

希薄ウラン蒸気の膨張挙動に関する数値モデル

A Numerical Model on the Expanding Behavior of Rarefied Uranium Vapor

C R C

大西 輝明 (OHNISHI TERUAKI)

1. 序

ウランの原子法レーザー同位体分離において、蒸気源から発生するウラン蒸気が系内をいかに拡散し、その結果、最終的にいかなる空間密度分布や温度分布が達成されるか、また、拡散するウラン蒸気内ではいかなる程度の原子、電子衝突が生じ、衝突電離したウランの数密度が空間的にいかに変動するか等を検討する事は、レーザー照射領域の決定やイオンコレクター部の構造決定に係って本質的に重要な事柄である。これらの問題を検討するために、ウランの希薄気体挙動を記述する数値モデルを作成した。

2. モデル化の方法

ここではウラン蒸気の発生方法については議論せず、スリットを通過した高温、過飽和なウラン蒸気が二次元的 (x, y 方向) に拡散する様相を検討する。一般に、希薄気体の情報は Boltzmann 方程式を解いて得られる。しかし、この方程式は微視的な衝突項の取り扱いが困難であると共に、数値計算に際しては速度空間を充分多数のメッシュで小区分しない限り、運動量やエネルギーの保存が保証されない。この欠陥を避けるために、ここでは Boltzmann 方程式を速度場で積分した、いわゆる保存方程式群を採用する。これらの方程式群には、ウラン原子同志の衝突に起因する応力テンソルおよび熱流ベクトルが出現するが、これらはウラン蒸気の数密度分布関数そのものを用いて導出する必要がある。この関数を算出するために Boltzmann-Krook-Welander (BKW) 方程式を解く。ウラン原子は x, y 方向にそれぞれ Maxwell 分布とは大きく異なる事のない分布を持つと予想されるので、BKW 方程式の解、即ち、ウラン蒸気の数密度分布関数 $f(x, y, v_x, v_y, t)$ を以下のとおりに展開する。

$$f = \sqrt{\frac{m}{kT_x}} \sqrt{\frac{m}{kT_y}} \sum_i \sum_j C_{ij}(x, y, t) e^{-\frac{m}{2kT_x}(v_x - q_x)^2} H_i\left(\sqrt{\frac{m}{kT_x}}(v_x - q_x)\right) e^{-\frac{m}{2kT_y}(v_y - q_y)^2} H_j\left(\sqrt{\frac{m}{kT_y}}(v_y - q_y)\right)$$

ただし、 H_i は第 i 次の Hermite 多項式、 q_n, T_n は各々 n 方向のドリフト速度および温度である。物理量 q_n, T_n は上記の保存方程式群から得られる。この f の表現式を用いる場合、BKW 方程式は C_{ij} に関する (保存方程式群と類似の) 偏微分方程式に変換できる。

「ウラン蒸気」は中性および電離ウラン、および自由電子から成る。前二者は同一速度分布、同一温度分布を持ち、電子はウラン原子と同一温度分布を持つものとする。これらのウラン化学種 U^0, U^+ と電子 e とは三種の電離、再結合反応; a) $U^0 + e \leftrightarrow U^+ + e + e$, b) $U^0 + U^0 \leftrightarrow U^0 + U^+ + e$ および c) $U^0 + h\nu \leftrightarrow U^0 + e$ を通じて、場所的、時間的に各々の存在量を変化させ得る。上記の保存方程式群および BKW 方程式に、これらの反応の効果をソース (又はシンク) タームとして取入れる。さらに、膨張に伴う温度降下のために、ウラン蒸気は急速に過飽和となる。液滴核は過飽和となった時点で形成され、蒸気はウラン原子相互の衝突タイムスケールに等しいタイムスケールで液滴化して系外へ逃れるものとする。この効果も同様にシンクタームとして取り扱う。

以上の方法によれば、系の状況は U^+ および e の各々に対応する数密度保存式、($U^0 + U^+$) に対する数密度保存式 (即ち、($i \times j$) 個の C_{ij} に対する保存式)、($U^0 + U^+$) に対する運動量およびエネルギー保存式を連立して解いて得られる。考慮空間は ($x \geq 0, y \geq 0$) 空間に (y 軸対称) 矩形状であり、ウラン蒸気は原点 (又は原点を中心とした線分上) から考慮領域内へ流入するものとする。このとき考慮空間をメッシュ分割して方程式群を差分化し、さらに時間に関しては陰に差分化する。ADI 法によりこれらの解を順次算出する。この手順を図に示す。

3. ケーススタディ

原点における 3000 K の液体ウランから飽和蒸気圧をもって蒸気発生する場合、ウラン原子種に対する数密度、速度、温度の空間分布の時間変動を調べた。また、過飽和状態で蒸気発生する場合や、 x, y 方向に異なる初期温度を持って蒸気発生する場合についても、調べた結果を報告する。

