

京都大学原子炉実験所

(研究用原子炉の変更)

熱水力設計について

平成 19 年 12 月

文部科学省

(1) 概要

熱水力設計では、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時においても燃料の健全性が維持されることを示す。

なお、熱水力設計で使用されている熱伝達相関式及び沸騰開始温度の評価式は、KUR に低濃縮ウランシリサイド燃料 2 体を先行導入した際の設置変更（平成 3 年）において使用された実績のある式である。

(2) 設計方針

本原子炉は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料の許容設計限界を超えないように、以下の方針を満足するように設計するとしている。

- 1) 通常運転時には、燃料のいかなる点においても 1 次冷却水が沸騰しないこと。
- 2) 運転時の異常な過渡変化時においても、最小 DNBR が 1.5 以上であること。
- 3) 運転時の異常な過渡変化時においても、燃料芯材温度が 400°C を超えないこと。

上記方針のうち、2) はバーンアウトによる燃料の損傷防止のためであり、また、3) はブリスト発生防止のためである。

(3) 解析方法

本評価において使用している解析コードの概要について添付 1 に示す。また、解析コードで使用している熱伝達相関式及び DNB 相関式の KUR への適用性について添付 2 に示す。

i) 沸騰開始温度の解析方法

沸騰開始温度は燃料板表面で核沸騰が開始する温度であり、次の Bergles-Rohsenow の式⁽¹⁾を用いて、計算している。

$$T_s = T_{sat} + \frac{5}{9} \left(\frac{q_0}{911p^{1.156}} \right)^{\frac{p^{0.0234}}{2.16}}$$

ここで、 T_s : 沸騰開始温度 [°C]

T_{sat} : 飽和温度 [°C]

q_0 : 評価点における局所熱流束 [kcal/(m²·h)]

p : 評価点における局所冷却水の圧力 [kgf/cm²]

ii) 最小 DNBR の解析方法

限界熱流速（DNB 熱流束）を沸騰熱伝達の過程において、核沸騰から離脱（Departure from Nucleate Boiling）するときの熱流束と定義している。最小 DNBR（最小限界熱流束比）は、実際の熱流束（評価値）に対する DNB 熱流束の比の最小値である。

最小 DNBR は以下の DNB 相関式^{(2), (3)}を用いて計算するとしている。通常運転時の

最小 DNBR は、COOLOD コード^{(4), (5)} を、運転時の異常な過渡変化は、EUREKA-2 コード⁽⁶⁾ 又は THYDE-W コード^{(7), (8)} を用いて計算している。

a) 下降流 ($G \leq 0$) の場合、次の 2 式から求めた値のうち、小さい方の値をとる。

$$q_{\text{DNB}}^* = 0.005 \cdot |G^*|^{0.611}$$

$$q_{\text{DNB}}^* = \frac{A}{A_H} \cdot \frac{\Delta h_i}{h_{\text{fg}}} \cdot |G^*|$$

上記の 2 式から選んだ値が、次式から求めた値より小さいときは、次式の値とする。

$$q_{\text{DNB}}^* = 0.7 \cdot \frac{A}{A_H} \cdot \left\{ W \cdot \left[\frac{\gamma_l}{\sigma} \right]^{0.5} \right\}^{0.5} / \left\{ 1 + \left[\frac{\gamma_g}{\gamma_l} \right]^{0.25} \right\}^2$$

ここで、

$$q_{\text{DNB}}^* = \frac{q_{\text{DNB}}}{h_{\text{fg}} \left\{ \left[\frac{\sigma}{\gamma_l} \right]^{0.5} \cdot g \cdot \gamma_l \cdot \gamma_g \right\}^{0.5}}$$

$$G^* = \frac{G}{\left\{ \left[\frac{\sigma}{\gamma_l} \right]^{0.5} \cdot g \cdot \gamma_l \cdot \gamma_g \right\}^{0.5}}$$

q_{DNB} : DNBR 熱流束 [kcal/(m²·s)]

G : 質量速度 [kg/(m²·h)]

h_{fg} : 蒸発潜熱 [kcal/kg]

σ : 表面張力 [kgf/m]

γ_l : 飽和水の比重量 [kgf/m³]

γ_g : 飽和蒸気の比重量 [kgf/m³]

g : 重力加速度 [m/s²]

A : 流路断面積 [m²]

(冷却水流路幅 × 冷却水路厚さ)

A_H : 伝熱面積 [m²]

(燃料芯材幅 × 燃料芯材長さ × 2)

Δh_i : 流路入口サブクールエンタルピ [kcal/kg]

W : 冷却水流路幅 [m]

b) 上昇流 ($G > 0$) の場合、次の 2 式から求めた値のうち、大きい方の値をとる。

$$q_{\text{DNB}}^* = 0.005 \cdot |G^*|^{0.611}$$

$$q_{\text{DNB}}^* = 0.7 \cdot \frac{A}{A_H} \cdot \left\{ W \cdot \left[\frac{\gamma_\ell}{\sigma} \right]^{0.5} \right\}^{0.5} / \left\{ 1 + \left[\frac{\gamma_g}{\gamma_\ell} \right]^{0.25} \right\}^2$$

iii) 燃料芯材の熱伝導率

U_3Si_2 の熱伝導率はアルミニウムの7%程度と小さく、芯材の熱伝導率は基本的にアルミニウムマトリックスにより決まるとしている。芯材の熱伝導率は、約100W/(m·K)であって、燃焼度及び温度によって大きな変化をしないとしている。

U_3Si_2 の熱伝導率は添付3に示されている。解析では、芯材の熱伝導率として、97.5 W/(m·K)を使用するとしている。

vi) 熱伝達率の解析方法

熱伝達率は以下の相関式⁽³⁾により計算するとしている。

a) 液単相下降流

乱流域 ($\text{Re} \geq 2500$)

$$\text{Nu} = 0.023 \text{Re}_b^{0.8} \text{Pr}_b^{0.4} \quad (\text{Dittus-Boelter の式}^{(9)})$$

ここで、 Re : Reynolds 数

Nu : Nusselt 数

Pr : Prandtl 数

また、添え字 b は物性値をバルク水温で計算することを意味する。

層流域 ($\text{Re} < 2000$)

$$\text{Nu} = 4.0$$

遷移域 ($2000 \leq \text{Re} < 2500$)

上記の2式を直線的に内挿する。

b) 液単相上昇流

乱流域 ($\text{Re} \geq 2500$)

上昇流に同じ Dittus-Boetler の式を使用する。

層流域 ($\text{Re} < 2000$)

次の2式のうち、いずれか大きい方の値を使用する。

$$\text{Nu} = 4.0$$

$$\text{Nu} = 0.17 \text{Re}_b^{0.33} \text{Pr}_b^{0.43} (\text{Pr}_b / \text{Pr}_w)^{0.25} \text{Gr}_b^{0.1} \quad (\text{Collier の熱伝達相関式}^{(10)})$$

ここで、 Gr : グラスホフ数

添え字 W 及び b は、それぞれ伝熱面温度及び冷却水バルク温度における物性値を意味する。

遷移域 ($2000 \leq \text{Re} < 2500$)

上記の2式を直線的に内挿する。

(4) 解析に用いる工学的ホットチャンネル因子

熱水力特性の計算においては、結果が厳しくなるように炉心の出力分布、工学的ホットチャンネル因子等を考慮するとしている。計算に使用する工学的ホットチャンネル因子及び核的ピーキング因子を第1表に示す。

ここで、核的ピーキング因子は、添付書類八の第8-3-2表に記載の値（最小炉心の値）である。また、工学的ホットチャンネル因子に関する説明を添付4に示す。

(5) 評価

定格出力運転時の熱特性の解析結果を第2表に示す。

i) 燃料板表面温度

定格出力運転時の燃料板表面最高温度は約92℃であり、1次冷却水は沸騰することとはなく、設計方針を満足するとしている。

ii) 最小 DNBR

定格出力運転時の最小 DNBR は約 4.5 であり、運転時の異常な過渡変化時の判断基準である 1.5 を十分満足するとしている。添付書類十に示されているとおり「10-2 運転時の異常な過渡変化の解析」のうち DNBR が最小となる事象は「起動時における制御棒の異常な引抜き」としているが、このときの最小 DNBR は約 2.3 であり、判断基準（1.5 以上）を満足するとしている。

iii) 燃料芯材最高温度

定格出力運転時の燃料芯材最高温度は約 95℃であり、運転時の異常な過渡変化時の判断基準である 400℃を十分に下回っており、設計方針を満足するとしている。添付書類十に示されているとおり「10-2 運転時の異常な過渡変化の解析」のうち燃料芯材温度が最も高くなる事象は「起動時における制御棒の異常な引抜き」であるが、このときの最高温度は約 129℃であり、判断基準（400℃未満）を満足するとしている。

参考文献

- (1) A. E. Bergles and W. M. Rohsenow, "The Determination of Forced-Convection Surface-Boiling Heat Transfer," J. Heat Transfer, 86, p.365 (1964).
- (2) 数土幸夫, 他, "JRR-3 改造炉熱水力解析用熱伝達相関式の検討," JEARI-M 84-066 (1984).
- (3) Y. Sudo and M. Kaminaga, "A New CHF Correlation Scheme Proposed for Vertical Rectangular Channels Heated From Both Sides in Nuclear Research Reactors, J. Heat Transfer, 115, p.426 (1993).

- (4) 渡辺終吉, “板状燃料を使用する研究炉の熱水力計算コード COOLOD,” JAERI-M 84-162 (1984).
- (5) M. Kaminaga, “COOLOD-N2: A Computer Code for the Analysis of Steady-State Thermal-Hydraulics in Research Reactors,” JAERI-M94-052 (1994).
- (6) 大西信秋, 他, “軽水炉の反応度投入事象解析コード EUREKA-2,” JAERI-M 84-074 (1984).
- (7) Y. Asahi, K. Matsumoto and M. Hirano, “THYDE-W: RCS (Reactor Coolant System) ANALYSIS CODE,” JAERI-M 90-172 (1990).
- (8) Y. Asahi, “THYDE-NEU: Nuclear Reactor System Analysis Code,” JAERI-Data/Code 2002-002 (2002).
- (9) F. W. Dittus and L. M. K. Boelter, “Heat Transfer in Automobile Radiators of Tubular Tube,” Univ. Calif. Publs. Eng., 2(13), p.443-461 (1930).
- (10) J. G. Collier, “Convective Boiling and Condensation,” McGraw-Hill, New York (1972).

第1表 工学的ホットチャンネル因子及び核的ピーキング因子

工学的ホットチャンネル因子	バルク水温上昇ホットチャンネル因子 (Fb)	1.54
	境膜温度上昇ホットチャンネル因子 (Fq)	1.34
	熱伝達係数ホットチャンネル因子 (Fh)	1.37 ^a 1.43 ^b
核的ピーキング因子	水平方向断面出力分布因子 (FR)	1.44
	垂直方向軸出力分布因子 (FZ)	1.40

a : Dittus-Boelter の式使用時、b ; Collier の式使用時

第2表 定格出力運転時の熱特性の解析結果

解析結果*	平均 チャンネル	ホット チャンネル
最小 DNBR (-)	8.69	4.50
最大熱流束 (W/cm ²)	30.95	59.72
燃料芯材最高温度 (°C)	73.19	95.23
燃料板表面最高温度 (°C)	70.87	91.92
1次冷却水最高温度 (°C)	55.86	64.21

* 以下の条件における COOLOD を用いた解析結果

原子炉出力 : 5.5MW、1次冷却水流量 : 800m³/h、

1次冷却水炉心入口温度 : 49.0°C

