

空気冷却時の炉心温度簡易推定

東北大学 流体科学研究所 伝熱制御研究分野
(2014/1/30 作成)

概要

炉心を空気で冷却した場合の燃料中心温度の**非常におおざっぱな**推定をした。本推定では、どのような空気冷却方法でも燃料中心温度は2000°C以上になる。現段階では水の注入を止めると炉心が高温になり、セシウムなどが再び放出される可能性が否定できない。当方としては、(HTC Rep.29.1, 2013/08/09)で提案しているように、炉心の注水は止めないで汚染水の原子炉建屋内循環をすることを推奨する。

1. 簡易伝熱モデルの構築

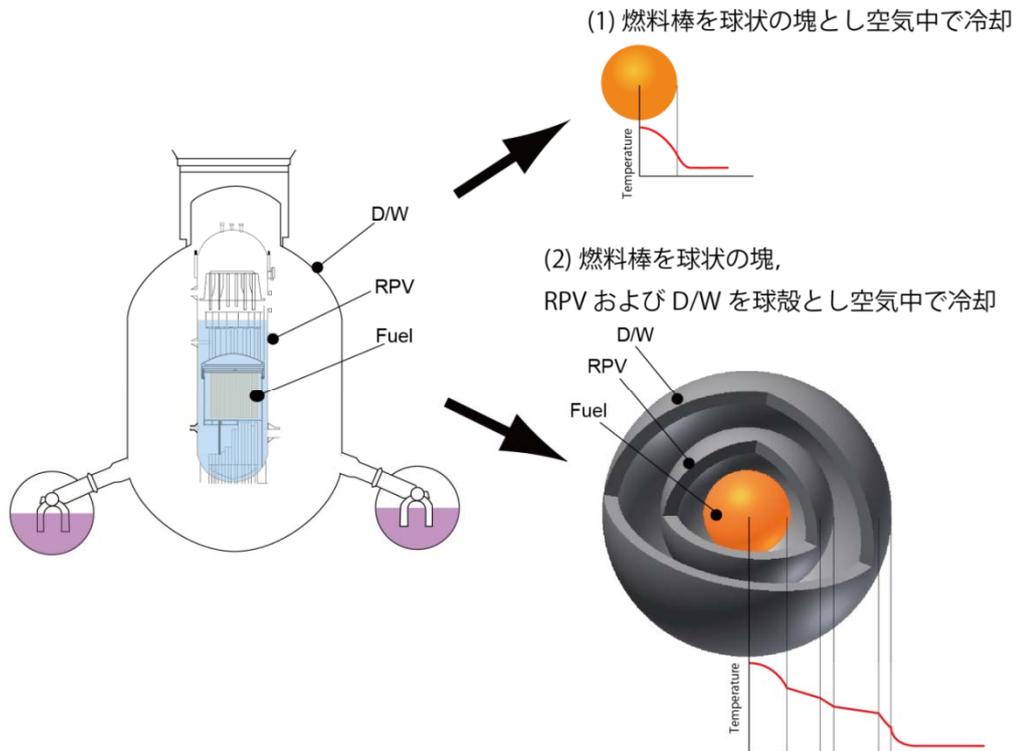


図1 計算モデル

まず、炉心の簡易伝熱モデルを構築する。燃料は酸化ウランが溶融し球状に固まったものとして近似した。実際の燃料融着状態は不明である。また、酸化ウランと構造体や減速材などが多孔質体として固着していると考えられるので、これは炉心温度を低く見積もる方向である。ただし、球状

の仮定は、炉心温度を高く見積もっている。

2号機には燃料棒を72本格納した燃料集合体が548体ある。燃料棒の寸法は直径0.01m、長さ3.6mである。表1に燃料棒、RPV、D/Wの体積、厚さ、そして球と考えた時の等価半径を示す。また2014年1月27日現在、2号機の発熱量は0.381MWである。なお、崩壊熱の見積もりには[1]または(HTC Rep. 1.4 2011/04/13)の推定式を用いたが、事故後3年後にこの推定式がどのくらい正しいかは不明である。

表1 各要素の寸法

	体積[m ³]	厚さ[m]	等価半径[m]	熱伝導率 W/(m·K)
燃料棒	44.62	-	2.200	3
RPV	414.6	0.16	4.625	40
D/W	4240	0.036	10.04	40

上記の仮定で、固着燃料のビオ数は次式で与えられる。

$$Bi = Lh/k \quad (1)$$

ここで、 L は球体の体積を表面積で除した基準長さ、 h は球体表面からの熱伝達率、 k は燃料の熱伝導率である。本報では、純粋な酸化ウランの熱伝導率の概略値を用いたが、燃料瓦礫の等価熱伝導率はこれより小さいと考えられる。表1の値と熱伝達率を100 W/(m²K)とすると、ビオ数は24>10となる。この状態では、表面の熱伝達に関わらず、内部温度分布が決まる領域である[2]。

球状発熱体内の熱伝導は1次元球対称熱伝導方程式で記述される。

$$\frac{k}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q}_v = 0 \quad (2)$$

燃料棒の球状塊の単位体積あたりの発熱量 \dot{q}_v は表1と崩壊熱より、8538 W/m³と計算される。境界条件は次式で表される。

$$r = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$$r = r_f; -4\pi r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T - T_\infty}{R_t} \quad (4)$$

ここで $T, r, r_c, k, T_\infty, R_t$ は温度[°C]、座標[m]、燃料棒塊の半径[m]、周囲温度（ここでは外気温）[°C]、総括熱抵抗[K/W]を表す。式(2)～(4)を解くと下記の解析解が得られる。

$$T(r) = T_\infty + \frac{4}{3} \pi r_c^3 \dot{q}_v R_t + \frac{\dot{q}_v}{6k} (r_c^2 - r^2) \quad (5)$$

燃料棒塊中心温度 T_{center} は $r = 0$ として得られる。

$$T_{center} = T_\infty + \frac{4}{3} \pi r_c^3 \dot{q}_v R_t + \frac{\dot{q}_v r_c^2}{6k} \quad (6)$$

また、燃料が圧力容器内にある場合、圧力容器と格納容器を同体積の球体として考え、多層球殻の伝熱問題として考えた。

2. 中心温度の推定

(a) 燃料棒塊を空気中で冷却する場合

図1の(1)のような状況を考える。この場合、式(6)中における総括熱抵抗 R_t は周囲流体による対流熱伝達のみで決定される。

$$R_t = \frac{1}{4\pi h r_f^2} \quad (7)$$

ここで h は熱伝達率[W/(m·K)]で本解析では 100 W/(m·K)とする。この場合、燃料棒塊中心温度 T_{center} は 2368°Cとなる。

(b) 圧力容器および格納容器の影響を考慮する場合

図1の(2)の状況を考える。この場合、式(6)中における総括熱抵抗 R_t は①燃料棒塊と原子炉圧力容器壁の間の対流熱伝達、②原子炉圧力容器壁内の熱伝導、③原子炉圧力容器壁と格納容器壁間の間の対流熱伝達、④格納容器壁内の熱伝導、⑤格納容器壁と周囲流体間の対流熱伝達の総和になる。

$$\begin{aligned} R_t &= R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \\ &= \frac{1}{4\pi h} \left(\frac{1}{r_f^2} + \frac{1}{r_p^2} \right) + \frac{1}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r'_p} \right) + \frac{1}{4\pi h} \left(\frac{1}{r_p'^2} + \frac{1}{r_D^2} \right) + \frac{1}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_D} - \frac{1}{r'_D} \right) + \frac{1}{4\pi h r_D'^2} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで r_p, r'_p, r_D, r'_D は原子炉圧力容器を模擬した球殻の内径および外径、格納容器を模擬した球殻の内径および外径を表す。の場合、燃料棒塊中心温度 T_{center} は 2408°Cとなる。

(c) 中心温度の考察

上記(a)および(b)の中心温度を比較すると、それほど大きな違いがないことが分かる。これは式(1)のピオ数が大きいことに起因する。つまり、炉心の空気流れを多少変えて表面の伝熱を変化させても、中心温度に大きな変化が無いことが示されている。1号機～3号機の炉心には、現在は水を注入しているがこれを中止すると、高温になることが分かる。水は燃料瓦礫の中を重力で流れていくので一定の冷却能力と膨大な蒸発熱や、空気に比べて大きな熱容量と捏伝統率があるので、炉心が低温を保っていると推定される。

ただし、本解析は非常に簡単な伝熱モデルに基づく、炉心温度推定なので、燃料の熔融状態が判明し、空気流で冷却可能となる場合も考えられる。例えば、炉心が完全に健全な場合、燃料棒周りに空気が流れるので、炉心の空気循環を調整することによって空冷が可能となる場合も否定できない。

3. あとがき

炉心を空冷した場合の炉心温度を、非常に簡単な伝熱モデルで推定した。本推定はあくまでも第一次近似であり、これまでの炉心解析[3]に比べると、解析精度は高くない。しかし、炉心の状態が分かっていない現在、注水を止めることはかなりなリスクを伴うと考えられる。

参考文献

- (1) 円山重直、"福島第一原子力発電所2号機事故の熱流動現象推定（熱力学モデルによる事故シナリオの検証）"、日本機械学会論文集 B編、Vol. 78, No.796, (2012), pp. 2127-2141.
- (2) JSME テキストシリーズ「伝熱工学」、日本機械学会、(2005)。
- (3) 圓山, 小宮, 岡島研究室, "福島第一原子力発電所事故の熱解析と収束プランの提案", 東北大学流体科学研究所, <http://www.ifs.tohoku.ac.jp/~maru/atom/index.html>, (2011-2014)