

# 表面電離器の輻射熱に関する検討

A. Tamii

ver 1.2 18-JAN-2005

## 1 序

偏極  ${}^6\text{Li}$  原子線は、表面電離器 (Surface Ionizer) において高温に熱した酸化タングステンに照射することにより 1 価にイオン化され、グリッド電極により加速されて引き出される。このメモでは、表面電離器のタングステンからの輻射熱に関して検討する。

## 2 輻射熱の検討

### 2.1 黒体輻射による計算

計算にあたって、以下の仮定をする

1. タングステン板の温度は均一で、温度  $T_1$ 、外表面積  $S_1$  とする。
2. 真空容器はタングステン板を完全に覆い、温度は均一で  $T_2$ 、内表面積  $S_2$  とする。
3. 引き出しグリッドおよびタングステン板支持部の熱的影響を無視する。
4. タングステン板表面から放出された放射が容器表面に到達する割合を  $f_1 = 1$  とする。実際には、タングステン板はコの字形をしており、タングステン板表面から放出された放射の一部はタングステン板に達するがこれを無視する。

第 4 項より、容器表面からの放射がタングステン板表面に到達する割合  $f_2$  は、

$$f_2 = \frac{S_1}{S_2} f_1 = \frac{S_1}{S_2} \quad (1)$$

となる ([1] 式 (4.55))。

タングステン板から容器への単位時間あたりの移行放射エネルギーは以下の式で与えられる ([1] 4.2 節)。

$$Q^{12}(T_1, T_2) = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 f_1 S_1}{1 - c_{12}} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} c_{12} &\equiv (1 - f_1)(1 - \epsilon_1) + (1 - f_2)(1 - \epsilon_2) + f_1 f_2 (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \\ &= 1 - f_2 \epsilon_1 (1 - \epsilon_2) - \epsilon_2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\sigma \equiv \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \quad (4)$$

ここで、 $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$  はそれぞれタングステン板、容器の放射率で、波長によらず一定としている。 $\sigma$  は Stefan-Boltzman 定数である。

タングステン板および容器が黒体であると仮定すると、 $\epsilon_1=\epsilon_2=1$  となり、

$$Q^{12}(T_1, T_2) = S_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{when } \epsilon_1 = \epsilon_2 = 1 \quad (5)$$

タングステン板温度を  $1500^\circ\text{C}$  (1770 K)、容器温度を  $30^\circ\text{C}$  (300 K)、タングステン板の表面積を  $6 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 = 24 \text{ cm}^2$  とすると、 $T_2^4$  の項は無視できて

$$\begin{aligned} Q^{12}(T_1, T_2) &\simeq S_1 \sigma T_1^4 \\ &= 24 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4} \cdot 1770^4 \text{ K}^4 \\ &= 1300 \text{ W} \end{aligned} \quad (6)$$

となる。

黒体近似からのずれは放射率  $\epsilon_1, \epsilon_2$  により取り込めるが、これらの値は金属の表面状態に敏感であり、精度よく見積もりを行うことは難しい。磨いたタングステン表面の放射率の目安は  $\epsilon_1=0.024\sim 0.353$  (at 300-3655 K) となっており、([1] 表 3.8) 放射熱は  $\epsilon_1$  に比例するが、実際にはタングステンの表面を酸化させて使用することもあり、安全側設計としてこの効果を取り入れない方が無難である。

容器側の表面の放射率 ( $\epsilon_2 < 1$ ) に関する効果は、タングステン板の表面積との面積比 ( $S_1/S_2$ ) に依存して減少する。容器側の表面積を検討資料 [2] の容器 (内容積  $15 \times 10 \times 6 \text{ cm}^3$ 、内面積  $S_2=600 \text{ cm}^2$ ) にとった場合 (実際にはこれよりも内面積は大きくなると予想される) の面積比は 4% であり、 $\epsilon_2=0.1$  を仮定しても移行熱量の変化は  $\epsilon_1=1$  の場合で

$$\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 (1 - \epsilon_2) \frac{S_1}{S_2} + \epsilon_2} = 0.74 \quad (7)$$

から分かる様に 0.74 倍程度である。 $\epsilon_1$  が 1 より小さい場合には更に効果が薄くなる。放射率は SUS 研磨面の場合で 0.074 (at  $100^\circ\text{C}$ )、銅の研磨面の場合で 0.052 (at  $100^\circ\text{C}$ ) となっている ([1] 表 5.6)、表面の汚損により値が大きくなるので放射熱を下げる効果はあまり期待できない。

むしろタングステン板支持部などからの放射熱が加わるため、放射熱は計算値よりも高くなる方向であると予想される。

## 2.2 FSU の使用電流量からの計算

フロリダ州立大学 (FSU) ではタングステン板に 100 A の DC 電流を流している [3]。この実績をもとに発熱量を計算する。タングステン板形状は明確ではないが、現地視察時の写真をもとに  $6 \times 2 \times 0.01 \text{ cm}^3$  と推定すると、 $1500^\circ\text{C}$  のタングステンの体積比抵抗が  $48 \mu\Omega\text{cm}$  である ([1] 表 3.5) ことから、抵抗値  $R$  および発熱量  $W$  は、

$$\begin{aligned} R &= 48 \times 10^{-6} \Omega\text{cm} \frac{6 \text{ cm}}{2 \times 0.01 \text{ cm}^2} = 0.014 \Omega \\ W &= RI^2 = 0.014 \Omega \times (100 \text{ A})^2 = 140 \text{ W} \end{aligned} \quad (8)$$

となる。よって黒体輻射による計算結果 (式 (6)) と 9 倍の差がある。

FSU の報告では、 $1200^\circ\text{C}$  という記述 [4] と  $1500^\circ\text{C}$  という記述 [3] があり一定ではない。Heidelberg の報告では  $1000^\circ\text{C}$  強である [5]。一般書には、典型的に  $1900\text{K}$  ( $=1630^\circ\text{C}$ ) という記述があ

る [6]。1200 °C、1000 °C における放射量の計算値は 1500 °C に比較して、それぞれ 50%、30% である。一方で比抵抗は 1000 °C において 33  $\mu\Omega\text{cm}$  (1500 °C の 70%) に下がる ([1] 表 3.5)。これらから温度の違いは、計算値の開きを説明するには不十分である。

タングステン板のサイズは明確ではないが、大きくは違わないと考えられる。厚さは Heidelberg の資料の値を用いたが、この不定性も計算値の開きを説明するには不十分であろう。

今のところ、不一致の原因は不明である。

### 3 検討とコメント

タングステンから容器への移行熱量については、黒体放射からの計算と FSU の使用電流量からの計算の不一致は大きいですが、安全をみても黒体放射からの計算 1300 W を基準に設計を進めるべきであろう。

タングステンの放射率が 1 より小さいことを考慮すると移行熱量が減るが、せいぜい 1/2 程度と予想される。

容器内表面の放射率を下げる (反射率を上げる) ことにより移行熱量が減るが、タングステン表面積の容器内面積に対する比が小さいため効果は薄い。

移行熱量として 1300 W を想定する場合には、水冷方式を採用すべきと考える。この場合、別途冷却した熱シールドを内部に設置する必要はないと考えられる。

冷却水が全ての移行熱量を持ち去るとした場合、水の温度上昇は、水量が 1 L/min の場合で

$$\Delta T = \frac{1300 \text{ W} \times 60 \text{ sec/min}}{4.2 \text{ J/cal} \times 1000 \text{ cc/min} \times 1 \text{ cal/}^\circ\text{C cc}} = 19 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9)$$

である。

容器の温度、タングステン支持部の温度分布の見積もりには具体的な形状と熱伝導を考慮する必要がある。また、それらの情報から支持部から容器への熱移行量の見積もりが可能となる。

引き出しグリッドの材質と形状を検討する際には、放射熱と熱伝導の検討を行い、引き出しグリッドの温度を見積もる必要がある。

### 4 まとめ

以上の議論から、表面電離器の容器は水冷を行うのが良いと考える。現検討段階では、タングステン板から真空容器への移行熱量は 1300 W 程度である。1 L/min の水により冷却した場合、水の温度上昇は約 20 °C となる。タングステン板支持部などからの熱移行を考慮すると、さらに熱移行量が増える可能性がある。

表面電離器の容器は 17.6 kV 程度の電位にある為、冷却水系の電氣的絶縁が必要である。

FSU の写真から判断すると、表面電離器容器には冷却水配管が付いている様である。電氣的絶縁の構造は明確ではない。

### 参考文献

- [1] 沢田正三編, 「温度と熱」, 実験物理学講座 12, (共立出版、1970)。
- [2] A. Tamii, 「表面イオン化器の磁場についての検討」, ver 1.0.

- [3] A.J. Mendez, Phd Thesis, Florida State Univ., 1993, unpublished.
- [4] E.G. Myers *et al.*, Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. **B56/57** (1991) 1156.
- [5] E. Steffens, Nucl. Instrum. and Methods **143** (1977) 409.
- [6] Atomic and Molecular Beam Methods vol 1., ed. by G.Scoles, (Oxford Univ. Press, 1988) sec. 7, pp. 169.