面張力にも依存していることを暗示している。

4.2 真球度

パラフィン液滴はノズルから噴射されて固体ペレットとして捕集器に集められるまでに(1)熔融液滴の冷却、(2)凝固、(3)固化粒子の冷却の3段階を経る。真球を得るためには、熔融液滴の冷却時間が、表面張力によって真球となるに十分であること、冷却速度をゆるやかにし、液滴中に大きな温度勾配を作らないこと等が必要となろう。本実験においては噴射圧力 3 kg/cm^2 、熔融温度 100°C において真球度の高いペレットが得られた。このことは以下のように推論できる。

1) 噴射圧力 2 kg/cm^2 の場合、 3 kg/cm^2 の噴射よりも真球度が低下したのは、粒子径が大きく液滴中に大きな温度勾配を生じ、均一な凝固が起らなかったためである。

2) 3 kg/cm^2 以上の噴射圧力で真球度が低くなったのは液滴の落下速度が高く、真球となるに十分な時間を経過しないで凝固したためである。

3) 3 kg/cm^2 の噴射において、 200°C 以下での真球度の低下は凝固点に近く、真球となるに十分な冷却時間がとれなかったためである。また 100°C 以上における真球度の低下は、大気との温度差が大きく、パラフィン球中に大きな温度勾配を生じたことが原因している。

5. 結論

前述の実験結果および検討より以下の結論が得られた。

1) 粒子径に関しては、本実験の範囲では圧力および温度を高くすることにより、ノズル径の1.5～2倍の粒子径を持つペレットを収率よく得ることができた。これは噴射速度の増加に伴う噴流のゆらぎ波長の減少によって液滴が微細

化されるものと考えられる。

2) 真球度に関しては、噴射圧力 3 kg/cm^2 、熔融温度 100°C において真球度99.5～100%のペレットを約30%の収率で得ることができた。高い真球度を持つペレットを得るためには、噴射されてから固化するまでの時間を十分にとること、および液滴内部の温度勾配を小さくすることが必要である。

ペレット寸法 $200 \pm 1 \mu\text{m}$ 、真球度99.5～100%という選択基準では収率0.7%程度が期待できる。1秒間で5,000個程度造粒できるので、基準を満足するペレット100個を得るためには3秒程度噴射すれば良いことになり、本実験で用いた熔融噴射法は非常に簡便かつ有効な造粒法であると言える。

本報告においてはレーザーターゲットとしては比較的構造の簡単な中実パラフィン球についてその適切な造粒条件を明らかにした。現在パラフィン、ポリエチレン球の中空化、球表面へのPusher, Absorber層の被覆など高い核融合利得を得るための多層構造ターゲットについて研究を進めている。

参考文献

- 1) W.D. Friedman, G.M. Halpern and B.A. Brinker: Lab. Laser Energetics, Report No. 22, Rochester (1974).
- 2) M. J. Clauser and M. A. Sweeney, : prog. Rept. Sandia Lab. SAND76 - D 148,40 (1975).
- 3) R. E. Kidder: Nuclear Fusion, 16, 3 (1976).
- 4) 板橋徹: 造粒便覧, p. 199 ~ p. 215, オーム社 (1975).
- 5) 浅野友一: 流体工学, p. 53 ~ p. 217, 啓学出版, (1973).
- 6) Y. P. Varshni and S. N. Srivastava: Proc. Phy. Soc. 73, (2), 153 (1959).