(1963年 10月 5日 受理)

— 参 考 文 献 —

- (1) 日本放射性同位元素協会編：“放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法令集”，(1960)。
- (2) J. P. STELMARK, H. C. LIN: *Electronical Engng.*, **7**, 504~515 (1961).
- (3) H. G. DILL: *IRE*, **7**, 239~250 (1961).
- (4) 垂井康夫：電子科学，**3**, 17~12 (1962).
- (5) 小島 勤：“時計の科学”，(1949)，コロナ社。

研究論文

363. JPDR の重大事故時における燃料棒温度の検討

都 甲 泰 正*, 山 崎 吉 秀**

Temperature of JPDR Fuel at Loss-of-Coolant Accident

By Yasumasa TOGO and Yoshihide YAMAZAKI

Calculations are made of JPDR fuel temperature at loss-of-coolant accident. At the accident, the reactor is scrammed either by a low-reactor-water-level signal or by a high-enclosure-pressure signal, and the core spray system is initiated.

In analyses, a fuel rod and a clad is divided into six and two annulus sections, respectively. Various cases with and without control rods and a core spray system in operation are evaluated. In evaluation of a case without a core spray system in operation, axial heat conduction in UO_2 is neglected before radial temperature distribution is flattened and after that, radial heat conduction is neglected to calculate axial temperature distribution.

ま え が き

日本原子力研究所のJPDR(動力試験炉)の安全性検討の一分野として、重大事故時における燃料棒の温度変化について検討を行なったので、その概要を報告する⁽¹⁾。

JPDRの炉心および燃料アセンブリーの断面図を第1図に示す。第2図に、最もピーキングの高い燃料セグメントのピーキングの様子を示してある。燃料棒は、上部および下部セグメントに分かれているが、ピーキングの高い下部セグメントに着目して解析を行なった。

JPDRの重大事故として想定した、12^号の冷却水配

管の破断を生ずると、压力容器内の水位、圧力は第4図に示すような変化をする。やがて、炉水位低下により、燃料セグメントが露出する。制御棒スクラムは、炉水位低下または格納容器内圧上昇の信号により行なわれる。また、15 sec 後には、炉心スプレー系統が自動的に起動するように設計されている。しかし、解析にあたっては、制御棒スクラムの行なわれない場合、炉心スプレー系統の始動しない場合についても検討を行なった。

* 東京大学工学部 (Faculty of Engng., Univ. of Tokyo).

** 関西電力㈱ (The Kansai Elect. Power Co., Inc.)

I. 解析方法

解析はつぎのような場合に分類して行なった。以下その分類に従って具体的に解析方法を述べる。

1. 事故前

初期条件に相当するもので、全出力運転(45 MWtの定常運転)をしているときの燃料棒内温度分布を求める。この場合の温度分布は、燃料棒内での熱発生と冷却材の熱除去との熱バランスより求められる。

燃料棒は第3図に示すようなメッシュにきざむ。

第3図 燃料棒分割構成

つまり燃料棒は半径方向に6等分し、被覆は2等分する。用いる符号は図に示すとおりである。これは事故後の計算においても同様である。

$$T_w - T_{co} = q' / h_f \quad (1)$$

$$T_{co} - T_{ci} = q' \cdot d / 2K_c \cdot \log d / (d - u) \quad (2)$$

$$T_{ci} - T_{co} = q' \cdot d / 2K_c \cdot \log d / (d - 2u) \quad (3)$$

$$T_{fo} - T_{ci} = q' \cdot d / (d - 2u) / h_g \quad (4)$$

この(1)~(4)式によって、燃料棒表面までの各メッシュ点における温度が求められる。燃料棒内の温度分布は

$$2\pi r \left(-K_{UO_2} \frac{dT}{dr} \right) = q''' \cdot \pi r^2 \quad (5)$$

から

$$-\int_{T_i}^{T_{i+1}} K_{UO_2} dT = q''' / 4 (r_{i+1}^2 - r_i^2) \quad (6)$$

によって、 UO_2 の熱伝導度曲線(6)式を満足する点まで積分することによって、 $T(6)$, $T(5)$, ..., $T(1)$ を求めた。

2. 事故後

事故後臨界未満となるまで、燃料棒内温度分布は定常状態の温度分布をしていると考える。臨界未満にな

るまでの時間は、炉内水位低下あるいは格納容器圧力上昇等のスクラム信号によって、制御棒が正常に挿入された場合は、スクラム信号が出されるまでの時間にデッドタイムを加えて2 sec 後には充分臨界未満になる。万一なんらかの原因で、制御棒が入らずスクラムすることができなかった場合には、有効炉心面、つまり燃料アセンブリの上面20 cm ぐらいのところまで水位が下がるまで臨界であるとする。(実際はボイドの増加などでその面まで水位が下がる以前に臨界未満になると考えられるが、そこまで臨界と考えた方が安全側の評価になる。) このさい臨界未満になるまでの時間は約7 sec である。炉水位低下の模様を第4図に示す⁽³⁾。

第4図 流出量, 水位, 圧力の経時変化

定常状態の温度分布は第5, 6図に見られるように、軸方向の温度勾配に対して半径方向の温度勾配はるかに大きい。それゆえ、最初熱伝導は半径方向にのみ行なわれると考え、半径方向と軸方向の温度勾配とがほぼ等しくなるまでは、軸方向の熱伝導は無視することにした。半径方向に温度勾配がバランスしたのちは(このケースは炉心スプレーを考えない場合にのみ存在する)、つぎの2つのケースについて解析を行なった。

- (1) バランスしたのちは、軸方向も半径方向も熱伝導を無視する。
- (2) バランスしたのちは、軸方向のみ熱伝導を考える。

以下、炉心スプレーを考えた場合、考えない場合、およびいずれも含んだ一般式から解析方法を述べてゆく。まず、軸方向の熱伝導を無視するから、熱バランスの微分方程式は(7)式のような一般式で書ける。

第5図 定常状態における燃料棒内温度分布

第6図 定常状態における軸方向温度分布

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(K_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q''' \quad (7)$$

この式において左辺は単位体積当りの熱量の時間変化、右辺第1項は単位体積表面から、熱伝導によって失われる熱量、第2項は単位体積当りの崩壊熱⁽⁴⁾および残留中性子束による熱発生⁽⁵⁾の和である。

この式をいま考えている燃料棒に適用し、燃料棒単位長当りの式に変形して数値解できるようにする。

第7図 UO₂ 熱伝導度

$$\int_{t-1}^t 2\pi r dr \frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = \int_{t-1}^t 2\pi r dr \frac{\partial}{\partial r} \left(rK \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \int_{t-1}^t 2\pi r dr q''' \quad (8)$$

$$V_i D_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = A_i K_i \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta r} - A_{i-1} K_{i-1} \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta r} + V_i q''' \quad (9)$$

$$\text{ただし, } D_i \equiv (c\rho)_i + \left(\frac{\partial c\rho}{\partial t} \right)_i$$

これを各メッシュに適用して

$$D_1 V_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = q''' V_1 - A_1 K_1 \frac{T_1 - T_2}{\Delta r} \quad (10)$$

$$D_2 V_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = q''' V_2 + A_1 K_1 \frac{T_1 - T_2}{\Delta r} - A_2 K_2 \frac{T_2 - T_3}{\Delta r} \quad (11)$$

$$D_6 V_6 \frac{\partial T_6}{\partial t} = q''' V_6 + A_5 K_5 \frac{T_5 - T_6}{\Delta r} - A_6 \left[\frac{1}{K_6} \cdot \frac{\Delta r}{2} + \frac{1}{h_q} + \frac{1}{K_c} \cdot \frac{u}{2} \right] (T_6 - T_{cc}) \quad (12)$$

$$D_c V_c \frac{\partial T_{cc}}{\partial t} = A_6 \left[\frac{1}{K_6} \cdot \frac{\Delta r}{2} + \frac{1}{h_q} + \frac{1}{K_c} \cdot \frac{u}{2} \right] (T_6 - T_{cc}) - A_{cc} \cdot E(T_{cc}) \quad (13)$$

これをさらに変形して

$$T_1(t+\Delta t) = T_1(t) + \frac{\Delta t}{D_1} \left[q_1'''(t) - \frac{\partial}{\partial r^2} K_1 \{ T_1(t) - T_2(t) \} \right] \quad (14)$$

$$T_2(t+\Delta t) = T_2(t) + \frac{\Delta t}{D_2} \left[q_2'''(t) + \frac{2}{3\Delta r^2} K_1 \{ T_1(t) - T_2(t) \} - \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{\Delta r^2} \cdot K_2 \{ T_2(t) - T_3(t) \} \right] \quad (15)$$

$$T_3(t+\Delta t) = T_3(t) + \frac{\Delta t}{D_3} \left[q_3'''(t) + \frac{4}{5} \cdot \frac{1}{\Delta r^2} K_2 \{ T_2(t) - T_3(t) \} - \frac{6}{5} \cdot \frac{1}{\Delta r^2} K_3 \{ T_3(t) - T_4(t) \} \right] \quad (16)$$

$$T_6(t+\Delta t) = T_6(t) + \frac{\Delta t}{D_6} \left[q_6'''(t) + \frac{10}{11} \cdot \frac{1}{\Delta r^2} K_5 \{ T_5(t) - T_6(t) \} - \frac{2}{11} \cdot \frac{1}{\Delta r} \cdot \frac{T_6(t) - T_{cc}(t)}{\left(\frac{1}{K_6} \cdot \frac{\Delta r}{2} + \frac{1}{K_c} \cdot \frac{u}{2} + \frac{1}{h_q} \right)} \right] \quad (17)$$

$$T_{cc}(t+\Delta t) = T_{cc}(t) + \frac{\Delta t}{c' \rho'} \left[\frac{12\Delta r}{d^2 - r_6^2} \cdot \frac{T_6(t) - T_{cc}(t)}{\left(\frac{1}{K_6} \cdot \frac{\Delta r}{2} + \frac{1}{K_c} \cdot \frac{u}{2} + \frac{1}{h_q} \right)} - \frac{2d}{d^2 - r_6^2} \cdot E(T_{cc}) \right] \quad (18)$$

以上述べてきた方法を各ケースにあてはめて計算してゆくが、各ケースによって燃料棒表面からの熱除去の項 $E(T_{cc})$ がいろいろな型をとる。

(1) 炉心スプレーを考えた場合

(a) 事故後スクラムした場合は 2 sec, しなかった場合は 7 sec から計算点が露出するまでは、

$$E(T_{cc}) = \frac{T_{cc}(t) - T_w}{\left(\frac{1}{K_c} \cdot \frac{u}{2} + \frac{1}{h_f} \right)} \quad (19)$$

この場合には、燃料棒表面からの熱除去は被覆の熱伝導率と表面の沸騰伝達係数の合成熱伝達率で行なわれると考えた。

ここで、熱伝達係数 h_f は 1,000 Btu/ft²·hr °F を用いた。

(b) 計算点が露出してから、事故後 15 sec で炉心スプレーが働き出すまで

$$E(T_{cc}) = 0 \quad (20)$$

この場合、蒸気自然対流による熱伝達率を算出した結果、非常に小さいので熱除去の項を零とした。

(c) 炉心スプレー作動後

$$E(T_{cc}) = \alpha \{ T_{cc}(t) - T_{SP} \}^{3/4} \quad (21)$$

事故後 15 sec で炉心スプレーが働き出すが、それ以後の熱除去は(21)式による⁽⁵⁾。

(d) 格納容器スプレー作動後(900 sec)

$$E(T_{cc}) = \beta \{ T_{cc}(t) - T_{SP} \}^{3/4} \quad (22)$$

(2) 炉心スプレーを考えない場合

(a) 臨界未満になってから計算点が露出するまでは、前項(1)の(a)に全く同一で

$$E(T_{cc}) = \frac{T_{cc}(t) - T_w}{\left(\frac{1}{K_c} \cdot \frac{u}{2} + \frac{1}{h_f} \right)} \quad (23)$$

(b) 計算点が露出したのち、半径方向の温度分布が中心部と表面部分との差で 15°C 以内にバランスするまで

$$E(T_{cc}) = 0 \quad (24)$$

(c) 半径方向の温度分布がバランスした後

この場合には、もう半径方向の伝熱は無視できるものとして(7)~(18)式は用いず、すでに述べたようにつぎの2つのケースについて解析

してゆく。

- (i) 半径方向にも軸方向にも伝熱がないものとした場合

$$(c\rho V + c'\rho'V_c) \frac{dT_{av}}{dt} = q''' V \quad (25)$$

から

$$T_{av}(t + \Delta t) = T_{av}(t) + \frac{\Delta t \cdot q''' V}{(c\rho V + c'\rho'V_c)} \quad (26)$$

によって計算する。

- (ii) 半径方向の熱伝導は無視するが、軸方向には熱伝導を考える。

この場合には燃料セグメントを軸方向に n 等分し、そこに熱バランスの微分方程式をたてて解いてゆく。

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q''' \quad (27)$$

$$\pi r^2 dz \frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = \pi r^2 dz \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \pi r^2 dz q''' \quad (28)$$

$$\int_{j-1}^j dz \frac{\partial(c\rho T)}{\partial t} = \int_{j-1}^j dz \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \int_{j-1}^j dz q''' \quad (29)$$

$$\Delta z D_j \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial T}{\partial z} \int_{j-1}^j \frac{\partial T}{\partial z} + \Delta z q''' \quad (30)$$

$$D_j \frac{\partial T}{\partial t} = K_{j+1} \frac{T_{j+1} - T_j}{\Delta z^2} - K_j \frac{T_j - T_{j-1}}{\Delta z^2} + q''' \quad (31)$$

$$T_j(t + \Delta t) = T_j(t) + \frac{\Delta t}{D_j} \left\{ K_{j+1} \frac{T_{j+1}(t) - T_j(t)}{\Delta z^2} - K_j \frac{T_j(t) - T_{j-1}(t)}{\Delta z^2} + q''' \right\} \quad (32)$$

半径方向の温度分布がバランスした後は、この(32)式に計算をランチさせる。初期条件としては、前の計算の最終値の平均を用いた。

以上のような解析手順に従って、各メッシュ点の温度と、事故後から Δt ずつ時間間隔を進めながら、繰返し計算によって計算を行なった。計算機は IBM 0を用いた。

この事故解析に用いた諸値

1) 崩壊熱曲線

第8図に示したものを曲線近似して用いた。

2) 酸化ウランの熱伝導率

第7図に示したものをを用いた。

$$K(T) = \frac{30}{283.16 + T} \cdot \frac{\rho}{\rho_0} + 2.55 \times 10^{-12} (T + 273.16)^3 \quad (33)$$

第8図 崩壊熱

(3) 残留中性子束による熱発生

炉が臨界未満になっても、なお $\sec$ 間かは残留している中性子束によって熱発生が起こる。これをアナログ計算機によって解析し、その結果を曲線近似して用いた。

制御棒が入りスクラムした場合

$$q'(t) = 115.1 e^{-10.4t^2} + 6.07 e^{-0.25t} \quad (34)$$

スクラムしなかった場合

$$q'(t) = 115.1 e^{-10.4t^2} + 6.07 e^{-0.50t} \quad (35)$$

(4) 酸化ウランの比熱と密度の積

$$c\rho = 3.049 + 3.484 \times 10^{-4} T \quad (36)$$

を用いた⁽⁶⁾。

II. 解析結果

第5図に示したのが全出力定常運転状態での燃料棒内温度分布である。中心温度 $1,635^\circ\text{C}$ 、被覆表面温度 330°C となっている。熱伝達係数としては fouling 効果も考えに入れ $3,000 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$ を用いた。第6図が軸方向の温度分布で、被覆中心温度はほとんど軸方向に勾配はなく、燃料棒中心温度で約 20°C/cm の勾配をもっている。

第9図以下に、peaking factor の最も大きい点での1連の計算結果を示した。第9, 10, 11図に示したものが、スクラムした時の炉心スプレーがある場合、ない場合の経時温度変化の様様である。スクラム信号が入って実際に炉がスクラムするまでの時間を、dead time など考えに入れて 2 sec とし、この間、炉は定常運転状態が続くと仮定した。それより後、臨界未満になっても燃料棒内では、崩壊熱と残留中性子束によって熱発生を続けつつ、中心部分の熱は表面に向かって流出してゆく。そして計算点が露出すれば表面からの熱除去がなくなるため、被覆温度は急激に上昇を始める。しかし 15 sec 後には炉心スプレーが働き出すために、ただちに被覆温度は下降を始める。この間燃料棒中心温度は、しだいに勾配をゆるめながら下降を続け、炉心ス

プレーが始まってからしばらく横ばい状態をとったのち、被覆温度に平行して下降してゆく。第11図に点線で T_{av} として示したものは炉心スプレーを考えなかつ

第9図 半径方向温度分布の経時変化

第10図 半径方向温度分布

第11図 燃料棒温度経時変化

た場合の温度上昇の模様で、表面は露出したままであるため、全体がバランスした後は崩壊熱によって1体となって温度上昇を続ける。

第12, 13, 14図は、スクラムしなかった場合についての計算結果である。この場合は、圧力容器内の水位が下がってきて初めて炉は臨界未満になると考える。つまり事故後約7 sec間には定常状態を保っているという安全側の計算を行なった。

この場合、スクラムした場合に比べて計算点が露出するまでの炉水への熱除去が少ないため、15 sec後に炉心スプレーが働き出すまでの被覆温度の上昇が大きく、それよりさきの温度降下の傾向は、スクラムした場合と同じようなもので、 $5^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ ぐらいの割合で冷却されてゆく。

第12図 半径方向温度分布

第13図 半径方向温度分布

第14図 燃料棒温度経時変化

第15図はスクラムしなかった場合、炉心スプレーもえない場合、半径方向の温度分布がバランスした軸方向の熱伝導のみを考えて計算した結果であり、16図は、半径方向も軸方向も熱伝導を考えない場合、軸方向の各メッシュ点での温度変化である。

第15図 軸方向温度分布経時変化

第16図 燃料棒温度経時変化

Ⅲ. 結 論

- (1) 冷却材そう失後約 20~30 sec で、燃料棒の半径方向温度分布は平坦化される。

- (2) 炉心スプレーが作動しないと、燃料棒の温度は上昇をつづける。しかし、温度上昇率は、ピーキング最大(P.F.=3.45)の場合でも、約 5°C/sec に過ぎず緩やかである。それゆえ、炉心スプレー系統の始動が遅れても、大したことはない。
- (3) UO_2 燃料では、 UO_2 の熱伝導度が小さいので、軸方向温度分布の平坦化はほとんど期待できない。
- (4) 制御棒スクラムが行なわれなかった場合、制御棒スクラムが行なわれた場合に比し、 UO_2 温度上昇がかなり大きくなる(P.F.=3.45の燃料棒で約 270°C)ので、ピーキングの大きい燃料棒被覆の破損を生ずる可能性を生ずる。また、炉心スプレーが万一作動しない場合の、 UO_2 溶融までの時間的余裕が短くなる。

(1963年 12月 9日 受理)

〔記 号〕

- q', q'', q''' : 単位長, 単位面積, 単位体積当り熱量
 $T(I), T_{fo}, T_{cr}, T_{co}$: 第3図に示す点での温度
 T_{SP} : 炉心スプレー温度
 h_f : 膜沸騰伝達係数
 h_g : ヘリウムギャップの熱伝達係数
 K : 酸化ウランの熱伝導率
 K_c : 被覆の熱伝導率
 c : 酸化ウランの熱容量, c' : 被覆の熱容量
 ρ : 酸化ウランの密度, ρ' : 被覆の密度
 r_i : メッシュ点 i 番目までの半径
 V_i : " i 番と $i-1$ 番間の体積
 A_i : 半径 r_i なる円筒の表面積
 d : 燃料セグメント外径
 r_0 : 燃料棒外径, $\Delta r: r_0$ の 1/6
 V_c : 単位長当りの被覆の体積
 A_{co} : 単位長当りの被覆の表面積
 u : 被覆の厚さ
 Δz : 燃料セグメントの 1/n
 α : 炉心スプレーのみ作動している状態での冷却係数
 β : 炉心スプレーも格納容器スプレーも共に作動している状態での冷却係数

— 参 考 文 献 —

- (1) 山崎吉秀, 久家靖史, 都甲泰正: 昭和38年日本原子力学会年会, F51, (1963.4).
- (2) J.L. BATES: *Nucleonics*, **83**, 6, 19 (1961).
- (3) 黒沢 昭, 都甲泰正: 昭和38年日本原子力学会年会, F52, (1963.4).
- (4) J.R. STEHN, E.F. CLANCY: *A/Conf.*, 15/P/1071, (1958).
- (5) S. LEVY, J.A. HODDE: *GEAP*-3318, (1961).
- (6) U.S.AEC: "Properties of UO_2 ".