

原子法レーザー同位体分離におけるウラン蒸気発生源モデル

A Model of Uranium Evaporator in the Atomic Vapor Laser Isotope Separation

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、レーザー照射領域でのU原子が持つ温度、密度、速度分布、電離度等を同定する事は、その設計や分離効率の推算に係って重要な事柄である。これらの物理量を算出するために、先に系内を膨張するウランの希薄気体挙動モデルを作成した⁽¹⁾この希薄気体モデルでは、ウラン蒸気の発生条件を境界条件として導入する必要がある。このため、源からウラン蒸気がいかなる物理量を持って発生するかを明らかにするためのウラン蒸気発生源モデルを作成した。

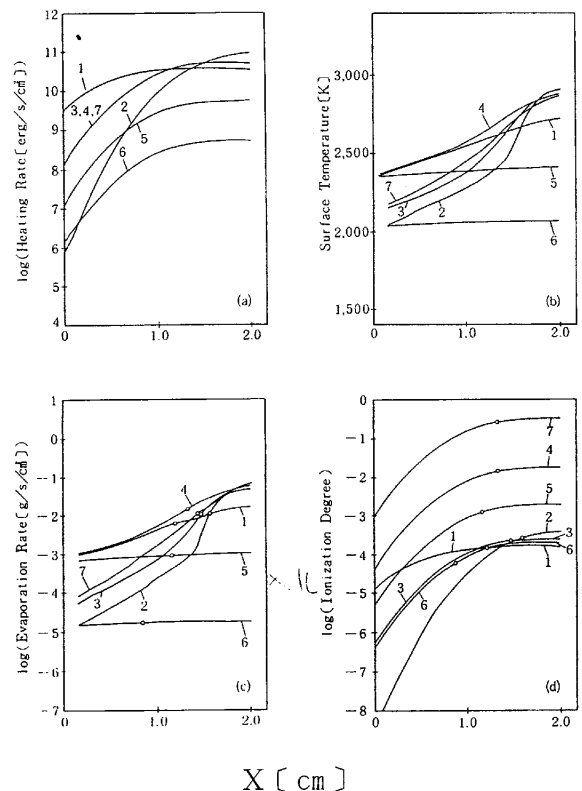
2. モデル

レーザー分離用ウラン蒸気は、軸方向に伸ばした金属に上方から線型電子ビームを照射する事で得られる。この場合、関与する物理現象は熱の伝導、熔融ウランの流れ、および熔融ウラン表面の形状の変化であるが、これらは独立現象ではなく、各々の支配方程式（即ち、非圧縮性流体内での熱伝導式、熔融ウラン内部の運動方程式、Young-Laplace 方程式等）の非線型項や境界条件、又は諸係数への間接的な依存性を通して相互に影響し合うものである。電子の照射や蒸発原子の反跳が熔融表面へ与える運動量、および表面張力を考慮する事で熔融表面での圧力の境界条件が、照射電子による表面加熱率、有限の放射率を持つ黒体輻射、およびウラン蒸発率等を考慮する事で温度の境界条件がそれぞれ得られる。一般に金属表面に荷電粒子を照射する場合、LET効果のために粒子のエネルギー損失率は金属内に有限の距離だけ侵入した地点で最大となる。従って、電子照射の場合は照射エネルギーに依存して表面下（数〜数十） μm の地点が最高温度となる。ウランの場合、飽和蒸気圧は温度と共に指数関数的に増大するので、この最高温度地点を中心に微小なバブルが発生し、体沸騰状態となる事が予想される。このため、上記の蒸発率は熔融表面からの静的な蒸発成分と、上昇して破裂するバブルからの高温蒸気成分との和として与えられる。表面加熱条件を与えれば支配方程式群を二次平面内で数値的に解く事ができ⁽²⁾これをもとに表面からのウラン蒸発率、蒸気密度、蒸気温度等の情報を得る事ができる。

表面近傍でのウラン蒸気は表面からの二次電子、高温表面からの熱輻射、および上方からの電子ビーム照射を受けるため、その電離度は熱電離度とは著しく異なる。二次電子効果は照射電子ビームの効果に比して無視し得るとし、ウラン蒸気は電子照射開始時の金属表面からHの高さ以下にある場合のみ電子ビーム照射を受けるものとする。高さHでの電離度を算出するために(1) $\text{U}^0 + (\text{ビーム電子}) \rightarrow \text{U}^+ + e + e$, (2) $\text{U}^0 + h\nu \rightarrow \text{U}^+ + e$, および(3) $\text{U}^+ + e \rightarrow \text{U}^0 + h\nu$ の三種の原子過程を考慮して、蒸気生成直後からの化学種組成の変動を追う。電子ビームによる金属熔融では金属の広い表面に渡って電子照射が施されるよう、通常、印加磁場強度を数十〜数百Hzの周波数で振動させる。ウラン熔融の場合も同様なビーム偏向を施すものとして電子加熱率を与える。照射電子エネルギーを与えれば、原子過程(1)のビーム電子流束は熔融ウラン表面の局所場における電子加熱率から算出できる。

3. ケーススタディ

金属ウランはz方向に延びるつぼ内に保持されるとし、るつぼ断面は $x \times y = 4 \times 3 \text{ cm}^2$ の矩形状 ($x = 2 \text{ cm}$ で線対称) とする。電子ビームのx方向強度は半値幅 0.5 cm のガウス分布を持つとし、これを $x = x_0 = 2 \text{ cm}$ を中心としてx方向に幅 x'_0 区間だけ振動させるものとする。この周期は一般に、熱伝導のタイムスケールに比して充分に小さい。図(a)に $x = [0, 2] \text{ cm}$ での表面加熱率を与える。ここで、1: z方向1 cm当りの電子ビーム出力 $Q = 10^4 \text{ W}$, 電子加速電圧 $E = 10^5 \text{ V}$, $x'_0 = 1.5 \text{ cm}$, 2: $Q = 10^4 \text{ W}$, $E = 10^5 \text{ V}$, $x'_0 = 0.5 \text{ cm}$, 3: $Q = 10^4 \text{ W}$, $E = 10^5 \text{ V}$, $x'_0 = 1.0 \text{ cm}$, 4: $Q = 10^4 \text{ W}$, $E = 10^4 \text{ V}$, $x'_0 = 1.0 \text{ cm}$, 5: $Q = 10^3 \text{ W}$, $E = 10^4 \text{ V}$, $x'_0 = 1.0 \text{ cm}$, 6: $Q = 10^2 \text{ W}$, $E = 10^4 \text{ V}$, $x'_0 = 1.0 \text{ cm}$, 7: $Q = 10^4 \text{ W}$, $E = 10^3 \text{ V}$, $x'_0 = 1.0 \text{ cm}$ 。図(b)および(c)に、蒸発が安定した時点での表面温度、および蒸発率を示す。図(d)に $H = x_0$ とした場合のウラン蒸気の電離度を示す。白丸は熔融表面が点状であるとした場合の平均値である。これらの他に、ビームがバブル状に照射される場合の電離度についても報告する。



(1) 大西：日本原子力学会1989年年会J51

(2) 大西：第8回シミュレーションテクノロジーカンファランス論文集 121-124(1989)

図1 ケーススタディにおける物理量の表面分布(a)表面加熱率, (b)表面温度, (c)蒸発率, (d)電離度