

ORIGINAL PAPER

Insights from the Recent Steam Explosion Experiments in TROI

Jin Ho SONG*, Seong Wan HONG, Jong Hwan KIM, Young Jo CHANG,

Yong Seung SHIN, Beong Tae MIN and Hee Dong KIM

原子力科学技術ジャーナル、Vol. 40 巻、10 号、p. 783–795 (2003 年 10 月)

オリジナル紙

TROI における最近の蒸気爆発実験の洞察

SONG *, ソン・ワン・ホン、キム・ジョンファン、チャン・ヨンヨン、姜泳泰 (キム・ミヨン)

韓国原子力研究所、305-353、泰州、儒城区 Dukjin-Dong 150

(平成 15 年 3 月 7 日受理、平成 15 年 6 月 17 日改訂版受付)

この論文では、TROI-13、TROI-14、TROI-15 の蒸気爆発実験の結果について議論しています。

「水との相互作用 (TROI) のための試験」と名付けられた研究プログラムの下で行われた。TROI-13 および TROI-14 は、 UO_2 と ZrO_2 の混合物であり、TROI-15 は ZrO_2 を使用していたが、70:30 重量%の混合物である。これらの 3 つケースは自発的な蒸気爆発を引き起こした。以前の実験では見られなかったように、原型的な材料の爆発性の観点から重要な観察である。テスト結果のさまざまな側面、水冷るつぼの熔融、水素の発生、熔融温度の測定、残骸の形態、デブリ、動的圧力、動的力、メルトジェットの形状、トリガーの位置、容器圧力の応答、水プール温度の応答について議論する。コリウムの爆発の潜在的な原因提案されています。

キーワード：重大事故、蒸気爆発、燃料冷却材相互作用、コリウム、真のコリウム水相互作用のテスト、(TROI)、爆発性、反応器材料

I. はじめに

原子炉の安全性に関する研究¹⁾は、熔融炉心と水との相互作用は過酷事故のさまざまな現象の中での大きなリスクであると認めてきた。

それは原子炉圧力容器および格納容器の初期故障の潜在的メカニズムである。

原子炉で起こるかもしれない劣化した熔融炉心の冠水中、または熔融炉心が水で満たされた下部容器ヘッド内または容器外に落下し、または熔融した熔融炉心が排出されたときの元の容器内に冷却用にキャビティに浸水された冷却水が流れ込んだときなどに起きることがある。

水蒸気爆発の実験的研究は過去数10年間行われた。2-7)

前回の主な成果研究は、アルファモードの失敗の確率がとても低い。しかし、爆発の根本的な問題の反応器材料は依然として未解決である。

事故管理とin-vessel維持に重点を置いた高度な軽水炉のための維持戦略、最近の蒸気爆発への関心は、原子炉容器に対する潜在的な脅威の評価下部頭部およびex-vessel維持、なら

びにデブリの冷却性における蒸気爆発の役割8)。「Test for Real cOrium水との相互作用 (TROI)」はこれらの問題に対処するために、韓国原子力研究所で1997年から実施されている。9) 本稿では、TROIプログラムの一環として実施されたTROI-13、TROI-14、およびTROI-15実験の結果について説明します。

実験の初期条件および境界条件ならびに結果の簡単な要約を以下に示す。

表1。

表1に示すように、初期条件と境界条件TROI-13およびTROI-14のコリウム試験およびジルコニアTROI-15のテストはほぼ同じです。

最近のFAROやKROTOS実験の外部トリガーであっても、非エネルギー的な相互作用が観測され、原子炉の材料が蒸気爆発を引き起こさないと考えられたため、これらのケースでは自発的な蒸気爆発が起こったのは驚きです。6, 7)

実験結果の様々な側面メルトジェット条件、水冷るつぼ溶融、水素生成、溶融物の温度測定、デブリの形態、デブリのサイズ分布、動圧、動力、メルトジェットの形状、トリガーの位置、容器圧力、およびプール水温の応答について議論する。

II. 実験の説明

実験施設は、図 1 に示すように、炉容器、低位置圧力容器、および下部容器内に配置された試験セクションからなる。

炉容器はるつぼおよび溶融物放出アセンブリを含む。

燃料冷却剤の相互作用は、炉容器内の坩堝から重力によって供給される溶融燃料ジェットと試験セクション内の水プールとの間に生成される。

計測器の設定とタグ付けは、図 1 にも示されている。

試験部の壁面および圧力容器には、圧電圧力変換器 (PCB Piezotronics Inc.、モデル 112A、最大圧力 60MPa、立ち上がり時間 $2\mu\text{s}$ 、共振周波数 250kHz) を動圧を測定するために取り付ける。

静圧変換器 (Druck 社、モデル pmp4060、最大圧力 35bar、応答時間 1kHz) は、試験容器および格納容器の内部の過渡圧力を測定する。

ザ VXI システム (800 kHz サンプリング/チャンネル、1 kHz /チャンネル) データ収集には Agilent Technology が使用されています。一時的な 100Hz の 2 つの異なる周波数でデータを取得する 1 つの制御プログラムで 50kHz とする。

高速デジタルビデオイメージングシステム (Phantom V 4. 0、 512×512 ピクセル 1, 000 pps) は、爆発性の燃料クーラントの相互作用画像を撮影します。実験のために、CCD カメラを 4 拠点 (下位 2 拠点、上の容器に 2 つ) でイベントのシーケンスを監視する。

融解および溶融放出技術は、燃料冷却剤相互作用実験に必要である。融点が非常に高い材料を取り扱うので、信頼できる溶融技術を開発することは非常に困難な工学的問題である。

この実験では、水冷るつぼ技法が成功裏に施された。水冷るつぼ溶融技術は、組成制御と良好に混合された溶融材料の獲得の点で独特である。

冷やするつぼ技法がうまく実装されたこの実験ではコールドルツボ溶融技術は、それは構成管理の点で独特で、よく混合された溶融材料である。電気溶解炉 6) およびテルミット反

応 5) とは異なり、それは汚染および/または副産物を伴わない。開始剤を用いたセラミック材料の熔融の開始後、熔融は、導電性材料の誘導加熱によって達成される。ZrO₂ 粉末および UO₂ ペレットは劣った導体であるので、Zr 金属リングは開始剤として使用される。酸化物の電気伝導率が温度と共に増加するにつれて、誘導電流およびオーム損失は、開始剤の加熱のために混合物の温度が上昇するにつれて増加する。その後、開始剤付近の ZrO₂ 粉末の熔融が始まる。誘導電力が連続的に供給されると、熔融ゾーンが拡張する。セラミックスの中でもコリウムが良好な導電体であるので、水冷るつぼは良好な熔融性能を有する。

典型的な充填パターンおよび試験後の水冷るつぼは、それぞれ図 2 および図 3 に示す。UO₂ ペレットと ZrO₂ 粉末との混合物を充填に使用する。

水冷るつぼの中心部には人工的に通気孔が設けられており、2 色の光高温系を用いた温度測定に使用されています。

熔融池は、水冷るつぼの底部に多孔性粉末を形成された上に作られる。

熔融池の深さは図 3 から見る事ができる。ここで、水冷るつぼ壁に形成された黒いクレストは、熔融池境界を示す。

熔融物は、るつぼの底部に形成された穴を通して供給される。

るつぼの上部には、熔融したジルコニア粉末と未熔融 UO₂ ペレットからなる全熔融期間中に厚いクレストが維持される。図では上部のクレストが壊れて底部が示されています。

III. 結果と討議

1. コリウムメルトジェット

TROI 実験においてプロトタイプのメルトジェット条件を保存することが非常に望ましい。PWR と BWR の典型的なジェット条件は乱流状態にあり、メルトジェットは水プールに入る前に破壊されないことが指摘されている 11)

周囲 Weber 数は、 ρ_a が周囲流体の密度であり、 V_{jet} が熔融ジェットの速度であり、 d_{jet} が熔融ジェットの直径であり、 σ_{jet} が熔融ジェットの表面張力であるものとして表される。

$$We = \rho_a V_{jet}^2 d_{jet} / \sigma_{jet}, \quad (1)$$

0.5 N/m の値は、Karen (1999) の σ_{jet} について取ったものです。メルトジェットは TROI 実験で重力だけで送達された。

ウェーバー数は出口で約 0.3、水面に接触する直前に 3.5 である。

したがって、熔融ジェットは遷移領域にある。だから、プロトタイプの状態とはかなり異なっています。

毛細管破壊、メルトジェットの蛇行した撓み、および剪断によるメルトジェットのストリップングを含む様々な崩壊メカニズムが存在する。

2. 水冷るつぼ融解の分析

発電機から供給された電力が水冷るつぼ内の熔融物に供給されると、表面上の誘導電流によりコイルとるつぼを通して電気エネルギーが失われる。

残りの電気エネルギーは溶融物に供給される。

これは、溶融物の加熱に使用され、熱損失を補償する。これは、るつぼの頂部の穴を通る輻射熱損失と、溶融物と水冷るつぼとの間のクラストを通る水冷るつぼへの熱損失。

熱収支は、式

$$Q_m = Q_{tr} + A_v \varepsilon F (T_{4m} - T_{4a}) + A_{cr} k (T_m - T_{finger}) / \delta \text{ となる。 (2)}$$

ここで、 Q_m は溶融物に吸収される電気エネルギー、 Q_{tr} は溶融物の過渡加熱に使用されるエネルギーであり、 A_v は上層のベントホルの面積、 ε は放射率であり、 F は溶融表面からの形状係数であり、通気孔、 T_m はコリウムの融解温度、 T_a は空気温度、 A_{cr} はクラストの表面積、 k T_{finger} はクラストの伝導率であり、 T_{finger} は指（指は図2に示されている）、 δ はクラスト厚さ。水冷るつぼ上の上部クラストは良好な絶縁性を提供するが、亀裂が形成される場合上部のクラストには、放射線。定常状態に達すると、過渡加熱期間は無視できる。

水冷るつぼ溶融は、外部から冷却された氷に含まれる水の誘導加熱のようなものです。誘導加熱によって水が加熱されると、るつぼの厚さが減少する。

次に、るつぼ壁を通る熱損失が増加する。誘導電力が減少すると、るつぼの厚さは凍結によって増加する。したがって、この自己補償機構によって準平衡状態に達する。

水冷るつぼ内の温度分布の考え方を与えるので、溶融液プール内の液体の動きが重要である。

電磁力および誘導電流の強さは、水冷るつぼの壁の近くで最も高い。

この電磁力は溶融したコリウムを中心にに向けて押し出し力のように押し出し、対流運動を引き起こす。したがって、コリウム溶融物に及ぼされる電磁力は流体を効果的に攪拌する。

TROIのための溶融るつぼの分析は、コンピュータプログラムを用いて行った。(12, 13)。

これは、壁の近くに2つの対流セルがあり、対流運動のための最大流体速度が約11cm / sであることを示した。

この流体運動のレイノルズ数は約33,000である。動きが乱れているため、強い混合が発生します。クラストと溶融液プールとの界面における流体温度は、液相線と固相線温度の間にある。

ホットスポットは固体壁に非常に近く、良好な混合が存在するので、溶融温度は融点溶融温度よりもはるかに高くない。

典型的な分析結果(13)は、最高温度が融解温度に近い平均温度よりも約100-200°C高いことを示している。

3. 水素発生と化学分析

FAROEおよびKRATOS実験におけるコリウムの非爆発特性は、水素生成に起因すると考えられ、これは溶融物の周りの蒸気膜を安定化させるであろう。(6)

彼らは示唆していたが、水素生成の起源は明確には分かっていなかった。UO_{2-x}からUO₂またはUO₂からU₃O₈のいずれかの酸化機構の可能性がある。

水素濃度はガスサンプリング法により測定する。200ccのガスサンプリングシリンダを圧力容器に接続して、サンプルガスを収集する。

マススペクトロメトリー (Precision gas mass spectrometer、Finnigan MAT271) から、水素含量を測定した。

最大量は、6.545kgの溶融物から0.73gであったが、FARO L19試験では、157kgのコリウムから300gのH₂が回収された。したがって、TROIにおける水素生成は、FAROデータの10%未満である。

潜在的な酸化メカニズムを調べるために、デブリの化学分析を行った。1,700°Cの水素環境下で12時間還元実験を行った。質量変化は検出されなかった。したがって、破片の組成は (U_{1-y}Zr_y) O₂であると結論付けることができる。これは水素のサンプリングデータと一致しており、水素生成はわずかであることが示されています。

走査型電子顕微鏡 (SEM) によって採取されたデブリの形態を図4に示す。融組成物を図4の位置a、b、cについて測定した。コリウムデブリのための図4 (a)。

平均組成は約70:30重量%であり、その差は5%未満であった。組成は、図4の位置aおよびbのジルコニアデブリを測定した。位置aの組成は100%ジルコニアであり、平均組成は100%に近いが、位置bのデブリはUO₂の一部を含む。これは、コリウム実験で汚染された同じるつぼと同じテストセクションを使用したためです。位置cでのコリウムの表面は、図4においてさらに拡大されている。それはUO₂ (黒色) とZrO₂ (白色) が固溶体を形成することが示されたTROI-13の場合。場所c1の構図22:78重量%であり、c2は72:28重量%である。

4. 動的圧力と動的力

試験部の内面の動圧と試験部の底部の動力を測定した。TROI-13および15の場合、動圧はそれぞれ7MPaおよび12MPaであったが、TROI-14では動圧がはるかに小さかった。動圧および力の典型的な形状は、TROI-13およびTROI-15についてはそれぞれ図5および図6に示されている。

時間は、パンチャーの作動時間から測定される。パンチャーの作動と爆発の誘発との間にはいくらかの遅延がある。

動的力は、力変換器によって測定され、試験セクションの底壁の下に設置される。動的力は、水圧スラグの動きを表す一種の積分挙動であり、動圧は局所的な測定値である。したがって、動力学的力は、その動的圧力挙動によって示されるように、大きな振動を示さなかった。動的力は動圧に比例することが示されている。

純粋なジルコニアを使用したTROI-15は最もエネルギーの爆発を示したが、溶融物の量が最も少なかった。

動的圧力は、1次元形状における高エネルギー蒸気爆発実験で観察された圧力伝播を明らかに示さなかった。³⁻⁷⁾

これは、伝播形状が3次元である多次元テストセクションの使用に起因する可能性があります。

5. メルトジェットの状態とトリガが発生した場所

TROI-15を高速ビデオで撮影したメルトジェットのスナップショットを図7に示す。水面の自由表面上の110cmは、毎秒1,000フレームの高速ビデオによって撮影されました。

高速ビデオのシャッタースピードは77nsです。爆発の前に、明るい部分はメルトジェットです。

爆発後、私たちは他の構造からメルトジェットを容易に区別することができません。これは、テストセクションから出てくる混合物の飛散によるものです。

時間は、パンチャーの作動から数えられた。メルトジェットのサイズは約2cmである。

メルトジェットが水プール内で減速されるので、水プール内のメルトジェット直径は同様の大きさである。

水プール高さを有する直径2cmのメルトジェットに相当する質量は、ジルコニアの場合には約1.6kgである。したがって、放出された質量2.28kgは、溶融ジェットを水プールに完全に沈めさせるのに十分大きい。

TROI-13およびTROI-15の溶融ジェットの形状はこの場合と類似しており、放出された質量は十分に浸漬された溶融ジェットを有するほど大きい。

水プールの中心に置かれた熱電対を使用して、水プール内の溶融ジェット速度および底部に当たるのに要した時間をモニターし、評価した。熱電対信号を図8に示す。

パンチャーが3,413.23秒で作動するので、図はこの時間の後にプロットされます。

上部の熱電対 (IVT105) は、約3,414.1 sの溶融熱を感知します。したがって、プール表面に当たるまでの経過時間は0.9秒未満です。

底部の熱電対 (IVT108およびIVT109) は、約3,414.5 sの溶融熱を感知します。これは、メルトジェットの前面が底に達したことを示します。パンチャーが作動してから約1300msです。したがって、予混合段階の期間は約0.4秒である。

図6は、パンチャー作動後約1330msで動圧が発生することを示している。

したがって、蒸気爆発が底部で開始されると結論付けることができる。これは、蒸気爆発時に溶融ジェットカラムが水プールに完全に沈められていることを意味します。

6. デブリサイズ分布

コリウムとジルコニア実験のための破片の形状は、色と形がかなり異なります。サイズの異なる破片の典型的な形状を図9および図10に示す。

ジルコニアの破片の色は黄色と白ですが、真皮の色は黒です。

最も大きなジルコニアの破片の形状は、中心に空気孔を持つ殻に似ています。

最大のコリウムデブリは固体形状であり、そのいくつかは溶けていないペレットの一部である。

ジルコニアの破片の表面は、コリウムの表面よりも滑らかである。どちらのケースにも破片のような粉があり、蒸気爆発に関与しているようである。ジルコニアの破片の表面は、コリウムの表面よりも滑らかである。どちらのケースも、粉末状の破片を有していたが、これ

は蒸気爆発に関与しているようである。

以下、図11および図12において、TR0I-13およびTR0I-15のデブリサイズ分布を比較する。コリウム試験では、部分的に熔融ペレットまたは直接急冷熔融トジェットのいずれかにより大きな破片が生成される。熔融ジェット噴射の後期に、メルトジェットは、飛散した水によって空気中で急冷される。

メルトジェットの周りに十分な水がないので、断片化は容易ではない。それはすぐに固化するでしょう。

より小さいデブリは、混合プロセス中の破砕または爆発のいずれかの原因となる。

0. 46mmより小さいサイズの破片は、爆発的な相互作用に関与している可能性があります。

小麦粉のような破片の量は、動圧の大きさに比例する傾向がある。

興味深いことに、2.0~4.75mmのサイズの粒子は、ジルコニアの場合で約6%であり、コリウムの場合では約35%である。

ジルコニアの場合、粒子は混合相および爆発相の間に十分に断片化しているようである。TR0I-14のサイズ分布は同じ傾向にありまTR0I-14のサイズ分布は、表1に示すTR0I-13のサイズ分布と同じ傾向である。

7. 下部槽の圧力とプール水温

圧力は下部容器の内面で測定され、水溜めの温度は試験区域の壁の近くで測定された。TR0I-15の容器圧力および温度を図13および14に示す。

最初に、容器の圧力は、熔融物からの輻射熱伝達によって空気空間の加熱により上昇する。熔融物と水の接触（約0.9秒かかる）の後、加圧速度は、混合相の間の蒸気発生のために増加する。

圧力の形のちょっとした衝突は、蒸気爆発の発生を示す衝撃波の圧縮及び膨張。

蒸気爆発が起こった後、細かく断片化された粒子は、混合物の膨張のために、壁面および水面の方に非常に速く移動する。

熔融物と水との間の熱伝達を向上させ、結果として激しい蒸気の発生。

蒸気爆発が起こった直後の突然の加圧について説明します。

急速な蒸気生成期間の後、容器の鋼壁上の凝縮により、より低い容器圧力が低下する。

壁の近くで測定した水プールの水温を図14に示す。蒸気の爆発の直後に、壁の近くの水温は、混合物の膨張のために壁に向かう熔融粒子と熱水との混合物が急激に増加するため、非常に急速に増加する。

その後、混合物の反発とそれに続く冷たい水による空間の交換のために突然降下するが、これはまだ十分に混合されていない。

また、飛び散った水は水プールに戻ってくる。これらの2つの現象は、壁の近くで振動する水温の原因となる可能性があります。

混合物と水がよく混合すると、温度が安定する。混合物と水がよく混合すると、TR0I-15よりも温度が安定します。

TR0I-13の容器の圧力と水プールの温度を図15および図16に示す。

一般的な形状はTROI-15と類似しているが、加圧量は大きい。それはTROI-15の約3倍です。それは水のプールで急冷されたジルコニアよりも3倍大きい、より大きなコリウムの質量に起因する。

TROI-15で観測された蒸気爆発による初期ブリップは、TROI-13の場合には明確ではない。水プールの温度の応答は、TROI-15のそれと同様である。

しかし、初期のヒートアップはTROI-15よりもずっと小さく、安定化された温度はTROI-15よりもはるかに高い。

これは、TROI-15で観察された初期ヒートアップが、混合ゾーンの膨張によるものであることを示している。

TROI-13の場合には、デブリの総質量がはるかに大きいので、熔融物と水との混合がかなり良好になる。したがって、水温はTROI-15よりもはるかに早く安定し、振動はあまり見られませんでした。

8. 熔融温度

熔融温度は、表2に記載の2種の高温計で測定した。

理論的には、2色高温計が灰色体の正確な温度測定値を提供するので、熔融の全期間中、水冷るつぼの中心に形成された穴を介して上部クラストの下の熔融池の温度が測定される。

この幾何学的構成は黒体に近い。

熔融温度は、全熔融期間中に穴を通して測定した。

TROI-13とTROI-14にCHINO高温計を使用しました。測定された熔融温度は、通常、以前の実験におけるCHINO高温計の上方範囲を超えたので、放射率比は、式を使用して温度を外挿するように調整された

$$1 / T = 1 / T_r + K \ln \gamma, (3)$$

γ は放射率比、 T_r は外挿された温度、 T は測定された温度である。定数 K は、較正から決定されたシステム定数ブラックボディ。

TROI-13とTROI-14にはCHINO高温計を使用した。TROI-14とTROI-15にはIRCON高温計を使用した。TROI-13とTROI-15の温度を図17に示す。

熔融温度が高温計の下限を超えると、第1の信号が現れる。

準平衡状態に達する前の融解温度の一般的な形状は、水冷るつぼ内のエネルギーバランスおよび測定スポットの状態に大きく依存する。

TROI-13の初期段階での鋭いピークは、温度測定スポットが溶けているが、急速にクレストで覆われていることを示唆している。

この図から、十分な電力が熔融物に供給された後、熔融物温度が安定することが分かる。考慮すべき2つの点があります。

1つ目はTROI-13の排気ガスの影響で、もう1つはTROI-14のIRCONとCHINOの測定温度差です。

TROI-13の熔融温度が約3, 227°Cに達すると、通気孔から多くのガスが出てきた。

粒子の大きさが測定波長と同じであれば、ガス放電は温度測定に大きく影響する。

これを考慮すると、3, 227°Cに達しても融液中の吸収力が維持されていることから、ガス放電期間中の測定温度の低下は間違っていると判断される。

実際の温度が3, 227°C付近になる可能性は非常に高いです。

2つめのポイントは、TROI-14ではIRCONによる最大温度が約2927°Cであり、CHINOによる測定では約3, 527°Cであることである。

したがって、式(3)の外挿式は熔融温度を過大評価した可能性がある。

そこで、後の実験でIRCONパイロメーターを使用することにしました。

この観察から、熔融したコリウムは灰色の体ではないことは明らかであった。したがって、この非常に高い温度での温度測定は、多くの不確実性を避けることはできません。

純粋なジルコニア熔融物の熔融温度は、熔融温度が安定した後、コリウムの熔融温度よりもずっと高く維持された。熔融物供給の直前の融解温度は、高温計の上部範囲に非常に近く、3, 500°Cであった。

測定された温度における熔融物のこの大きな過熱は、水冷るつぼ分析の結果と幾分一致しない。現時点では、温度測定における大きな不確実性または熔融温度分析方法の不備によるものかどうかは不明である。

IV 結論

原子炉材料を用いたFCI実験での自発的な高エネルギー蒸気爆発の観測は、これまでの実験とは全く異なるため、非常に重要です。

したがって、相違の潜在的な原因は以下で説明されます。

最初のもは、燃料冷却剤相互作用中の水素生成量である。FAROはかなりの量の水素を生成していた6)。一方、コリウムを用いたTROI実験ではごくわずかな量の水素しか生成しなかった。

トリガメカニズムに影響を与えている可能性があります。

2番目は過熱量です。

KROTOSおよびZREX3における融解温度を超える融解物の過熱は300°C未満であるが、本実験の過熱はそれよりも大きい可能性がある。

この実質的な過熱はプロトタイプの状態を表していない可能性があるため、熔融過熱の影響に関するさらなる実験がいくつかの結論を引き出すために必要である。

第3のもは熔融組成物の効果である。

TROI-15の中で最も活発な相互作用は、材料組成から強い影響があることを示しています。

TROIは70:30wt%のUO₂およびZrO₂で真珠層を使用し、FAROおよびKROTOSは80:20wt%を使用した。これは爆発性に影響を与えたかもしれない。

了承

本研究は、国家中期・長期R&Dプログラムの下、韓国政府の科学技術省(MOST)の支援を受けている。