

福島第一原発の事故における遮蔽ブロック上部の温度から の燃料集合体上端部温度の推定

東北大学流体科学研究所 圓山・小宮研究室

2011年3月31日作成

はじめに

東日本大震災における福島第一原発の爆発事故において、防衛省は上空 900m より赤外線カメラを用いて原子炉上部の温度計測を行った。Fig. 1 に IR イメージを示す。記事[1]には、1号機および3号機の遮蔽ブロック上部表面温度が 42 – 62°C であり、3号機の格納容器上端では 128°C と報告されている。この測定については、

- ・ 目標物（遮蔽ブロック）までの距離が長いこと
- ・ 測定器と目標物間が空気-水蒸気雰囲気であったこと

などから、測定誤差は大きいと考えられる。しかしながら、この情報より沸騰水型原子炉（BWR）内の定常温度分布を大まかに推定することは可能である。そこで大胆な仮定の下、簡易計算を試み、内部の温度分布を求めてみた。

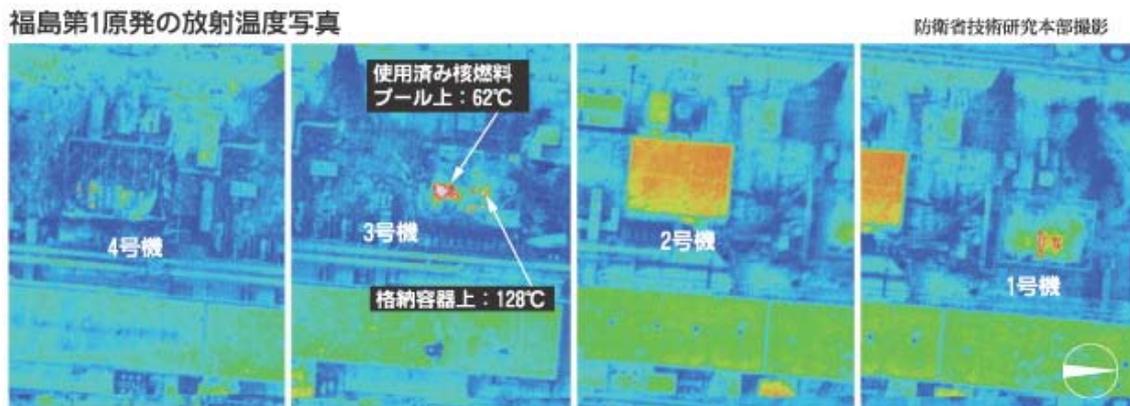


Fig. 1 福島第一原発 1-4 号機の上端温度分布[1]

計算対象

以下に示す諸仮定の下、定常一次元温度分布計算を行った。計算対象を Fig. 2 に示す。

< 仮定 >

1. 発熱は燃料棒からのみ。
2. 燃料棒上端から鉛直上向き方向に熱が移動。
3. 水蒸気雰囲気（REGIONs 1,2）および空気雰囲気（REGION 3）では、対流熱伝達およびふく射熱伝達。遮蔽ブロック上部と外気間の熱伝達率はユルゲスの式

$$h = 5.8 + 3.9v, v: \text{風速(m/s)}$$

より導出.

4. 周囲は断熱条件.
5. 容器のフタ等の固体内は熱伝導のみ.
6. 金属（鉄）の放射率は $\varepsilon = 0.5$. 燃料棒は複雑な形状をしているので見かけ上 $\varepsilon = 1.0$. 周囲断熱条件部分は $\varepsilon = 1.0$. コンクリートは $\varepsilon = 0.9$.
7. 圧力容器内, 格納容器内は3気圧の水蒸気雰囲気.
8. 熱物性値は温度に依存しない一定値とする.
9. スケールは東電/原子力関係団体の資料より推定. [2][3]
10. 対流熱伝達は $Nu \propto Ra^{1/3}$ のChurchillの線図より推定.
11. 物性値は以下の通り. [4][5]

Table 1 : 熱物性値

| | | 空気 | 水蒸気 | 鉄 | コンクリート |
|----------------------|------------------------------------|----------|----------|----|----------|
| 熱伝導率, λ | W/(m·K) | 3.30e-02 | 2.70e-02 | 80 | 1.6 |
| 熱拡散率, α | m ² /s | 3.69e-05 | 2.42e-02 | | 8.33e-07 |
| 動粘度, ν | m ² /s | 2.64e-05 | 2.40e-02 | | |
| | | | | | |
| S.B const., σ | W/(m ² K ⁴) | 5.67e-08 | | | |

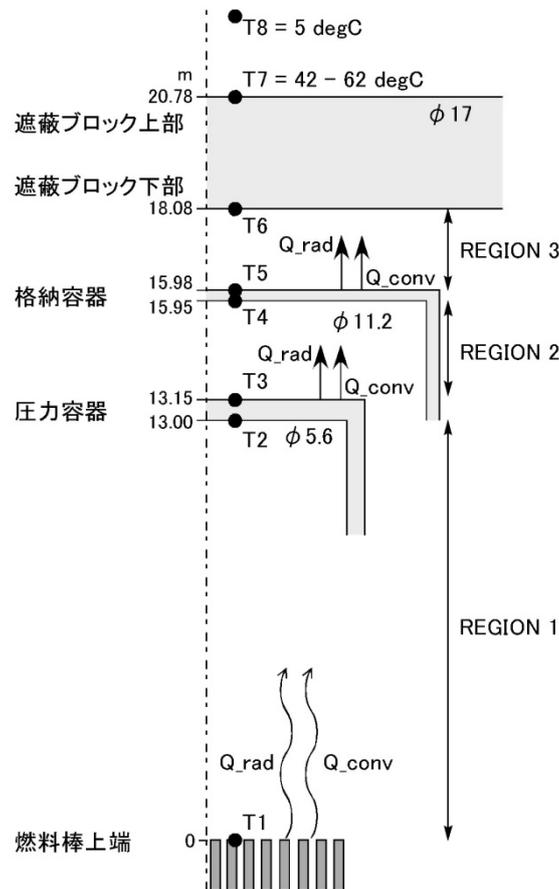


Fig. 2 BWR 内の定常温度分計算対象

計算結果

上記仮定の下、得られた BWR 内温度分布の結果を Fig.3 に示す。

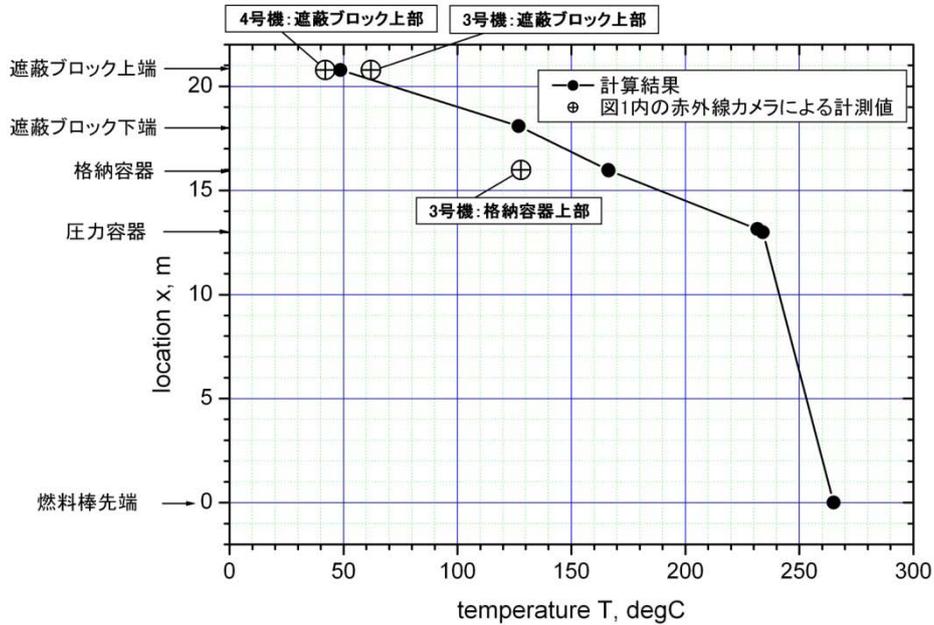


Fig. 3 BWR 内の定常温度分布推定

図 3 中には床が壊れて格納容器温度が計測された 3 号機のデータも示すが、本計算値と比較的類似な値になっている。図よりわかるように、本計算例では、燃料棒先端（炉心）では、550K であり、炉心融解温度ではないことが推定される。この外気雰囲気と燃料棒先端の温度差が大きくならなかった理由としては、圧力容器内における水蒸気層において Ra が大きくなり、結果的に対流熱伝達が促進されたためであると考えられる。また全体を通して熱抵抗の主なものがコンクリート製の遮蔽ブロックのみであることも一つの要因として挙げられる。また、圧力容器と燃料棒とは比較的大きな温度差が存在する。

特に注目すべきは REGIONs 1-3 におけるふく射伝熱の寄与である。対流熱伝達量と比較をするために、ふく射による熱輸送量を等価ふく射熱伝達率[6]

$$h_r \approx 4\sigma T_m^3$$

を用いて比較を行う。ここで T_m は平均温度である。朱書き部分が対流熱伝達率および等価ふく射熱伝達率である。これらからわかるように、ふく射伝熱量はどの領域においても対流熱伝達量の数倍の値を示しており、BWR 内ではふく射伝熱支配であることが分かる。

Figure 3 に示した燃料棒先端の温度はあくまで概略値の評価としての値である。この値がオーダーを超えて変わってくることは考えにくいだが、遮蔽ブロック上端より推定される炉内温度分布はふく射伝熱および対流熱伝達により大きな温度差はついていないことが類推され、今後は燃料棒からの発熱量を抑えていくことに集中し、炉の溶融を防いでいかなければ

ればならないと考える。

留意点

上記計算は定常計算であるが、コンクリート層においてフーリエ数 $Fo (= \alpha t / L^2)$ を考えると、 $Fo = 1.0$ となる実時間が 102 日（時定数：8.77e06 sec）となり、現象は非定常であることが分かる。つまり、燃料集合体上端や圧力容器が高温でも、それが表面温度の変化に現れるまで膨大な時間がかかる。つまり、燃料棒が高熱になっても表面の温度変化として合われるには多大な時間を要する。したがって、本現象は定常解析では中の温度分布推定は難しく、非定常でおこっている現象として解析しなければならないことに注意する必要がある。圧力容器上端の温度をモニターすれば比較的燃料棒の温度が推定でき可能性もある。

| TPP | | air | vapour | steel | concrete |
|------------|--------|----------|----------|--------|----------|
| Therm cond | W/mK | 3.30E-02 | 2.70E-02 | | 80 |
| T diff | m2/s | 3.69E-05 | 2.42E-05 | | 1.6 |
| vis | m2/s | 2.64E-05 | 2.40E-05 | | |
| SB | W/m2K4 | 5.67E-08 | | | |
| DT_R1 | | 28 | 31.05 | | |
| DT_R2 | | 90 | 65.20 | | |
| DT_R3 | | 29 | 39.32 | | |
| T1 | | 538.15 | | | 265 |
| Ra | | 1.98E+12 | | | |
| Nu | | 1.24E+03 | | | |
| h_conv | | 12.00 | | | |
| h_rad | | 32.66 | | | |
| Q_conv | | 8272.59 | | | |
| Q_rad | | 22503.40 | 3.08E+04 | | |
| T2 | | 507.10 | | | 233.95 |
| T3 | | 504.76 | | | 231.61 |
| Ra | | 7.25E+10 | | | |
| Nu | | 4.14E+02 | | | |
| h_conv | | 3.99 | | | |
| h_rad | | 22.04 | | | |
| Q_conv | | 8839.39 | | | |
| Q_rad | | 22187.74 | 3.10E+04 | | |
| T4 | | 439.56 | 426.40 | 13.16 | 166.41 |
| T5 | | 439.44 | | | 166.29 |
| Ra | | 1.07E+10 | | | |
| Nu | | 2.18E+02 | | | |
| h_conv | | 3.43 | | | |
| h_rad | | 17.40 | | | |
| Q_conv | | 9459.48 | | | |
| Q_rad | | 21582.80 | 3.10E+04 | | |
| T6 | | 400.12 | 418.82 | -18.70 | 126.97 |
| T7 | | 321.77 | 3.06E+04 | | 48.62 |
| T8 | | 278.15 | | | 5.00 |

Fig. 4 定常計算の計算シート例

計算方法

燃料棒の温度推定は、まず燃料棒先端の温度（Fig.1 中の T1）および圧力容器内側（Fig.1

中の T2) に仮の温度を与え, REGION 1 における対流熱伝達およびふく射伝熱量を求める. 対流による伝熱量 Q_{conv} [W] を求めるには, 熱伝達率 h が必要となるが, これは仮に与えた温度差 $\Delta T (= T_1 - T_2)$ からレイリー数 Ra を求め, Churchill によるヌッセルト数 Nu との関係 [7] から熱伝達率を求める. ここに Ra, Nu の各定義式および Churchill の関係式を示す.

$$Ra = g\beta\Delta TL^3 / (\alpha\nu)$$

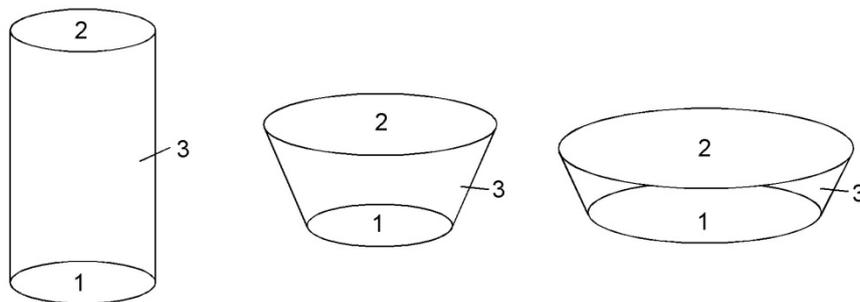
$$Nu = hL / \lambda$$

$$Nu = 0.1Ra^{1/3} \quad (\text{ただし, } 10^4 \leq Ra \leq 10^{11} \text{ の範囲})$$

ここで, g : 重力加速度, β : 体積膨張率 ($= 1 / (T_m[\text{°C}] + 273.15)$) である. 以上より

$$Q_{\text{conv}} = Ah(T_1 - T_2)$$

を求める. Churchill の関係式には範囲が定められているが, 必要に応じて外挿値を利用する. 一方, ふく射伝熱量 Q_{rad} は, Fig. 5 に示すように 3 体間の面要素で構成される閉空間のふく射伝熱を考える. 行列を用いて計算を行うが, その詳細方法については資料[8]を参照されたい. あらかじめ T1 を与え, Table 2 の値を用いて行列計算をし, ふく射伝熱量 Q_{rad} および温度 T2 を導出する. なお行列計算に必要な形態係数については, 資料[9]を用いた.



(a) REGION 1

(b) REGION 2

(c) REGION 3

Fig. 5 各 REGION での 3 体間ふく射伝熱解析形状

Table 2: 計算条件

| | A_i [m ²] | T_i [K] | Q_{Xi} [W] | ε_i |
|---|-------------------------|-----------|--------------|-----------------|
| 1 | 24.63 | 538.15 | | 1 |
| 2 | 24.63 | | 0 | 0.5 |
| 3 | 228.71 | 反復計算値 | | 1 |

Table 2 中の T_3 は, 行列計算の重要な変数となる. まず仮の値 ($T_3 < T_1$) を入れ, 行列計算により求めた仮の温度差 $\Delta T (= T_1 - T_2)$ と, 対流熱伝達計算時の ΔT が近い値となるように T_3 の値を変えていく. このとき, 計算結果で得られる T_2 と T_3 が大きな温度差を持たないように注意をする (炉では 2 と 3 は同一物であるため). 併せて対流熱伝達の計算も行っていく, 最終的に両者が大きなズレとならないような T2 を探し出す. エクセルでシートを作成して検索していく手段がよい. 以上の手順で Q_{conv} および Q_{rad} を求める.

T2 - T3 間の固体部分については熱伝導のみを考慮し，他の水蒸気層 (REGION 2)，空気層 (REGION 3) についても REGION 1 と同様の Q_{conv} および Q_{rad} 導出計算を行い，最終的に T7 が 42 - 62°C の範囲に収まるように T1 を決定する．同時に各層間での総熱量 $Q_{\text{total}} (= Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}})$ を評価し，保存されていることを確認しつつ，T1,T2,T4,T6 を変化させていく (Fig.4 中の青字の値)．T7 - T8 間は水平平板 (有限) の熱伝達を計算し，熱伝達率は<仮定>に記述したユルゲスの実験式により求めた．図 1 がリリースされたのは 3/20 であったので，その 1 日前の 3/19 の福島地方の天気を日本気象協会ホームページ (<http://tenki.jp/>) で調べたところ，風速は 0-2 m/s であったため，風速 $v=1.0$ m/s を採用した．各計算において，この伝熱量が保たれるよう T1, T2, T4, T6 を変化させていき，最終的に全ての温度を決定する．概略計算のため，値には多くの誤差が含まれているが，オーダーの評価はできると考えられる．

参考資料

- [1] <http://mainichi.jp/select/weathernews/20110311/archive/news/2011/03/20/20110321k0000m040106000c.html>
- [2] 火力原子力発電技術協会 (編) : 原子力発電所－全体計画と設備－
- [3] <http://cari.up.seesaa.net/image/bwr.png>
- [4] JSME 伝熱工学
- [5] 住友大阪セメント (株) 技術部資料 SOC-TTR-9902
- [6] 円山重直 : 光エネルギー工学, 養賢堂 (2004) , p.18.
- [7] 例えば 伝熱工学資料第 3 版 p.20.
- [8] 円山重直 : 光エネルギー工学, 養賢堂 (2004) , pp.83-89.
- [9] JSME テキストシリーズ「伝熱工学」