

韓国原子核学会誌

第 33 巻、第 4 号、p. 344~357、2002 年 8 月

燃料冷却材で観測された自発的蒸気爆発

原子炉材料を用いた相互作用実験

ソン・ジンホ、パーク・イクギョ、シン・ヨンセンス、金ジョンファン、

ホン・ソンワン、ミン・ビョンテ、キム・ヒードン

韓国原子力研究所

(2001 年 12 月 18 日受領)

概略

本論文は、プロトタイプ原子炉材料を用いた燃料冷却材の相互作用実験で観察された自発的な蒸気爆発を報告している。純粋な ZrO_2 および UO_2 と ZrO_2 との混合物が使用される。

ジェットの状態の高温溶融材料が、圧力容器内に配置された過冷却水プールに注がれる。誘導頭部溶融技術は、原子炉材料の溶融のために使用される。純粋な ZrO_2 と UO_2 と ZrO_2 の混合物を用いた両方の試験において、急冷または自発的な蒸気爆発のいずれかが観察された。

デブリと圧力プロファイルの状態は、クエンチングケースと爆発ケースの違いを明確に示しています。

封じ込めチャンバ内の動圧、動的インパルス、水温、溶融温度および静圧を測定した。

本実験では、反応器材料の自発蒸気爆発が最初に観察されるので、本実験の結果は、原子炉材料の爆発性を理解する上で重要なステップとなり得る。

キーワード：原子炉材料、蒸気爆発、TROI、 UO_2 / ZrO_2

1. はじめに

原子力発電所での重大な事故の際に、炉心の燃料が溶融して原子炉容器の底に移動する可能性があります。

それは、高温の溶融燃料と水との相互作用をもたらす。

それは、溶融燃料から周囲の水へのエネルギーの急速な移動を伴う [1]。

それは燃料とクーラントの相互作用 (FCI) と呼ばれています。

これは、劣化した炉心の冠水時または溶融炉心が水で満たされた下部槽ヘッドに落下したとき、または炉の破損または溶融した破片が格納容器内に浸水した後に炉心の残骸が湿潤炉空洞に放出されたときに起こる。

これらのシナリオのそれぞれは、ミリ秒から数時間の範囲の時間スケールで活発な FCI プロセスにつながる可能性があります。

ミリ秒の範囲内で起こる相互作用は、原子炉容器および原子炉格納容器の完全性を脅かす可能性がある、活発な蒸気爆発を引き起こす可能性がある。

より長い範囲で起こる相互作用は、通常、非エネルギー的であり、溶融物の部分的な断片化および急冷によって特徴付けられる。

溶融物の部分的断片化および急冷によって特徴付けられる。

FCIに関する実験的研究は過去数十年に渡って幅広く実行された。

シングルドロップの断片化[2]、中間スケールの実験、プロトタイプ材料を使った実験などがあります。

FITS[3] ZREX[4]およびALPHA[5]は中間スケールの実験に属する。FARO [6, 7]、KROTOS [8, 9]、COTELS [10]はプロトタイプ材料を使った実験に属しています。以前の研究の主な成果は、アルファモードの失敗確率が非常に低く、リスクの観点から解決されたものとみなされます。FCIの結果はこれまで考えられていたように壊滅的ではないようです。残っている問題は、容器内滞留（IVR）と原子炉材料の爆発性に依存する新しいプラント設計における溶融物状の水での蒸気爆発による下部ヘッドの構造負荷である。最近、OECD/NEAこの問題を調査するために開始されます。

韓国原子力研究所（KAERI）は、1997年に「水との相互作用（TROI）のためのテスト」という名の蒸気爆発実験の研究プログラムを開始した。

このプログラムの目的は、低圧の冷水と相互作用するときコリウムが強力な蒸気爆発につながるかどうかを調査し、精力的な蒸気爆発の変換比が測定された場合にそれを測定することです。

この実験計画は、原子炉爆発の根本的な問題を調査するだけでなく、APR1400の開発にも貢献することを追求しています。APR1400は、IVR戦略として原子炉容器の外部冷却を考慮しているため、原子炉容器の圧力境界に違反した場合には、圧力容器外の蒸気爆発が可能です。

2. 実験施設と水冷増埧

試験施設は、図1に示すように、上部容器、格納容器の下部容器、スライディングバルブ、および下部格納室の試験部からなる。上部容器はるつぼおよび溶融物放出アセンブリを含む。高温の溶融材料を試験区域に注入する。計装の構成とタグ付けも図1に示されています。

試験部と圧力容器の壁面には、圧電圧力変換器（PCBピエゾトロニクス社製、モデル112A、最大圧力69MPa、立ち上がり時間 $2\mu\text{s}$ 、共振周波数250kHz）が取り付けられています。静圧トランスデューサ（Druckモデルpmp4060、最大圧力3.5Mpa、応答時間1kHz）は、試験容器および格納チャンバ内の過渡圧力を測定する。データ収集には、Agilent TechnologyのVXIシステム（800 kHz sampling / channel、1 kHz / channel）を使用します。過渡データは、1つの制御プログラムによって100Hzと50kHzの2つの異なる周波数で取得されます。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、1000pps）は、爆発性の燃料冷却材の相互作用の写真をキャプチャします。CCD（Charge-Coupled Device）カメラ4カ所（下部容器2本、上部容器2本）が実験の一連のイベントを監視します。

FCI実験には、融解および融解の技術が必要です。

コリウムの熔融温度が非常に高いので、測定技法の実施は多くの工学的問題に遭遇する。この問題を解決するために、P. N. Lebedevが独自に考案した誘導頭部熔融技術を採用した。USSRの科学アカデミーの研究所[13]が利用されている。

反応性材料を用いて作業する場合、純度と柔軟性が向上します。

誘導頭部溶解の開発の主要な設計パラメータとプロセス

この実験のための技術は、Hong等 [14]

TROI試験機で使用されるRF(無線周波数)発生器は、150kWの容量と50kHzの周波数を有する。RF発生器の周波数および作動コイルのインピーダンスは、8:2の組成のUO₂iZrO₂混合物についてのターゲット材料と磁束との間の最良の結合を有する。

UO₂ / ZrO₂混合物用に設計された冷却装置は、純粋なZrO₂とUO₂ / ZrO₂混合物の両方の熔融に使用されます。RF発生器の周波数および作動コイルのインピーダンスは、8:2の組成のUO₂iZrO₂混合物の場合、ターゲット材料と磁束との間の最良の結合を有する。

UO₂ / ZrO₂混合物用に設計された冷却装置は、純粋なZrO₂とUO₂ / ZrO₂混合物の両方の熔融に使用されます。

プラグおよびパンチャーからなる水冷るつぼおよび熔融物放出アセンブリは、格納チャンバの上部容器に取り付けられる。水冷るつぼの柵状の壁は、冷却のために過冷却水が供給される銅管で作られている。直径80mmのプラグは、るつぼの底に位置しています。熔融物の供給のためにプラグが除去された後、円錐形のパンチャーは熔融物の底部に形成されたクラストを打ち抜いて熔融物の放出を開始する。

UO₂ / ZrO₂混合物を充填した水冷るつぼの模式図を図2に示す。図に示すように、充填にはUO₂ペレットとZrO₂粉末を使用します。効率的な熔融のために様々な充填パターンが試験される。

図2の充填パターンは、混合物と磁束との間の効率的な結合のための最良の構成の1つである。

初期装入物の質量は、UO₂ペレット70重量%とZrO₂粉末30重量%とで約14kgである。

Zr ring, whose weight is 0. 1 kg, is placed in the middle of the crucible.

It is used as an initiator.

るつぼの真ん中に重量0.1kgのZrリングを入れる。これは開始剤として使用されます。

るつぼの中心部に最初に挿入された銅管は、充填完了後に取り出され、人工的な穴が形成される。熔融期間中に孔が維持され、これが光高温計の覗き孔として使用される。

図3 (a) および (b) は、融液が水プールに送達された後のるつぼの典型的な形状を示す。図3 (a) に示すように、るつぼの上部にZrO₂粉末からなるクラストを形成する。熔融期間中、クラストの頂部に穴が維持される。図3 (b) は、上部クラストを除去した後のるつぼの内部を示す。水冷るつぼの内部には、るつぼの底部付近に薄いクラストが形成されており、その厚さは約2~3mmであることが示されている。これは、室温で銅チューブからの高温熔融したコリウムプールを絶縁する。

るつぼの底部には、熔融物送達のために打ち抜かれた穴が示されている。

光学2色高温計 (Chino C O., IR -AQ、分解能: 2°C、1100-3100°C) が炉内の熔融温度を測

定する。パイロメーターは溶融物の上部クラストに形成された穴を通して溶融物プールを見る。溶融プロセスの間、2色パイロメーターを用いて溶融温度を測定した。AK型熱電対の数は、試験セクション、すなわち圧力容器の大気空間、および誘導コイルの入口および出口冷却ラインの温度を測定するために使用される。

3. ジルコニアを用いたFCI実験結果

様々な温度における溶融ZrO₂と水との間の相互作用に関する実験は、TROIの第1の一連の実験で行われる。

ZrO₂は、表1に示すように、原子炉材料であり、熱物性の点でUO₂に類似しており、UO₂の擬似物はアルミナよりはるかに優れている。

3.1 自発的蒸気爆発の発生

6つの試験の中で、3つの試験で活発な自発蒸気爆発が起こった[15, 16]。

参考文献16で論じられているように、これは、原子炉材料のための自発的な蒸気爆発を示す、世界で初めての実験である。ここでは、TROI-3の典型的な急冷試験と、TROI-5の強力な蒸気爆発の場合とを比較する。

隔離弁の下の閉じ込め室の自由体積は8.173m³

封じ込めチャンバは、最初は大気圧である。試験容器の断面は長方形である。寸法は65cm×65cmです。高さは150cmです。初期の水位は67cmに維持され、約283kgです。るつぼの出口から試験区域の水面までの融液の自由落下高さは約3.8mである。底部と底部の間の距離はAPR-1400では約7mであり、この実験における自由落下高さは原子炉条件に関連する。

その他の初期条件および実験結果を表2に示す。ステンレス鋼フレームを用いたポリカーボネート製の壁を用いたテストセクションを使用したため、高速ビデオおよび家庭用ビデオカメラによる相互作用プロセスの写真を撮ることができた。しかし、溶融物が非常に明るいため、露光量を調整し、中性濃度フィルターまたは偏光フィルターを使用する必要がありました。テストセクションの窓は壊れており、鉄骨は大きくTROI-5試験で破損したが、TROI-3の試験区画はそのまま残っていた。

図4は、TROI-5試験における爆発直前の融解水相互作用のホームビデオ画像を示す。家庭用ビデオ画像の次のフレームで、活発な蒸気爆発が発生し、テストセクションが完全に壊れています。セルサイズは10cm×10cmです。溶融ジェットと水の相互作用ゾーンの有効サイズは、爆発の前に約20cmであることが示唆されている。

3.2. 動的圧力

動的圧力は、TROI-3およびTROI-5実験について測定した。TROI-3試験では、試験区域は元のままであり、測定ピーク圧力は0.1MPaよりも非常に小さかった。

私たちはそれをスチームスパイク(SS)と呼んだ。TROI-5試験では、圧力容器の外で大きな音が聞こえ、水を含む試験区域が壊れていた。TROI-6の別の試験は、試験セクションへの損傷を避けるために円筒状のステンレススチール容器を使用して実施した。直径40cm、高

さ80cmです。壁の厚さは5mmボトムプレートの厚さは10mmであった。TROI-6試験の初期条件および結果を表3に示す。

その他の条件はTROI-5と同じです。予期しないことに、ステンレススチール容器は、図5に示すように、溶接ラインに沿って完全に破壊された。図6 (a) および (b) は、TROI-5およびTROI-6試験の測定された動圧波プロファイルを示す。IVDPは、図1に示すように、試験区域の壁に配置された動的ロードセルを表す。PVDPは圧力容器の壁にある動的ロードセルを表しています。尺度の時間は、便宜上動的データ収集の時点から測定されます。

厳格な制約を有するより小さな容器は、より高い動圧をもたらし、これは、模擬物を用いた以前の実験と同じ傾向にあることが注目される (Park, Chapman, and Corradini, 1999)。

の結果

TROI-6は、ジルコニアと水の相互作用のための活発な自発蒸気の発生の発生を明確に示した。

3.3 デブリ分布

試験後、デブリを集め、20mm、5mm、2mm、および $710\mu\text{m}$ のサイズのメッシュを用いて分析した。結果を表2に要約する。蒸気爆発 (TROI-5) の場合とスチームスパイクまたはクエンチング (TROI-3) を伴うケース。10-20mmの小石は、爆発性の場合には現れず、予混合段階に存在すると考えられる。トリガーされると、小石は細かく断片化され、活発な蒸気爆発につながります。それが減衰されると、小石は急冷され、その形状を維持する。0.71mmより小さいサイズの微粒子は、蒸気爆発の間に生成されるようである。蒸気爆発の機械的エネルギーの大きさは微粒子の量に比例する。不幸なことに、TROI-6のために残骸は収集されなかった。

3.4 溶融温度

溶融温度は2色高温計を用いて測定した。溶融温度は 3100°C 以上で、高温計の上方範囲よりも高いことが判明した。ジルコニアの溶融温度は約 2727°C であり、溶融物は 400°C 以上過熱されたと思われる。溶融物中の磁束と誘導電流の相互作用のために溶融物中に強い対流が存在する[17]。それで、あまり過熱していないかもしれません。また、測定された温度は、溶融物が灰色体であるという仮定に基づいているので、灰色体からの偏差による不確実性が存在する可能性がある。

4. コリウムを用いたFCI実験結果

UO₂/ZrO₂のプロトタイプ混合物を用いた最近の蒸気爆発実験は、活発な蒸気爆発を引き起こさなかった[6, 7, 8, 9, 10]。

しかしながら、これらの現象についての明確な説明はまだないので、低い圧力でのコリウムとサブクール水の相互作用のエネルギーは、原子炉の安全性にとって未解決の問題である。そこで、TROI施設でUO₂/ZrO₂の混合物を使用した第2シリーズの試験を実施し、問題を再検討します。

初期条件および実験結果を表4に示す。

第2の一連の試験には強固な容器が使用される。それはステンレス製の円筒形試験セクションです。容器の高さは150cm、内径は60cmです。壁の厚さは2cm、底の厚さは3cmです。試験容器の底部に、ロードセル (IVDL) を設置して動的インパルスを測定する。残りの試験はZrO₂試験と同じです。

4.1 自発的蒸気爆発の発生

5回の試験の中で、3回の試験で活発な自発蒸気爆発が起こった。ここでは、TR0I-11の典型的な急冷試験と、TR0I-13の強力な蒸気爆発の場合との比較について論じる。

相互作用容器はステンレススチール製であるため、熔融水の相互作用を視覚化することはできませんでした。その代わりに、試験区域に入る前のメルトジェットは、封じ込めシエルの最高窓で取られた高速ビデオによって観察された。図7 (a)、図7 (b)、図7 (c) および図7 (d) は、TR0I-13の熔融ジェット送達の連続画像を示す。図7 (a) は、相互作用容器に落下する熔融物の流れを示している。画像上に示された時間は、パンチャーの作動から測定される。図7 (b) は、熔融物と水との相互作用によって生じる相互作用容器からの蒸気流を示す。

図7 (c) は蒸気爆発による水の飛沫の発生を示している。最後に、図7 (d) は、蒸気爆発によって排出された二相混合物および破片のコリウムを示す。わかるように、蒸気の爆発は溶湯の配送中に発生しています。写真の校正されたサイズは15cmです。従って、位置におけるメルトジェット直径は約2cmである。メルトジェットが重力によって加速されるので、水プール内のメルトジェット直径は2cm未満である。

激しい水蒸気の発生に起因する約1300ミリ秒でのTR0I-11試験においても水柱の穏やかな排出が観察される。

この試験の水位は60cm以上に維持され、TR0I-13の水位は55cmに低下した。

4.2 動的な圧力と衝撃

TR0I13テストで動圧と衝撃を測定した。パンチャーは熔融開始後6608.82秒で作動した。図8は、相互作用容器内の動圧を示す。相互作用容器において、7.0MPaのピーク圧力が測定される。パンチャーの後、発生に1.22秒かかりました精力的な蒸気爆発のピーク圧力はTR0I-12のそれよりもはるかに高かった複数の爆発を示すいくつかのピークがあることに留意されたい。最も高い動圧の持続時間は約1msである。図7に示すように、蒸気爆発の開始後に熔融ジェットが連続的に供給されるので、複数の蒸気爆発が可能である。蒸気爆発の場所とタイミングを調べることは有益です。孔が上部クラストに維持されるので、熔融プールは大気圧にある。メルトジェットが重力だけで供給されることを示唆している。そして、熔融物の移動距離を計算することができる。メルトジェットの先端は、パンチャーの作動後約1000msで最初に視覚化される。ビューポートの位置がらつぼの出口の2.408m下にあるので、一定したメルトジェットの供給開始の時間遅れは、300ms。水面に当たる時間は1133msと計算されます。以下の図8は、蒸気爆発の開始が約1220msであることを示している。水プールに入った後に熔融物が減速しないと仮定すると、底部に当たる時間は1213msです。したがって、水蒸気の爆発は、水のプールまたはタンクの底部のいずれかで発生している可能性があり、自

発的な蒸気爆発を開始するために予混合物を形成するのに100ミリ秒かかることを示唆している。図9は、相互作用容器の基での動的負荷を示す。動的負荷はダイナミックロードセルの上限である250kNを超えて測定され、その後カットオフされます。動的荷重の持続時間は約15msである。衝撃は相互作用容器内の水の積分行動であるので、衝撃および動的負荷の形状はかなり異なる。

4.3 デブリ分布

TR0I-11試験では、溶湯温度が3100°Cを超えていましたが、自発的な蒸気爆発は生じませんでした。だから、私たちはデブリ構成を見て、非爆発性相互作用の理由を調べた。試験後、放出された溶融物を収集し、調べた。水のプールから回収された破片には、元の形状の多くのUO2ペレットが観察された。これは、溶融物の表面温度が、コリウム混合物を溶融するのに十分に高いと測定されたが、混合物は、短い溶融時間のために完全に溶融されなかったことを示す。この試験で蒸気爆発が起こらなかったのはこの原因かもしれません。

溶融冷却材相互作用後に収集された破片のサイズを、ふるいを用いて測定した。表4及び図10に示す。

溶融していないUO2ペレットを含む最大の破片のサイズは約10mmであり、破片の平均サイズは2~5mmであった。それらは、50mmから100mmの範囲のZrO2試験から収集されたものよりもはるかに小さい。0.71mm以下の微細な破片は存在しません。これは活発な相互作用がなかったことを示しています。穏やかな圧力スパイクがあり、水を試験容器から押し出した可能性があります。

TR0I-13で収集された碎屑物のサイズを表4および図11に示す。完全に溶融していないUO2ペレットも存在する。しかし、その量はTR0I-11の量よりもはるかに少なかった。これは、この試験の溶融温度TR0I-13より高いかもしれない。

最大の破片は約10mmであり、破片の平均サイズは1~5mmであった。それらは、50mmから100mmの範囲のZrO2試験から収集されたものよりもはるかに小さい。蒸気爆発のためにTR0I-13で細かい破片が生成されていたことが注目されています。0.71mmより小さいサイズの溶融層の量は約31%であるが、このサイズの破片はTR0I-11には存在しなかった。

4.4 融点温度

ZrO2試験の結果と同様に、溶融温度は、TR0I-13試験を除く5回のコリウム試験のすべてにおいて、高温計の上限を超えた。TR0I-13試験では、測定した温度が3027°Cに達した後に減少し、穴からガスが排出された。粒子のサイズが0.8 μmと0.96 μmの測定波長に似ている場合、2色高温計の精度は高温放出ガスの影響を大きく受ける可能性があります。

測定された温度が3027°Cに達した後でさえ、水冷るつぼへの投入電力が連続的に増加し、TR0I-13の破片の崩壊が溶融していないUO2ペレットをはるかに少なく示したため、実際の温度は3027°Cより高いと考えられる。

4.5 FARO L-31との比較

FAROおよびKROTOSプログラムで実施されたFCI実験は、FARO L-31はTROI-13試験に最もよく似ています。表5は、これら2つの試験の比較を示す2つの大きな違いがあります。1つは熔融温度です。もう一つは水素の生成です。FARO試験では、熔融過熱は高くはなく、融解過熱はTROI試験で十分に高いと思われるが、そこでは高温計測定の不確かさ。かなりの量の水素生成がFARO試験で観察された。しかし、水素生成はTROI試験では無視できる程度であった。

5. ディスカッション

FARO、KROTOS、COLTELSの以前の実験とはかなり異なるので、原子炉材料を用いたFCI実験で自発的なエネルギー蒸気爆発が観察されるという事実が注目される。

ここでは、以前の実験と現在の実験との違いとコリウムの爆発性に影響を及ぼす潜在的な理由について議論する。

最初のものは、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ましたが[6]、コリウムを使ったTROI実験ではごくわずかな量の水素しか生成しませんでした。

水素生成の違いの理由はまだ明確ではないが、影響を受けるトリガ機構かもしれない。

2番目は過熱量です。

KROTOSおよびZREXの熔融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400°Cを超えると予想される。しかし、模擬体[14]のWFCI実験の結果、自発的な爆発のカットオフ温度は燃料温度にあまり影響されないことが示された。

3番目はプール形状です。KROTOSのテストセクションは、一次元形状の一種で、円柱状のテストセクション内径200mmのものを使用しています。KROTOS実験における初期ジェット直径は約30mmであり、これは断面積に関して30の水対燃料比をもたらす。

この試験の初期メルトジェット直径はKROTOSとほぼ同じであるため、TROIはより大きな水対断面面積比を提供する。

自発蒸気爆発の方が2つの面で優れていると判断されます。それは、熔融水相互作用に十分な水量を提供し、メルトジェットの先頭部分から発生する蒸気の排出に十分な流動面積を提供する。

それらは、熔融水相互作用ゾーン内の平均蒸気ボイド率を減少させる。

私たちはまだ決定的な答えを出すことはできませんが、これらの3つの違いが原子炉材料の自発的な蒸気爆発につながる可能性がある。実験の初期条件に関する感度研究、先進的計器による詳細な測定などのさらなる調査が計画されている。

謝辞

著者たちは、韓国政府の科学技術省からの支持を高く評価している