

平成22年(ワ)第591号 MOX燃料使用差止請求事件

直送済

原告 石丸ハツミ、外129名

被告 九州電力株式会社

追加準備書面

2014(平成26)年10月30日

佐賀地方裁判所 民事部 合議2係 御中

原告ら訴訟代理人

弁護士 冠 木 克 彦



弁護士 武 村 二三夫



弁護士 大 橋 さ ゆ り



復代理人

弁護士 谷 次 郎



第1 はじめに

- 1 被告は、準備書面21の第3において、単純に水中にある物体の温度は水で冷却されるから急激に上昇することはないという、ある意味で素人的常識に基づいて主張しているようである。

鍋に水を入れて沸騰させていく場合、最初に単体の気泡が生じてくるが、この状態を「核沸騰」という。その部分で液体が気体に「気化」している現象であるが、だんだん熱していくと、その気泡が一面に生じて水蒸気の膜で覆われる状態になる。これを「膜沸騰」という。この状態になると鍋の表面と水の境目に水蒸気が覆っている状態になり、鍋から水への熱の移動は著しく阻害される。この基本的な科学的知識を被告は無視しているようである。

- 2 なお、本書面では、これまで論点とされてこなかった水-ジルコニウム反応が起こることについて論じるが、被告が従前「表示」してきた内容と異なる「表示」を今回の最終準備書面（準備書面20）で行うことによって、EFPHに関する主張を事実上訂正していることを末尾に指摘しておく。

第2 被告の主張「被覆管の損傷・炉心の著しい損傷に至らないこと」について

1 被告の主張

原告らが最終準備書面37～38頁で、水-ジルコニウム反応により被覆管の温度が融点に達すると主張したことに対し、被告は、「仮にギャップ再開からペレット溶解が始まる事態を想定しても、通常運転中の原子炉においては、燃料棒の外側は冷却水に接し冷却されているため、被覆管の温度が急激に上昇することは考えられず、被覆管の温度が900℃に達することはなく、従って原告らの主張するような事態が発生することはない」（被告準備書面21 3頁）という。

2 反論の要点

- (1) 被告の反論に対する原告らの反論の要点を最初に記述する。被覆管の外側（外表面）が冷却水に接していると言っても、被覆管外表面では水蒸気が発生しているので、被覆管は水蒸気の介在を通じて冷却水と接している。それゆえ、被覆管

外表面と冷却水の間には温度差が生じているのである。

ペレットが溶融するほどの高い温度の場合、その熱が被覆管に伝わり、被覆管外表面と冷却水の温度差が広がる。被覆管外表面に水蒸気の泡がポツポツと発生する「核沸騰」の状態では、冷却水が大きな蒸発熱を被覆管から奪うので、被覆管から冷却水への熱の伝達（熱流速）は大きく、被覆管の外表面温度はゆっくりとしか上昇しない。ところが、やがて被覆管外表面の多くの部分が水蒸気の膜で覆われるような状態に達し、さらに一面が水蒸気膜で覆われる「膜沸騰」状態に達する。熱の冷却水への伝達（熱流速）は、核沸騰から混合沸騰（核沸騰と膜沸騰の混合状態）に移行すると逆に低下し、膜沸騰の段階からまたやや上昇する。原子炉の被覆管についていえば核分裂によって熱は供給され続けているところ、被覆管から冷却水への熱の伝達（熱流速）が低下するため、被覆管外表面の温度は急速に高まり、たちまちのうちに1000℃程度に到達する。

このような核沸騰から膜沸騰への移行に際し燃料被覆管の温度が急速に上昇するという、原子力の世界ではよく知られた事実から被告は目をそらしているようである。

(2) なお念のため、被告が準備書面21の3～4頁で強調しているスリーマイル島原発事故と本件で想定している場合との条件の違いについて触れておきたい。この条件の違いについては、次のように整理できる。

スリーマイル島原発事故においては、核分裂は停止して発熱源は崩壊熱（放射線のエネルギーによる熱）のみであり、燃料上部には冷却水がない状態で水蒸気による冷却のみであった。そのため燃料上部の被覆管の温度が上昇し、水（水蒸気）—ジルコニウム反応が起こった。

本件で想定している場合では、熱は核分裂によって供給されているので発熱量ははるかに高く、ギャップの拡大で冷却率が下がって燃料ペレットの温度は溶融し始めるほどに高まり、その熱が被覆管に伝わって核沸騰から膜沸騰への移行が起こることにより、事実上被覆管表面ではスリーマイル島原発と同様に水蒸気しか存在しないという状態になる。こうして、冷却水への熱流が落ちるため被覆管の

温度が上がり、水—ジルコニウム反応が起こることになる。

それゆえ、水—ジルコニウム反応が起こるといってそれ自体の条件には基本的に変わりはない。以下、鍵となる核沸騰から膜沸騰への移行について詳述する。

3 核沸騰から膜沸騰への移行

核沸騰から膜沸騰への移行について原子力発電技術読本（甲97）に従って述べる。この本の著者である豊田正敏氏は、東京電力副社長で原子力本部長を務めた人であり、この著書は1987年（昭和62年）6月ですでに第2版第13刷発行となるほどに技術者等の間で広く読まれていた。

まず、右の甲第97号証の13頁の図2・17で注目すべきは、被覆管の外表面温度 θ_1 と冷却水温度 θ_w が異なっていることである。

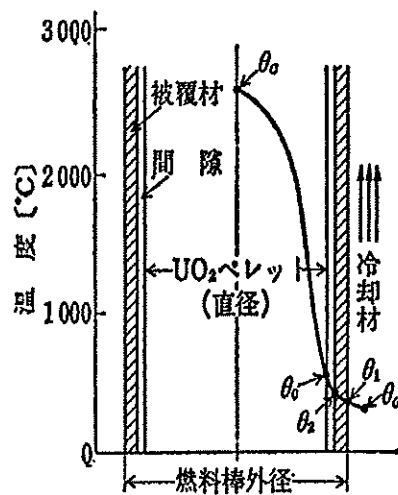


図 2・17 燃料棒内の温度分布

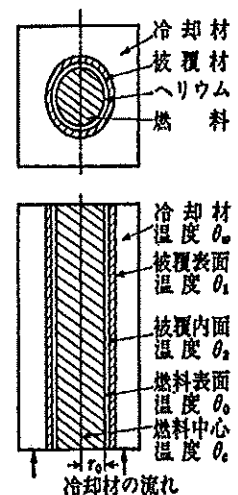


図 2・18 単位セル

次に、同36頁の図2-20について見て行く。横軸には被覆管外表面温度 θ_1 と冷却水の飽和温度（沸点） θ_w (=約346°C) との差（過熱度）がとられている。縦軸には被覆管外表面から冷却水への熱流を表す熱流速（単位面積・単位時間当たり）に流れる熱量 (kcal/m² h) がとられている。同36頁の上から6行目以下を引用する。

沸騰現象を説明するのによく用いられるのが図2・20である。これは大きな容器に水を入れ、水中に加熱した針金をひたした場合で、横軸は、加熱体表面温度と水の飽和温度との差 ($\theta_1 - \theta_w$)、すなわち、過熱度であり、縦軸は熱流束である。図で AB 間は沸騰が全然起こらない単相対流の領域である。BC 領域に入ると針金の一部に蒸気泡ができる。これが核沸騰の領域である。

C 点においては、加熱面の約半分が蒸気によっておおわれるようになり、ここで熱流束の極大値ができる。C 点の熱流束は焼損熱流束（バーン・アウト熱流束）と呼ばれる。これはまた限界熱流束と実際上同じと考えてよい。CD 間では加熱面の蒸気膜は不安定となって、針金の温度を上げると熱流束は逆に減

図 2・20 沸騰流体における熱流束と過熱度との関係

少する。D点以降は全加熱面は薄い蒸気膜でおおわれ、膜沸騰の領域になる。

実験で図2-20の曲線に沿って加熱を続け、C点を少しでも越えて加熱すると、CD間で沸騰は不安定なため、過熱度は急速にR点に移ってしまう。この状態では針金の温度は急速に高温になり、普通その温度は加熱体の強度を損うほど高い値(E)になる。これは燃料被覆材の溶融破壊を意味するものであり、軽水炉ではこの状態を避けるように設計することになっている。

図2-20のグラフ上のC点が核沸騰から混合沸騰への移行点であり、この点を超えると熱流束が減って熱の伝達が悪くなり、D点で一面が蒸気膜に覆われる膜沸騰状態に移行し、横軸で示す被覆管温度が急速に上昇する。引用した説明に書かれているように、C点（過熱度 24°C 被覆管外表面温度 370°C ）を超えると「過熱度は急速にR点に移ってしまう」。R点の過熱度は約 800°C なので、被覆管温度は 1100°C を超えることになる（ $346+800=1146$ ）。こうして、被覆管温度は 370°C を超えるとたちまち 900°C 以上に達してしまうので、水ジルコニウム反応が起こり被覆管は短時間で融点に達してしまう。

4 ペレットが溶融し始めたときの被覆管外表面温度

この問題では、被告も認めているように、「ペレット溶融が始まる事態」を想定している。このとき、MOXペレットの中心温度は約 2400°C 以上に達している。通常運転時の中心温度は右図（甲98の2）より約 1800°C なので、 600°C ほど温度が高い状態にある（この図の温度分布は、輸入燃料体検査申請書1-51頁（甲99）のデータとほぼ整合

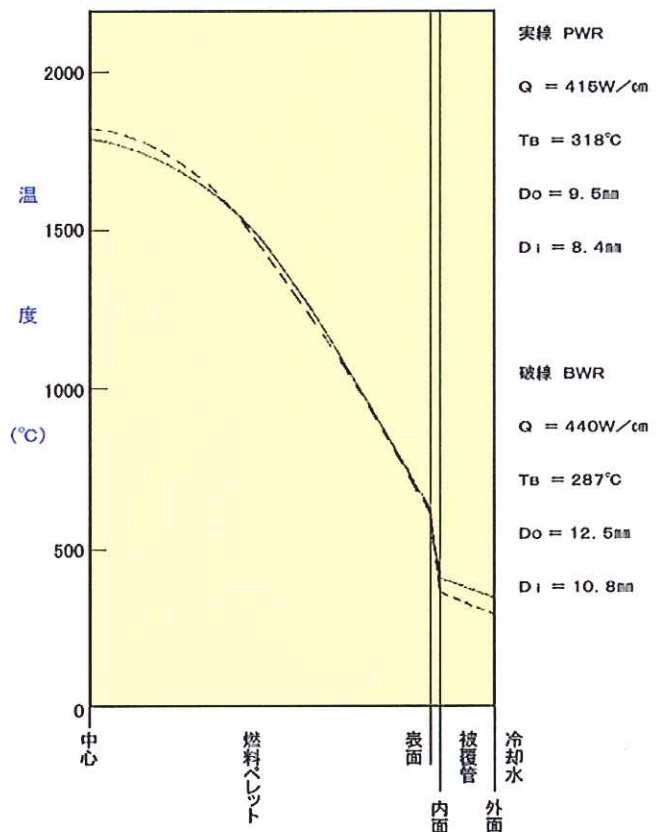


図1 燃料棒内温度分布(典型例)

【出典】三島良輔 他(編):軽水炉燃料のふるまい(平成2年改訂版)、原子力安全研究協会(1990)p.37

ATOMICA軽水炉燃料の炉内挙動(通常時) (03-06-01-06)

している)。このとき、核分裂は継続しており、発生した熱はペレットから被覆管へと伝わっていく。ペレットの温度が高まると、それに応じて熱が被覆管へと流れ、結果として被覆管外表面温度を高めることになる。

通常、被覆管外表面温度は右図によれば約346°Cであるが、前記図2-20により過熱度 ($\theta_1 - \theta_w$) が24°C程度になるとC点に達する。このときの被覆管外表面温度は前述のとおり $\theta_1 = \theta_w + 24 = 346 + 24 = 370$ °C程度である。つまり、被覆管外表面温度は通常状態(346°C)から30°C程度上がるだけでC点に達する。そうすると前述したように急速にR点に移って、被覆管外表面温度は900°Cを超えてしまう。

ペレット中心温度が通常より600°C上がると被覆管外表面温度が何度上がるかという正確な計算は、条件によって異なるし、正確なデータも必要となる。C点に達するのに必要な約30°Cは中心温度上昇600°Cのわずか5%に過ぎないので、定性的議論だけで十分であろう。

5 補足

念のために以下の考察を行う。いまの場合、燃料温度が上がって燃料が溶け始める状態に至ったのは、ギャップ再開によりサーマルフィードバックが起こった結果である。サーマルフィードバックによりギャップが拡大すれば、ギャップにおける熱伝達率が下がり、ペレット表面から被覆管内表面への熱伝達が悪くなり、被覆管温度が上がりにくくなる。

しかし、いまはペレットが溶け始めるまでになった事態を想定している。そうすると燃料の変形(リロケーション)が起こってペレット下部が膨らみ、部分的に被覆管内表面に接触するなどの事態が起こる。少なくともその部分で上記のようなプロセスを経て水-ジルコニウム反応が始まれば、酸化発熱反応により被覆管全体の温度上昇が起こることになる。

6 結論

結局、燃料ペレット中心温度が通常より600°C程度上がってペレットが溶け始め

るとき、ペレット内の熱が被覆管に伝わり被覆管外表面の温度を約30℃高まった段階から、核沸騰状態から混合沸騰状態へ、さらには膜沸騰状態への移行が起こる。その結果、被覆管温度は急速に上昇し、被覆管外表面温度が900℃以上に高まって水-ジルコニウム反応が激しく起こり、わずか30分ほどで被覆管は融点に達することになる。

第3 被告がEFPHを修正したことについて

被告は準備書面20（最終準備書面）19頁の図11においてペレット燃焼度を説明する際、横軸に「ペレットの燃焼時間」をとっている。この図は基本的に小鶴証人の陳述書16頁の図12と同じ図、同じタイトル、同じ説明であるが、ここでは横軸が「原子炉の経過時間（EFPH）」となっていた。この点、証人尋問の中で小山英之証人が（EFPH）が書かれているのは間違いだと指摘していた（小山証人調書、18頁、58項）。結果的にこの指摘を受け入れて修正したものである。

この図は被告のEFPHに関する理解の根幹を示すものだったが、そのような重要な事項について、自らの考えを修正したものと理解できる。

以 上