# 34 RELAP5-3D を使ったシビアアクシデント時水撃基礎 実験の一次元数値シミュレーション

INEEL	Richard R. Schultz
アイダホ大学	Jim C. P. Liou
大阪支所	綾 威雄
機関動力部	汐崎 浩毅
原子力技術部	*安達 雅樹

# 1. まえがき

シビアアクシデントとは原子炉プラントにおい てその設計基準を越えて炉心の破損に到る一連の 事故を指す。その中で今だに残されている重要課 題の一つとして「水塊移動による格納容器への水 撃力の解明」がある。

この課題に注目した事故に到るシナリオを図 1 に示す。1000 ℃以上の溶融炉心が圧力容器から 流出しウェットウェル等の水張区画に達すると、 蒸気爆発(又は水-金属反応)により溶融炉心の 周囲に蒸気(又は水素)が短時間に大量発生する 場合がある。この時の状況もしくは周囲の構造に



# 図1 木撃へのシナリオ

よっては炉心周囲の水塊運動を誘発させる可能性 がある。そしてその結果生じる水撃力により容器 壁や内部機器が破壊されるという事態へいたる。 このようなシナリオに対するプラントの安全性を 評価する際には気体の大量発生からコヒーレント 性(同時性と同一方向性)を持った水塊運動の発 生に至る過程が重要な要素となるが、これについ ての実験的な検討があまり成されていない。

海上技術安全研究所(以下海技研)ではこの水 塊運動のコヒーレント性の解明及び水撃力の低減 を目的とした図2に示す装置を使った中規模実験 を行っている[1]。この実験では格納容器内の気 体の大量発生を高圧空気の注入に置換している。 観察窓からの高速度撮影によると、空気流出口か らの水面の高さが十分ある場合、空気流は水の層 を貫通せず水面は初期の状態を保ちつつ上昇して いるコヒーレント性の高い水塊運動が生じること がわかった。またこの際容器内の絞り部(オリフ ィス部)では激しい水撃が生じた。ただ観察窓の 視野が限られているため、空気注入以降特に水面 が絞り部に達する時刻での容器内部における二成 分(水と空気)分布を確認するには不十分である。

そこでこの結果を実機に適用するためには、実 験とあわせて数値計算を実施し両者の結果を比較 し、物理モデルの導入による補正等を行った後、 実機スケールへの拡張を行う手順が必要になる。 今回はその一環である中規模実験に対する RELAP5-3Dを使った数値シミュレーションにつ いて報告する。これは主著者が平成12年にアイ ダホ大学(University of Idaho)及びアイダホ国立 工学環境研究所(INEEL)へ留学した際に行った 研究活動の一つでもある。



## 2. 解析モデル

等で使用されている二相流熱水力コード RELAP5 れによると時刻 t = 0.45 sec で弁の開放が始まり、 の最新版であり、二相流三次元解析が可能である t = 1.25 sec で全開に達する。そしてt = 1.6 sec で こと、解析結果がリアルタイム CG で表現可能な 系は約 0.35 MPa で圧力的平衡状態に達する。 ユーティリティソフトが備わっていること、それ 一方、格納容器は3つに分割し、容器下部(Pipe 上でも行うことができる等の特徴がある[2]。

力する解析モデルの条件は以下の通りとした。

方向の一次元モデルとする。

ータを入力データとして使用する。

デルを図3にそれぞれ示す。

がるパイプは図3では Time-dependent volume と 同じであった、という予備解析の結果にも基づい Single junction としてモデル化している。そして ている。 Time-dependent volume へは境界条件として、最も そして各ボリュームにおける圧力やボイド率等

に計測した、弁下流側での圧力変化を人力する。 RELAP5-3D は原子炉プラントの安全基準評価 この入力データ(絶対圧換算)を図4に示す。こ

らが Windows95 の搭載されている 32bit パソコン component) · 容器上部(同) · オリフィス(Single junction)としている。また容器下部と容器上部 これまでの実験結果[1]から RELAP5-3D に入 は更に鉛直方向に 40 のボリューム(番号は図 3 に表記)に分割した。これはまずボリューム数が ①実験での可視化観測の結果に基づき系は高さ 10 ないしは 20 では高周波・高振幅の圧力変化が 現れた直後に数値的不安定に陥ったためである。 ②実験結果と直接比較するために実験で得たデ またこの選択は、ボリューム数が 80 以上ではこ の数値的不安定が現れないが解析に必要な処理能 実験装置の概要を図2に、それに対する解析モ 力が今回解析で使用したパソコンの処理能力を上 回ることと、ボリューム数を 80 にした場合同じ まず図2における高圧タンク、弁及び容器へ繋 位置における圧力変化が 40 でのそれとほとんど

顕著に水塊運動のコヒーレント性が現れた実験時の初期条件は、同じ実験での初期条件と一致させ



た。例えば初期の水面は図3に示すように容器下 No.23 と No.24 では空気のみ存在している(共に 部のボリューム No.22 内に存在する。

# 3. 解析結果

初期に水面が存在していたボリューム前後にお 挙げた全てのボリュームは水で満たされる。 けるボイド率の遷移を図5に示す。前述の通り初 さらに格納容器の全ボリュームにおけるボイド

1)分布となっている。空気の流入が始まる時刻1 = 0.45 sec から約 0.12 秒後、t = 0.57 sec で No.22 は水に満たされる。そしてt = 0.62 sec で図5で

期条件では容器下部のボリューム No.21 に水が充率の変化から、図6に示すように水塊が高圧空気 填(ボイド率0)、No. 22 に水面が形成(同0.99)、の注入により鉛直上向きに移動していることが分



図 6 格納容器内における水の存在割合の遷移

かる。図6では、縦軸に図3で定義したボリュー ている一方でそれより上に位置するボリュームで ムの番号(下の No.1~40 が容器下部、上の No.1 は水の存在割合が下から上へ 0.5~1へと遷移し が容器下部のボリューム No.25 を満たす時刻、(3) がオリフィス近傍に達した。 水が容器下部のボリューム No.30 を満たす時刻、 (4) 水が容器下部のボリューム No.35 を満たす時 ものであり流動様式は考慮されていない。従って 刻、(5)水が容器下部のボリューム No.40 を満た これのみでは実験の状況が正確に再現されている す時刻、におけるそれぞれのボリュームにおける かは判断できない。 水の体積存在割合を棒グラフで表している。これ そこで RELAP5-3D で出力される変数の一つで によると空気注入開始から約 0.17 秒後(図 6 の ボリューム内における界面の高さを示す、 より移動させられていることを示している。また ボリューム内に界面が存在する場合は「VOLELV」 (3)~(5)においては No.1~21 では若干水が残っ は0とボリューム高さの間の値となる。一方界面

~ 3 が容器上部に属する)、縦軸が各ボリューム ており、水塊が移動している状況が再現されてい における水の体積存在割合、[1 ーボイド率]を表る。そして(5)においては底部に存在していた水 示している。 そして(1)高圧空気注入前、(2)水 容積の約8割(874/)が押し出されその内約380/

ただし、図6は単純にボイド率のみを評価した

(2)) に初期水容積の 1/4 (約 260/) が高圧空気に 「VOLELV」を使って水面位置を計算した。ある



が次の時刻で別のボリュームに移動した等の理由 ボリューム群では「VOLELV」は連続的に変化し でそのボリュームに存在しない場合「VOLELV」 は0をとる。今回の場合、鉛直方向にボリューム とができる。 が分割されていることから、高圧空気の注入によ

ていた。従ってこれを使って水面位置を求めるこ

その結果を図7に示す。図7では「VOLELV」 り容器下部のボリューム No.21 より上に位置する による計算結果は実線で、容器内部の高速度撮影

それぞれプロットしている。また(1)~(5)は図 6 ったことから、適用されたのはボイド率のみとな での番号である。これによると可視化した範囲内 る。 においては計算結果と実験結果はかなり一致して 解析結果での水撃が生じるまでの間において いることが分かる。また、解析結果では時刻 ( = は、まず初期に水が存在した領域では、気泡流か 0.874 sec において線の勾配が急激に変化したこ らスラグ流へ遷移していた。また初期に空気が存 とからこの時刻で水面がオリフィス板に達してい 在した領域では環状噴霧流、スラグ流、気泡流へ る、つまりオリフィス板への水撃が生じていること遷移した。 とが推測される。

示す。三角と細実線でプロットされているのが解している状態であり、可視化観測と一次元ボリュ 析結果、四角でプロットされているのが実験結果 ームの観点からは、この場合、瞬間的であれスラ である。同じく可視化範囲においては誤差 20% グ流よりもむしろ垂直層状流になっていたと見な 以内となっており比較的良い結果が得られてい せる。これは空気流が貫通している状況を る。これによると一時的な減速はあったが水面の RELAP5-3D の設定では正確に判断しにくいこと 上昇速度は最大で約 5.4 m/s に達した。

リフィスに最も近いボリュームにおける圧力も図 運動のコヒーレント性が極めて高い状況を予測し 8 に太実線で示す。予測通り水面がオリフィス板 ているとも考えられる。海技研の実験では様々な に達している t = 0.874sec において約 6.08 MPa も 要因により上記のようにコヒーレント性が低い状 の水撃圧が生じたことが分かる。これはコヒーレ 況から高い状況まで結果がばらついている。従っ ント性が完全な場合 4.42MN(約 450tf)の荷重が、て解析で提示された結果が実験では起こりうると 瞬時にオリフィス板に作用したことを意味する。

### 4. 考察

一次元解析の結果、中規模実験での水塊移動は RELAP5-3D を使った数値解析で再現可能である ことが分かった。しかし細かい面で解析結果は実 RELAP5-3D を使った一次元数値シミュレーショ 験結果とのずれを生じている。

最も顕著だったのは空気流が水塊を貫通する状 いては実験結果と良い一致が得られた。 況を再現されなかったという点である。そのため オリフィス板で生じる水撃圧が過大評価される結 圧はその運動が極めて高いコヒーレント性を有す 果となった。例えば今回取り上げた条件下の実験 る際のものであるということから安全性を評価す で計測した水撃圧は 0.9~ 2.0MPa となった。

この結果は RELAP5-3D の垂直管における二相 流流動様式のマッピングが、今回の実験のように 1ms 以下の短い時間で応答する現象にまで適用で [1]汐崎他、平成 12 年度(第 74 回)船舶技術研 きるかという問題に関わってくる。通常この流動 究所研究発表会講演集、pp. 361-364 様式はボイド率、平均質量流束及び飽和度という [2]The RELAP5-3D Code Develop Team、 3 つのパラメータによって決まる[2]。今回の場 INEEL-EXT-98-00384, Revision 1.2a, May 2000

により得た時間と水面の高さ位置の関係は四角で 合、飽和度は一定であり平均質量流束も十分速か

一方、実験において高圧空気流が水塊を貫通す さらに図7から求めた水面の上昇速度を図8に る状況は高速の気相流と0~低速の液相流が併存 を意味する。

さらに容器下部のボリューム No. 40、つまりオ その一方で解析結果が最悪の状況、つまり水塊 いう観点からすれば、これを基にして安全性を評 価し対策を立てることは有効であろう。

# 5. まとめ

海技研で行われている中規模実験を ンにより検証した。その結果水面位置の変化につ

また、水塊がオリフィス板に衝突した時の水撃 るのには有効である。

#### 参考文献