4.4 事故時の燃料損傷挙動

4.4.1 燃料損傷挙動

炉心の著しい損傷開始温度として LOCA 基準の 1200 ℃が用いられており、高温時のジ ルカロイと水蒸気との酸化反応による反応熱を考慮すると定性的には妥当と考えられるが ⁽¹⁾、より定量的な検討として、MELCOR コードを用いて被覆管の昇温特性及び注水効果を 解析評価した。

(1) 解析条件

解析コードは、MELCOR 2.2⁽²⁾を用いた。表 4.4.1-1 及び表 4.4.1-2 に炉心体系及び入力 条件、図 4.4.1-1 に炉心モデルを示す。炉心体系は BWR-3 として、燃料領域を径方向に 2 分割、軸方向に 4 分割の合計 8 領域に分割して解析を実施した。MELCOR コードではジル カロイ被覆管と水蒸気との酸化反応式は Urbanic-Heidrick の式を用い、827 ℃から酸化反 応を考慮している⁽²⁾⁽³⁾。解析では、比較として被覆管の酸化反応を考慮しないケース、つま り崩壊熱のみを考慮した解析及び、高温酸化特性の抑制が期待される事故耐性燃料 (ATF、 コーティング被覆管)を想定して酸化反応の開始温度を Zr-Cr の共晶反応⁽⁴⁾を考慮して 1300 ℃にしたケースを実施した。

図 4.4.1・2 に事故シナリオを示す。スクラム直後に RCIC(原子炉隔離時冷却系、Reactor Core Isolation Cooling system)が作動し、1.5 時間後に RCIC を含む全電源喪失事故を想 定し、その時点において急速減圧、減圧沸騰による水位低下が発生することを仮定した。1.5 時間後の炉心圧力は、定格出力の約 1%まで低下している。さらに注水の影響を評価するた めに注水タイミング、注水量をパラメータとした解析を実施した。注水量は、公開データ⁽⁵⁾⁽⁶⁾ を参考にして表 4.4.1・3 に示す 50、100、150、200 m³/h とし、被覆管温度が最も厳しくな る 109 領域 (図 4.4.1・1 の赤枠領域) において被覆管温度が各 900 ℃、1000 ℃、1100 ℃、 1200 ℃、1300 ℃、1400 ℃のタイミングで注水した。

(2) 解析結果

図 4.4.1-3 に酸化反応有無それぞれの条件について被覆管温度及び昇温速度を示す。酸化反応無しでは、崩壊熱により被覆管温度は直線的に上昇する傾向となるのに対して、酸化反応すりでは、酸化反応が開始する 823 ℃より被覆管温度が上昇し、1200 ℃付近より加速傾向を示した。

図 4.4.1-4 は、図 4.4.1-3 より評価した各被覆管温度における昇温速度を示す。酸化反応 無しでは、昇温速度は~0.5 ℃/s で被覆管温度に対してほぼ一定であった一方、酸化反応有 りでは被覆管温度の上昇に伴い、昇温速度も高くなり、1200 ℃付近より、加速的に増加す る傾向が認められ、1400 ℃では酸化反応無しと比較して、酸化反応有りの昇温速度は5倍 ほど高くなった。 図 4.4.1-5 は、1200 ℃からの各被覆管温度(1300 ℃ / 1400 ℃ / 1500 ℃) までの到達時間を示す。1200 ℃から 1400 ℃までの到達時間は、酸化反応無しで約 2 分、酸化反応有りで約 10 分であった。

図 4.4.1-6~図 4.4.1-11 は、酸化反応有無における各被覆管温度(900 °C / 1000 °C / 1100 °C / 1200 °C / 1300 °C / 1400 °C) 時点で表 4.4.1-3 に示す流速で注水した場合の被 覆管温度上昇を示す。図 4.4.1-12~図 4.4.1-17 に解析結果を整理したものを示す。酸化反応 有りのとき、被覆管温度が 1100 °C~1300 °Cに達した条件では注水量 50 m³/h で、被覆管 温度が 1400 °Cに達した条件では注水量 50 m³/h、100 m³/h で、注水しないケースの昇温 速度を上回った。この原因は、図 4.4.1-18 に示した炉心内の水蒸気分圧変化より、被覆管 の温度上昇に伴い炉心内の水蒸気が枯渇したが、注水をしたことで再び炉心内に水蒸気が 発生したことで水蒸気分圧が上昇し酸化反応が加速したと考えられる。図 4.4.1-19(1)~(6) は、注水時の炉心水位変化を示す。再冠水に要する時間は、各注水量において 0.3 時間 (200 m³/h) ~1.5 時間(50 m³/h)であった。図 4.4.1-20 に注水以降の被覆管最高温度をまとめ たものを示す。酸化反応有りのとき、注水量 50 m³/h では 1100 °Cから 1400 °Cのいずれの 被覆管温度で注水しても被覆管温度は 2000 °Cまで達したが、注水量 150、200 m³/h では、 被覆管温度は 1600 °Cを超えることはなかった。一方、酸化反応無しでは、注水量 50 m³/h の低い流速においても被覆管温度は 1500 °Cを超えることはなかった。

今回の解析では、スクラム後 1.5 時間のタイミングで減圧を行っており、被覆管温度や昇 温速度はこのタイミングに対する評価値である。減圧タイミングが変わるとこれらの温度 特性も変わってくる。スクラム後の減圧までの時間が長くなると、崩壊熱も減衰し、昇温速 度が小さくなるため酸化膜厚さが厚くなり、酸化反応熱も減少する。今回の解析では、ジル カロイの酸化反応速度定数は、下記の Urbanic-Heidrick の式⁽²⁾⁽³⁾を用いている。

| dt | | |
|-----------------|--|--|
| | 酸化反応速度定数 | |
| ジルカロイ-水蒸気 反応 | $K(T) = 29.6 \exp(\frac{-16820.0}{T}) (\text{kg}^2/\text{m}^4\text{-sec})$ | |

 $\frac{dw^2}{dt} = K(T)$

酸化反応定数の温度依存性を図 4.4.1-21 に示す。これより、酸化反応速度定数は 1200 ℃ より増加傾向となる。減圧タイミングの影響を確認するためにスクラム後 0.1 時間、0.5 時 間及び 24 時間で減圧を行った酸化反応有りの解析を実施し、各時間における昇温速度を比 較したものを図 4.4.1-22 に示す。また、図 4.4.1-23 は、酸化反応有無における昇温速度比 で整理した図を示す。減圧タイミング 0.1 時間、0.5 時間、1.5 時間及び 24 時間の各ケース において 1200 ℃付近より加速傾向で、昇温速度に対する酸化反応の寄与は崩壊熱と比較 して数倍であることが分かる。図 4.4.1-22 より 24 時間で減圧した場合の昇温速度は、0.1 時間、0.5 時間、1.5 時間と比較して昇温速度は小さくなっているものの、1300 ℃付近での

4.4-2

昇温速度は 1 ℃/s 前後であり、これは 10 分程度で被覆管融点に達することになる。総じて、被覆管昇温特性の観点では、減圧タイミング 0.1 時間、0.5 時間、1.5 時間及び 24 時間の間に大きな違いはなかった。

また、高温酸化特性の抑制が期待される事故耐性燃料(ATF、コーティング被覆管)を 想定して酸化反応の開始温度を 1300 ℃としたケースで解析を実施した。図 4.4.1-24 は、 酸化反応有無における被覆管の温度上昇を示す。酸化反応開始温度が 827 ℃では、酸化反 応開始後から被覆管温度が上昇し1200 ℃付近より加速傾向を示し、酸化反応開始温度13 00 ℃ケースでは、酸化反応開始直後より被覆管温度が急激に上昇する傾向となった。図 4.4.1-25 は、図 4.4.1-24 より評価した各被覆管温度における昇温速度を示す。酸化反応開 始温度が 827 ℃では被覆管温度の上昇に伴い、昇温速度も高くなり、1200 ℃付近より、 加速的に増加する傾向が認められ、1400 ℃では酸化反応無しと比較して、昇温速度は5 倍ほど高くなり、酸化反応開始温度1300 ℃ケースでは、酸化反応無しと比較して昇温速 度は1400 ℃で5倍、1500 ℃で10倍ほど高くなった。図4.4.1-26は、被覆管温度1300 ℃において注水量をパラメータとした解析例を示す。注水量が 50 m³/h の場合、酸化反 応の有無で比較すると酸化反応無しの方が注水開始時間は約10分遅くなり、注水以降の 被覆管最高温度が 1500 ℃以下であった。図 4.4.1-27 は、酸化反応の違いによる被覆管温 度 1200 ℃までの到達時間を示す。酸化反応開始温度(1300 ℃)の方が酸化反応開始温 度(827 ℃)より到達時間が約7分遅かった。図4.4.1-28は、1200 ℃からの各被覆管温 度(1300 ℃ / 1400 ℃ / 1500 ℃)までの到達時間を示す。1200 ℃から 1400 ℃までの 到達時間は、酸化反応開始温度が827 ℃で約2分、酸化反応開始温度が1300 ℃で約5 分であった。図 4.4.1-29 は、酸化反応有無における被覆管温度 1200 ℃時点で表 4.4.1-3 に示す流速で注水した場合の被覆管温度上昇を示す。図 4.4.1-30 に解析結果を整理したも のを示す。図 4.4.1-31 は、注水時の炉心水位変化を示す。再冠水に要する時間は、各注水

量において 0.3 時間(200 m³/h) ~1.5 時間(50 m³/h)であった。

(3) まとめ

炉心の著しい損傷開始温度として LOCA 基準の 1200 ℃が用いられており、その妥当性 を検討するために MELCOR コードを用いて被覆管の昇温特性及び注水効果に関する解析 を実施した。解析は、酸化反応を考慮したケースと考慮しないケースで実施した。酸化反 応無しでの被覆管の昇温速度は、被覆管温度に対してほぼ一定で 0.5 ℃/s 以下であった。 一方、酸化反応有りでは酸化反応開始温度を 827 ℃と 1300 ℃にしたケースで実施した。 両ケースとも被覆管温度の増加に伴い昇温速度も増加傾向にあり、酸化反応開始温度が 82 7 ℃では酸化反応速度定数に対応して被覆管温度 1200 ℃付近より昇温速度は約1 ℃/s に 達し、1200 ℃以降ではさらに加速する傾向が認められた。酸化反応開始温度 1300 ℃ケ ースでは被覆管温度 1300 ℃付近より昇温速度が増加し、被覆管温度 1400 ℃付近では約 2 ℃/s に達した。 注水効果に関して、注水する被覆管温度をパラメータ(900 ℃/1000 ℃/1100 ℃/ 1200 ℃/1300 ℃/1400 ℃)とした解析を実施し、例えば、注水量 100 m³/h では 900 ℃~1300 ℃では注水が間に合うが、1400 ℃では間に合わず被覆管温度は融点以上とな り、被覆管の温度上昇は、注水の観点からも厳しくなる傾向であることを確認した。

高温酸化特性の抑制が期待される事故耐性燃料(ATF、コーティング被覆管)を想定し て酸化反応の開始温度を1300 ℃とした解析では、被覆管溶融を十数分遅らせる、また注 水による温度抑制が有効な時間区間についても有意に延伸させる効果が確認される一方、 一部の実験的研究でも指摘されている如く、酸化反応開始後の温度急昇の度合いが従来材 を上回っていることを確認した。

以上の結果を踏まえると現行の炉心損傷基準 1200 ℃は妥当であり、高温酸化特性の抑 制が期待される事故耐性燃料では、ATF における高温酸化の抑制効果及び共晶等高温反応 開始後の酸化挙動の双方についてそのメカニズムとともに詳細を把握することが重要であ る。

表 4.4.1·1 炉心体系

| 項目 | 条件 |
|-------|---------|
| 炉心 | BWR-3 |
| 原子炉出力 | 1380 MW |
| 原子炉圧力 | 7.0 MPa |

表 4.4.1-2 入力条件

| 計算条件項目 | 条件 |
|-----------|--------------------------------------|
| 崩壊定数 | ORIGEN 計算に基づく崩壊熱曲線 |
| 燃料ロッド | ペレット半径 約5mm |
| | 被覆管半径 約6mm |
| | 燃料ピッチ 約16mm |
| 炉心領域径方向及び | 径方向 2 |
| 軸方向分割数 | 軸方向 4 |
| 金属·水反応 | Zr 酸化反応計算式: Urbanic-Heidrick |
| | 酸化反応開始温度:1100 K (827℃)、1573 K(1300℃) |
| 被覆管破損条件 | 被覆管温度:1173 K (900℃) |
| 炉心溶融落下条件 | 被覆管落下温度:2500 K (2227℃) |
| | 被覆管(ジルカロイ)融点:2093 K (1820℃) |
| | 酸化ジルカロイ融点:2502 K (2229℃) |
| | 二酸化ウラン融点:2503 K (2230℃) |

表 4.4.1-3 注水量について

| ケース | 注水量 |
|-----|--------|
| No. | (m³/h) |
| 1 | 0.0 |
| 2 | 50.0 |
| 3 | 100.0 |
| 4 | 150.0 |
| 5 | 200.0 |



図 4.4.1-1 炉心モデル



図 4.4.1-2 炉心の圧力及び水位変化



図 4.4.1-3 酸化反応有無における被覆管の温度上昇



図 4.4.1-4 各被覆管温度における昇温速度(スクラム後約 1.5 時間で減圧)



図 4.4.1-5 1200℃からの各被覆管温度(1300℃/1400℃/1500℃)までの 到達時間(スクラム後約 1.5 時間で減圧)



図 4.4.1-6(1) 酸化反応有無における被覆管温度 900℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇



図 4.4.1-6(2) 酸化反応有無における被覆管温度 900℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇



図 4.4.1-7(1) 酸化反応有無における被覆管温度 1000℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇



図 4.4.1-7(2) 酸化反応有無における被覆管温度 1000℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇



図 4.4.1-8(1) 酸化反応有無における被覆管温度 1100℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇



図 4.4.1-8(2) 酸化反応有無における被覆管温度 1100℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇

4.4 - 15



図 4.4.1-9(1) 酸化反応有無における被覆管温度 1200℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇



図 4.4.1-9(2) 酸化反応有無における被覆管温度 1200℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇



(b) 注水量 100.0 m³/h

図 4.4.1-10(1) 酸化反応有無における被覆管温度 1300℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇



図 4.4.1-10(2) 酸化反応有無における被覆管温度 1300℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇



図 4.4.1-11(1) 酸化反応有無における被覆管温度 1400℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇

4.4-20



図 4.4.1-11(2) 酸化反応有無における被覆管温度 1400℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇



図 4.4.1-12 被覆管温度 900℃時点における注水効果(被覆管温度)



図 4.4.1-13 被覆管温度 1000℃時点における注水効果(被覆管温度)



図 4.4.1-14 被覆管温度 1100℃時点における注水効果(被覆管温度)



図 4.4.1-15 被覆管温度 1200℃時点における注水効果(被覆管温度)



図 4.4.1-16 被覆管温度 1300℃における注水効果(被覆管温度)



図 4.4.1-17 被覆管温度 1400℃における注水効果(被覆管温度)

4章



(a) 注水なし



(b) 注水量 50.0 m³/h

図 4.4.1-18 被覆管温度 1400℃時点で注水した場合の炉心内の水蒸気分圧変化



図 4.4.1-19(1) 被覆管温度 900℃時点で注水した場合の炉心水位変化

4章



図 4.4.1-19(2) 被覆管温度 1000℃時点で注水した場合の炉心水位変化



図 4.4.1-19(3) 被覆管温度 1100℃時点で注水した場合の炉心水位変化



図 4.4.1-19(4) 被覆管温度 1200℃時点で注水した場合の炉心水位変化



図 4.4.1-19(5) 被覆管温度 1300℃時点で注水した場合の炉心水位変化



図 4.4.1-19(6) 被覆管温度 1400℃時点で注水した場合の炉心水位変化



図 4.4.1-20 被覆管温度(900℃/1000℃/1100℃/1200℃/1300℃/1400℃)における 注水量の効果(縦軸は注水以降の被覆管最高温度を示す)



図 4.4.1-21 酸化反応速度定数



図 4.4.1-22 スクラム後の減圧タイミングをパラメータとした感度解析 (酸化反応有り)



図 4.4.1-23 スクラム後の減圧タイミングをパラメータとした感度解析 (酸化反応有無における昇温速度比)



図 4.4.1-24 酸化反応有無における被覆管の温度上昇



図 4.4.1-25 各被覆管温度における昇温速度(スクラム後約 1.5 時間で減圧)



図 4.4.1-26 被覆管温度 1300℃において注水量をパラメータとした解析例



図 4.4.1-27 酸化反応開始温度の違いによる 1200℃到達時間(注水なし)



図 4.4.1-28 1200℃からの各被覆管温度(1300℃/1400℃/1500℃)までの 到達時間(スクラム後約 1.5 時間で減圧)



図 4.4.1-29(1) 酸化反応有無における被覆管温度 1200℃時点で注水した場合の 被覆管温度上昇(Cr コーティング ATF を想定)



酸化反応有無における被覆管温度 1200℃時点で注水した場合の 図 4.4.1-29(2) 被覆管温度上昇(Cr コーティング ATF を想定)

4章



図 4.4.1-30 酸化反応有無における被覆管温度 1200℃時点における 注水効果(Cr コーティング ATF を想定)



図 4.4.1-31 被覆管温度 1200℃時点で注水した場合の炉心水位変化 (Cr コーティング ATF を想定)