

平成 29 年度 卒業論文

高圧条件下における非常用復水器の 冷却性能評価に関する研究

原子炉工学研究室

森 正義

北海道大学 工学部 機械知能工学科

目次

第1章	序論	1
1.1	背景	1
1.2	非常用復水器の機能.....	3
1.3	福島第一原発における現行型 IC の課題.....	4
1.4	研究目的	8
第2章	実験	10
2.1	実験装置	10
2.1.1	実験装置の概要.....	10
2.1.2	測定部について.....	11
2.2	実験手順	13
2.3	実験結果	14
2.3.1	2MPa 実験	14
2.3.2	4MPa 実験	17
2.3.3	6MPa 実験	20
2.3.4	除熱量の評価.....	23
2.3.5	IC 模型部の観察.....	25
2.3.6	非凝縮性ガスの影響についての検討.....	28
第3章	解析	31
3.1	TRAC-BF1 コードについて.....	31
3.2	TRAC-BF1 で使用されている凝縮熱伝達モデルについて	32
3.3	解析体系・解析条件.....	35
3.3.1	解析体系の概要.....	35
3.3.2	境界条件・解析体系の詳細について	36
3.4	解析結果	38
3.4.1	相関式に変更を加えない場合	38
3.4.2	相関式を変更した場合.....	44
第4章	結論	51
参考文献		52
謝辞		53
質問への回答		54

第1章 序論

1.1 背景

近年,世界のエネルギー消費量は着実に増加し続けており,特に発展途上国では経済規模の拡大とともにエネルギー需要が増大している.この需要を化石燃料だけで賄うことには,大きな課題が存在する.ひとつは利用できる資源の量が限られ,枯渇の恐れがあること,もうひとつは燃焼に伴って汚染物質や地球温暖化の原因となる二酸化炭素が放出されることである.とくに二酸化炭素の放出は,地球温暖化による異常気象が年々深刻化している現在の状況においては,化石燃料のもっとも大きな問題点といえる.こうした状況の中,原子力発電はエネルギー密度が高く,発電時に二酸化炭素を放出せず莫大な電力を生み出す有力なエネルギー源として世界中で利用が進められてきた.

しかし,原子力発電には常に大きなリスクが伴う.2011年3月11日の福島第一原子力発電所の事故とそれによる放射性物質の大規模放出は,原子力への不信感,安全性への疑問を多くの人に植え付けることとなった.その事故では,津波によって全交流電源喪失が発生し,安全系の多くが使用不能に陥ったことで,被害が急速に拡大した.

だが,前述の通り,化石燃料だけを利用していくことには無理があり,自然エネルギーの開発も十分には進んでいない現状では,原子力の利用は必要なことであろう.これからは,原子力の安全性を高め,二度と放射性物質の大規模放出を繰り返さないことが求められる.特に,福島第一原発が経験した全交流電源喪失への備えは必須であり,電気を必要としない静的安全系の重要性が高まっている.

こうした状況を踏まえ,我々は原子力発電所の安全装置のひとつである非常用復水器(Isolation Condenser, IC)に着目した.ICは事故時に炉心の冷却を行う静的炉心冷却系のひとつであり,福島第一原子力発電所でも使用されていた.さらに,第三世代+と呼ばれる最新世代の原子炉の中にも,ICおよびICに類似する冷却系を装備しているものがある.例を挙げると,GE日立が開発したESBWRには,図1.1.1に示すように,炉心冷却を行うIC(ICS)と,ICと同様の原理で格納容器冷却を行うPCCS(Passive Containment Cooling System)が備えられている.また,ウェスティングハウスが開発したAP1000は,図1.1.2のようなPassive Residual Heat Removal Heat Exchanger(PRHR HX)という,ICと同じ原理で炉心冷却を行う安全系を装備している.さらに,中国で開発された最新のPWRであるHPR1000は,ICと同じ原理で蒸気発生器の二次側と格納容器の冷却を行う系統を備えている(図1.1.3).このように,ICは現行型の原子炉で使用されていただけでなく,今後建設の進む第三世代+の原子炉でも広く採用されており,原子炉の過酷事故防止を考える上で大きな役割を担うものである.ICを過酷事故の防止策として活用していくためには,事故時のICの冷却性能や作動可能な条件について正しく理解する必要がある.

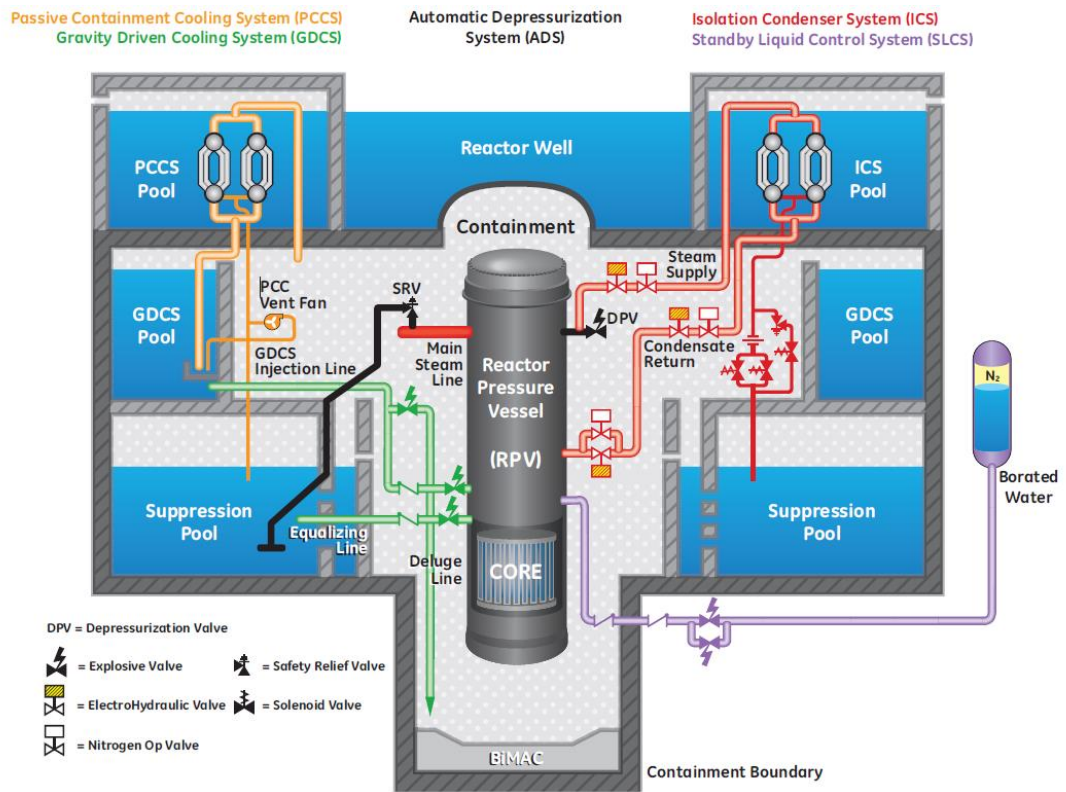


図 1.1.1 ESBWR の安全系 [1]

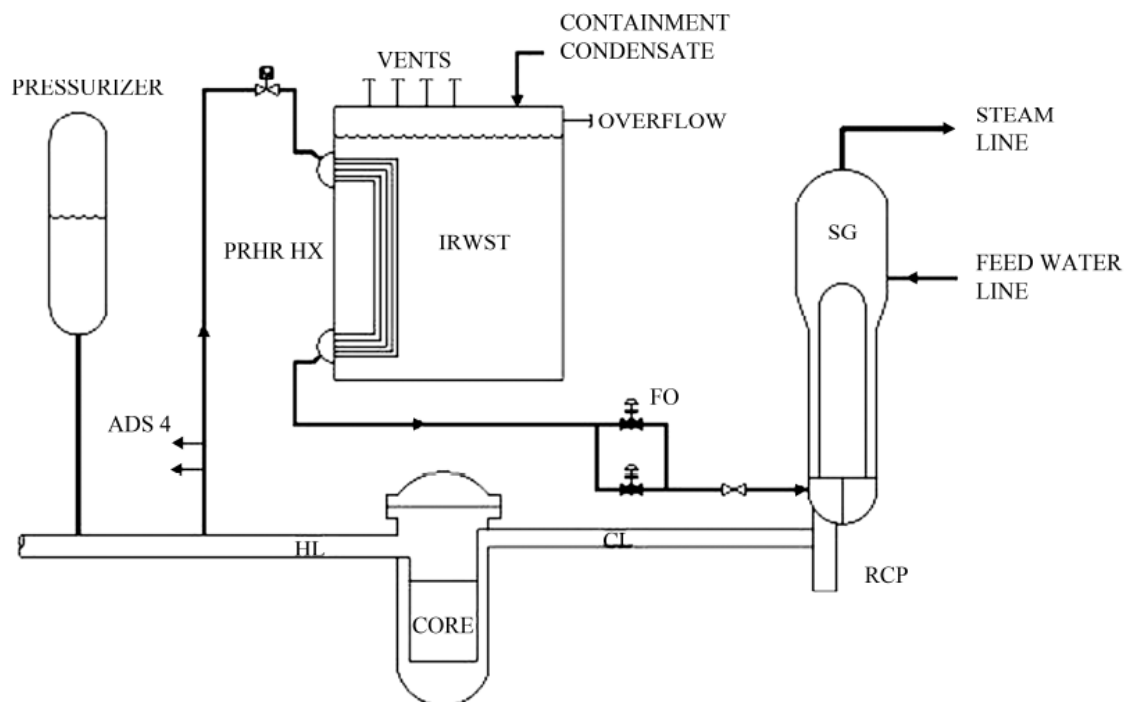


図 1.1.2 AP1000 の PRHR HX [2]

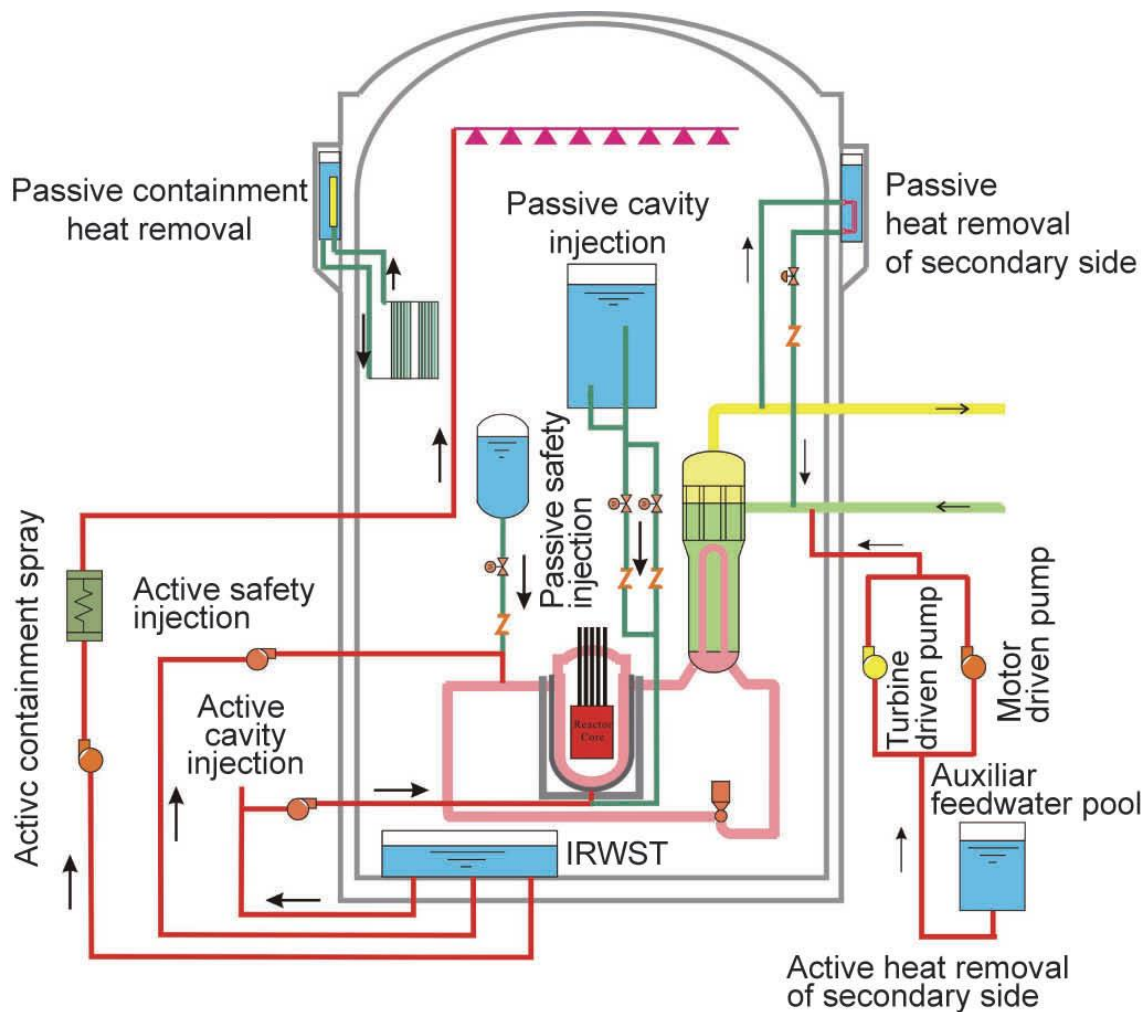


図 1.1.3 HPR1000 の安全系 [3]

1.2 非常用復水器の機能

非常用復水器(IC)とは、BWRの事故時において、主復水器を用いた通常の崩壊熱除去ができない場合に、崩壊熱の除去を行う安全系である。ICはU字形の伝熱管の束と冷却水プールからなり、伝熱管は冷却水に浸かっている。ICの操作には入口側の配管と出口側の配管にそれぞれ設けられている隔離弁を使用する。通常時には入口側の弁は開かれており、出口側の弁は閉じられている。これにより、通常運転時には原子炉から伝熱管までは蒸気で満たされ、伝熱管から出口側の弁までは水で満たされた状態になっている。

ICは、原子炉圧力が高い状態が一定時間以上続くと、出口側の弁が自動的に開くことで起動する。ICが起動すると、伝熱管に炉心からの蒸気が流れ込み、流入した蒸気は伝熱管内で復水タンクの冷却水と熱交換をして凝縮し、出口側配管へ流れていく。冷却水に渡された熱は最終的に大気へ放出される。このように、ICは自然循環流によって崩壊熱を除去することができる静的冷却系である。

1.3 福島第一原発における現行型 IC の課題

福島第一原発事故の際には,1 号機で IC が実際に使用された.図 1.3.1 に福島第一原発 1 号機の IC 系統図を示し,表 1.3.1 に IC 系統に存在する弁の名称を示す.事故当日に福島第一原発 1 号機で起こった事象のうち,IC に関連することをまとめると表 1.3.2 のようになる.

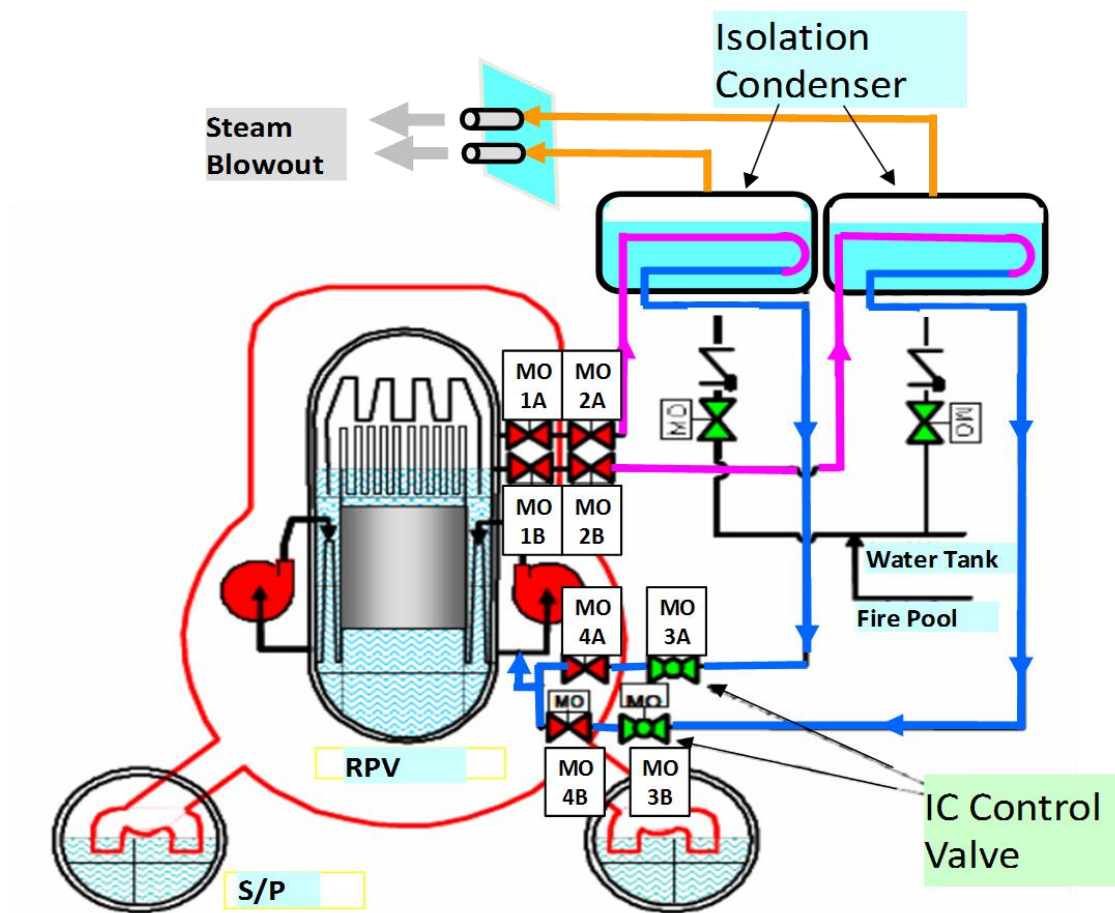


図 1.3.1 福島第一原発 1 号機の IC 系統図

表 1.3.1 各隔離弁の名称

弁番号	名称	駆動用動力源	通常運転時の状態
MO 1 A	A系原子炉容器内側隔離弁	交流電源	開
MO 2 A	A系供給配管隔離弁	直流電源	開
MO 3 A	A系戻り配管隔離弁	直流電源	閉
MO 4 A	A系原子炉容器内側隔離弁	交流電源	開
MO 1 B	B系原子炉容器内側隔離弁	交流電源	開
MO 2 B	B系供給配管隔離弁	直流電源	開
MO 3 B	B系戻り配管隔離弁	直流電源	閉

MO 4 B	B系原子炉容器内側隔離弁	交流電源	開
--------	--------------	------	---

表 1.3.2 3月11日の福島第一原子力発電所1号機事故事象 [4]

凡例 ○：記録あり △記録に基づき推定

時系列				分類	備考：発生事項及び記録の参照箇所
No	日時		時系列イベント		
1	3/11	14：46	地震発生	○	三陸沖で東北地方太平洋沖地震が発生した.この地震により,福島第一原子力発電所の在所である大熊町に震度6の揺れが襲った.
2		14：46	原子炉スクラム	○	H23.5.16 報告 4.運転日誌類 当直長引き継ぎ日誌
3		14：47	MSIV 閉	○	H23.5.16 報告 4.運転日誌類 当直長引き継ぎ日誌
4		14：52	IC（A）（B） 自動起動	○	H23.5.23 報告 3.警報発生記録等データ アラームダイバ 1号機で 7.13MPa 以上の原子炉圧力が 15 秒間継続した為 IC が自動起動した.この時起動したのは A 系及び B 系の 2 系統であった.
5		15：03	IC(A)停止	○	H23.5.23 報告 「東北太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と影響評価について」 戻り配管隔離弁（MO-3 A, 3 B）のみを閉操作して 2 つの IC を手動停止した.これは圧力容器の温度低下速度が 55℃/h を超えてしまいそうになった為である.福島第一原子力発電所原子炉施設保安規定には原子炉冷却材温度変化速度は 55℃/h 以下と定められていた.これ以降当直は,温度低下速度を 55℃/h よりも大きくしない為, A 系のみを作動させることにより原子炉圧力を制御しようとした.津波で全電源喪失するまで,合計 3 回にわたって,戻り配管隔離弁（MO-3A）の開閉操作を繰り返すことにより原子炉圧力制御がおこなわれた.
6		15:07	CCS 系トーラス	○	H23.5.16 報告（4.運転日誌類）,H23.5.23

			クーリング (A) インサービス		(その後全交流電源喪失に伴い停止)
7		15 : 10	CCS 系トーラス クーリング (B) インサービス	○	H23.5.16 報告 (4.運転日誌類) ,H23.5.23 (その後全交流電源喪失に伴い停止)
8		15 : 17	IC(A)再起動	△	原子炉圧力の推移 (H23.5.16 報告 2 チャートの記録) から,IC の動作を推定
9		15 : 19	IC(A)停止	△	原子炉圧力の推移 (H23.5.16 報告 2 チャートの記録) から,IC の動作を推定
10		15 : 24	IC(A)再起動	△	原子炉圧力の推移 (H23.5.16 報告 2 チャートの記録) から,IC の動作を推定
11		15 : 26	IC(A)停止	△	原子炉圧力の推移 (H23.5.16 報告 2 チャートの記録) から,IC の動作を推定
12		15:32	IC(A)再起動	△	原子炉圧力の推移 (H23.5.16 報告 2 チャートの記録) から,IC の動作を推定
13		15:34	IC(A)停止	△	原子炉圧力の推移 (H23.5.16 報告 2 チャートの記録) から,IC の動作を推定
14		15:37	全交流電源喪失	○	H23.5.16 報告 4.運転日誌 当直長引継日誌 大きな津波が第一発電所発電所を襲った.この津波により,燃料タンクは流失し地下の非常用電源も故障した.これにより 1 号機は全交流電源喪失状態となり,IC 制御盤上の状態表示灯が消えた.当直は配管隔離弁の開閉を繰り返していた為,この時点での開閉状態が分からなくなった (東京電力が公表したデータによると,この時の原子炉圧力は上昇していた為,配管隔離弁は閉まっていたと思われる).また当直は,全電源喪失に伴い,フェイルセーフ機能によって全ての隔離弁が閉まることを知らなかった.これらのことにより現場は,実際には IC が停止しているにもかかわらず,

					作動していると誤認してしまった.
15		17:15			発電所対策本部技術班は,1号機の炉心露出が開始するまでの時間を残り1時間と予測した.この情報から,この時点で IC の冷却機能が十分働いていないことが認識できたはずであった.しかし,同時に多数の原子炉が全電源喪失をするという未曾有の事態において,その認識に至ることができなかった.
16		18 : 18	IC(A)系 2A,3A 弁開/蒸気発生	△	H23.5.16 報告 7.各種操作実績取り纏め 当直が A 系の供給配管隔離弁 (MO-2 A) および戻り配管弁 (MO-3 A) の全閉を示すランプが点灯していることに気付いた.A 系の原子炉内側の隔離弁 (MO-1 A,MO-4 A) については状態表示ランプが機能していなかった為,開閉状態が不明であった.しかし,通常時には開いているはずの供給配管隔離弁が閉まっていることからフェイルセーフ機能によって隔離弁が全て閉まっている可能性に気付いた.原子炉内側の弁がどのような状態でも,MO-2A と MO-3A を閉めたままでは IC が作動できないため,当直は制御盤上の操作によってそれぞれの弁を開いた.これらの弁のモーターは直流電源であった為,前交流電源喪失下においても動く可能性はあった.一方,A 系・B 系の格納容器内側の弁は駆動用モーターが交流電源であった為,全交流電源が喪失した状態では遠隔操作不能であった.残念ながら,これらの弁には原子炉を制御しながら手動操作できる仕組みも備えられていなかった.
17		18 : 25	IC(A)系 3A 弁閉	△	H23.5.16 報告 7.各種操作実績取り纏め 当直が IC の作動状態を確認するために IC 排気口から蒸気が発生しているか否かについて調べた結果,継続的に蒸気が発生している事を確認することができなかった.当直はこの結果を,復水器タンク内の冷却水が少なくなっているせいで

				IC が作動していないと考えた.原子炉内の高温・高圧の蒸気が冷却されないまま IC 配管を循環すると,IC 配管が破損する恐れがあった為,弁を閉じた.
--	--	--	--	---

これによると,15:37 に全交流電源喪失が発生した際,フェイルセーフ機能によって IC の隔離弁が閉じたこと,表示灯が消えたことでそれに気づかなかったこと,さらに弁の手動操作が不可能であったことにより,IC が静的冷却系として使用できたにも関わらず,その機会を逃してしまっていたことがわかる.さらに,先行研究によって,津波が到達した時点で IC を 1 機でも作動させていれば炉心露出には至らなかったことが示されている [4].つまり,福島第一原発 1 号機の IC は交流電源喪失時に炉心損傷を防ぐのに十分な冷却性能を持っていたが,そのような使い方が想定されていなかった.IC を静的冷却系として十分に活用するには,IC の動作状態を確実にわかるようにし,手動操作によって IC の起動を可能にすることが必要である.また,静的冷却系として IC を運用するにはもうひとつ大きな課題が残されている.IC の配管は炉心とつながっているため,炉心で水素などの非凝縮性ガスが発生した場合,それが IC の伝熱管内に侵入する可能性がある.そうすると,蒸気の凝縮熱伝達が阻害され,IC の冷却性能が低下してしまう.実際に,福島第一原発事故では,18:18 に 3A 弁が開かれたが,18:25 時点で冷却水の蒸発は確認されなかった.このとき,すでに炉心の損傷が進行しており,燃料被覆管の酸化によって発生した水素が IC 伝熱管内に侵入し,IC が機能不全に陥っていた可能性が指摘されている [5].このように,IC は炉心冷却において有力であると考えられるが,その性能が十分に発揮されないケースが起こりうる.事故時の条件において,IC の冷却性能を予測可能とすることが求められている.

1.4 研究目的

本研究では,IC の模擬実験と二相流解析を実施し,事故時の IC の冷却性能を評価するために重要な高温高圧条件下における凝縮熱伝達データを取得すると共に,原子炉の安全解析にも利用されている二相流解析で IC 内部の凝縮熱伝達を再現するための課題を抽出することを目的とした.原子炉運転圧力と同程度の圧力における凝縮熱伝達データは公開されておらず,既存のデータのみで IC の挙動を正確に予測することは困難である.また,高圧における凝縮熱伝達のデータの不足により,原子炉の安全解析に使用される原子炉システム過渡解析コードなどでは,凝縮熱伝達の計算には低い圧力での実験に基づく実験式が使用されている.さらに,IC は非凝縮性ガスによって機能不全となることが指摘されているが,それに関する実験データも公開されておらず,IC への非凝縮性ガスの影響に関する知見は不足している.そこで,本研究では,以下に示す 3 点を実施することとした.

- (1) 実機 IC を模擬した装置で原子炉の運転圧力と同程度の圧力での蒸気の除熱実験を行い,冷却性能評価に関するデータを取得し,IC でどのような現象が起こっているかを明らかに

にする.また,取得したデータより冷却性能の評価を行う.

- (2) 実験データをもとに二相流解析コード TRAC-BF1 を用いた実験解析を行い,TRAC-BF1 の凝縮熱伝達モデルの妥当性について検討する.
- (3) 実験装置を用いて,IC の冷却性能に対する非凝縮性ガスの影響を検討する.

第2章 実験

2.1 実験装置

2.1.1 実験装置の概要

実験には、高圧蒸気を作り出すための圧力容器(アキュムレータ)と IC を模擬した装置を使用した。実験装置の概略図を図 2.1.1 に示す。アキュムレータは内部にヒーターを持っており、加熱によって最大 6MPa 以上の飽和蒸気を作り出すことができる。アキュムレータから IC 手前までの配管は 1 本で、IC の手前で 2 本に分岐しており、管路の途中の弁(IC 入口弁)と分岐した管にそれぞれ備えられた弁(隔離弁)をもつ。IC 模型部は冷却水を溜めるポリカーボネート製水槽と 2 本の U 字形伝熱管からなる。ここでは手前の伝熱管を B 系、奥の伝熱管を A 系としている。IC 出口からアキュムレータ手前までの配管は 2 本で、アキュムレータの手前で 1 本に合流しており、2 本の戻り管にはそれぞれ弁(IC 出口弁)が備えられている。また、水槽の上部は大気へ開放されており、内部は常に大気圧となっている。IC の駆動力となる水頭圧を十分に確保するため、IC 模型部は実験系の最下部から約 5m 高い場所に配置した。

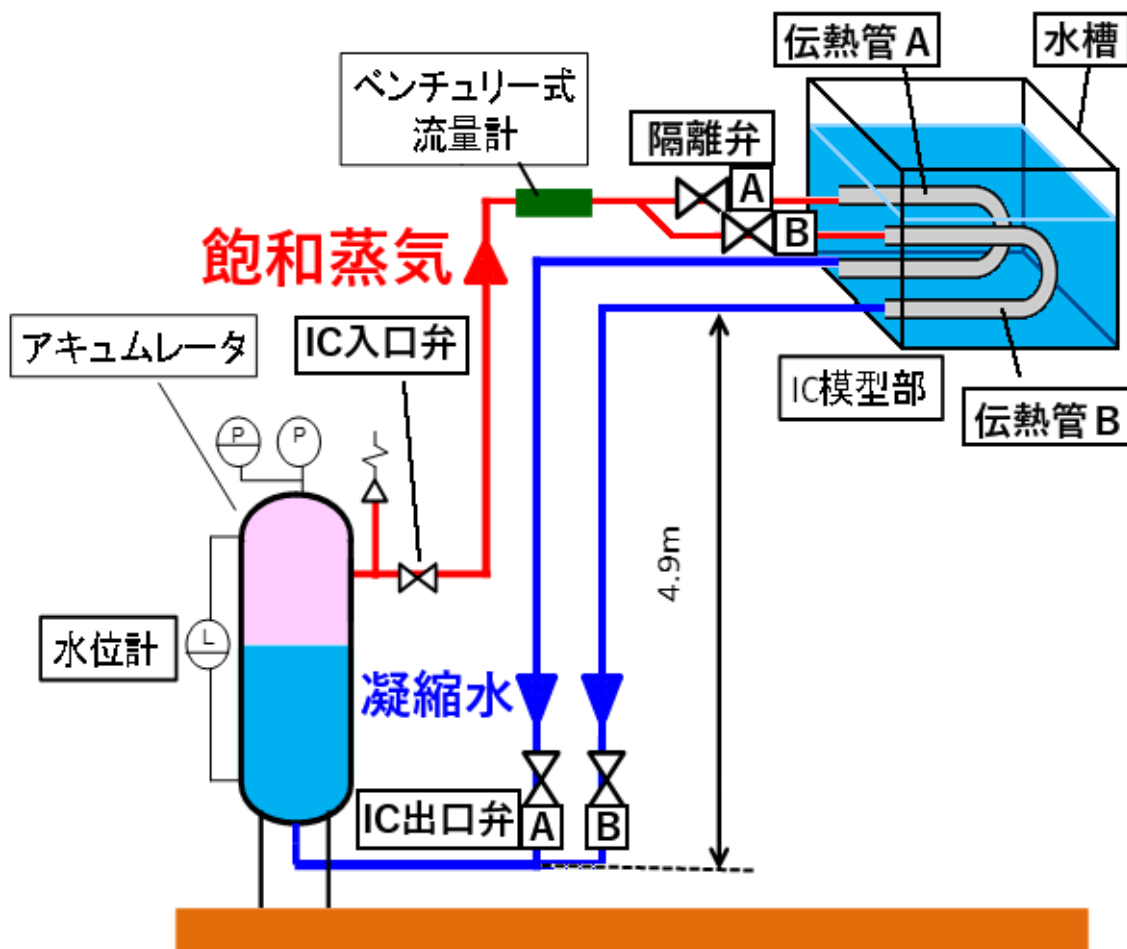


図 2.1.1 高圧可視化実験装置概要図

2.1.2 測定部について

実験装置は,測定機器として,隔離弁の手前にベンチュリー式流量計と圧力センサー,IC 模型部に熱電対計 19 本をもつ.使用した測定機器の一覧を表 2.1.1 に示す.

表 2.1.1 測定機器の一覧

位置	種類
隔離弁の手前	圧力センサー PVL-100KC
隔離弁の手前	ベンチュリー式流量計
伝熱管 A 内部	K 型熱電対 6 本
伝熱管 B 内部	K 型熱電対 6 本
伝熱管 A 外壁表面	K 型熱電対 6 本
水槽内部	K 型熱電対

図 2.1.2 と図 2.1.3 は,IC 模型部の設計を示したものであり,図 2.1.4 は伝熱管 A に備えられている測定点の位置を示したものである.熱電対は,伝熱管 A 内部に挿入されているものを入口側から順に A1~A6,伝熱管 B 内部に挿入されているものを同様に B1~B6 とし,伝熱管 A の外壁面に設置された熱電対は入口側から順に AW1~AW6 とした.水槽内部に挿入された熱電対は冷却水の温度を測るためのもので,深さ 210mm の位置にある.

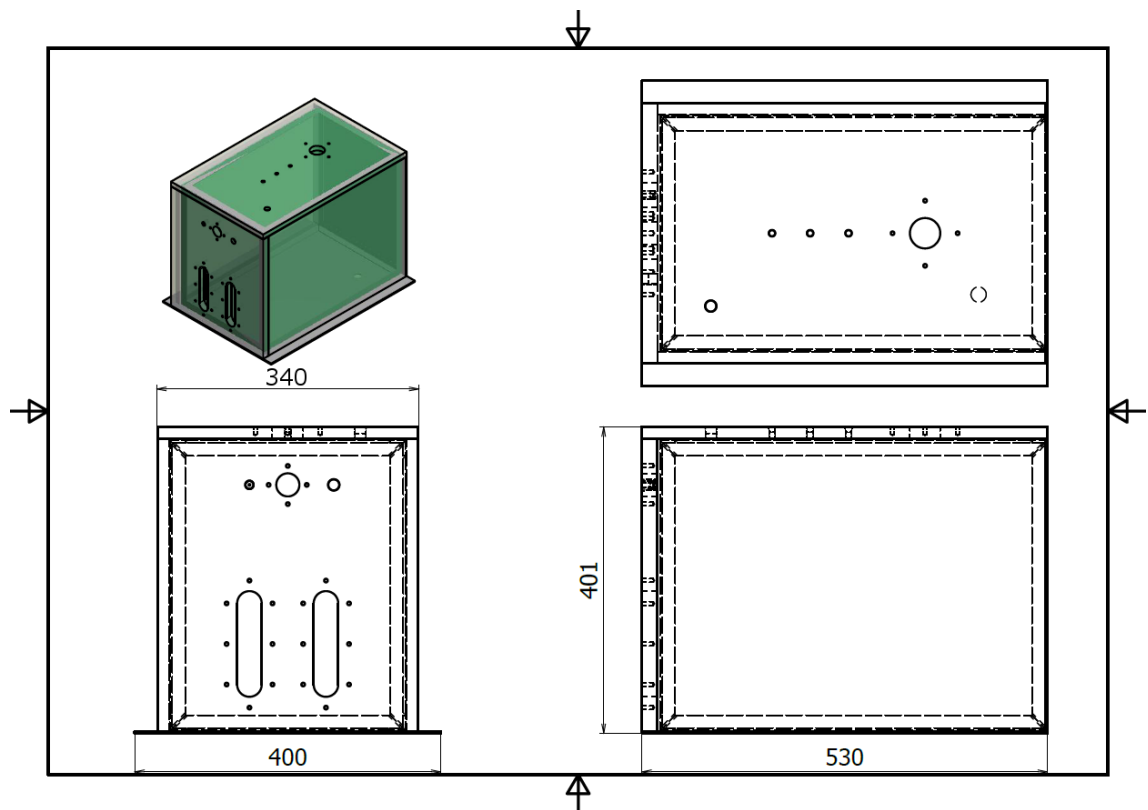


図 2.1.2 IC 水槽の設計

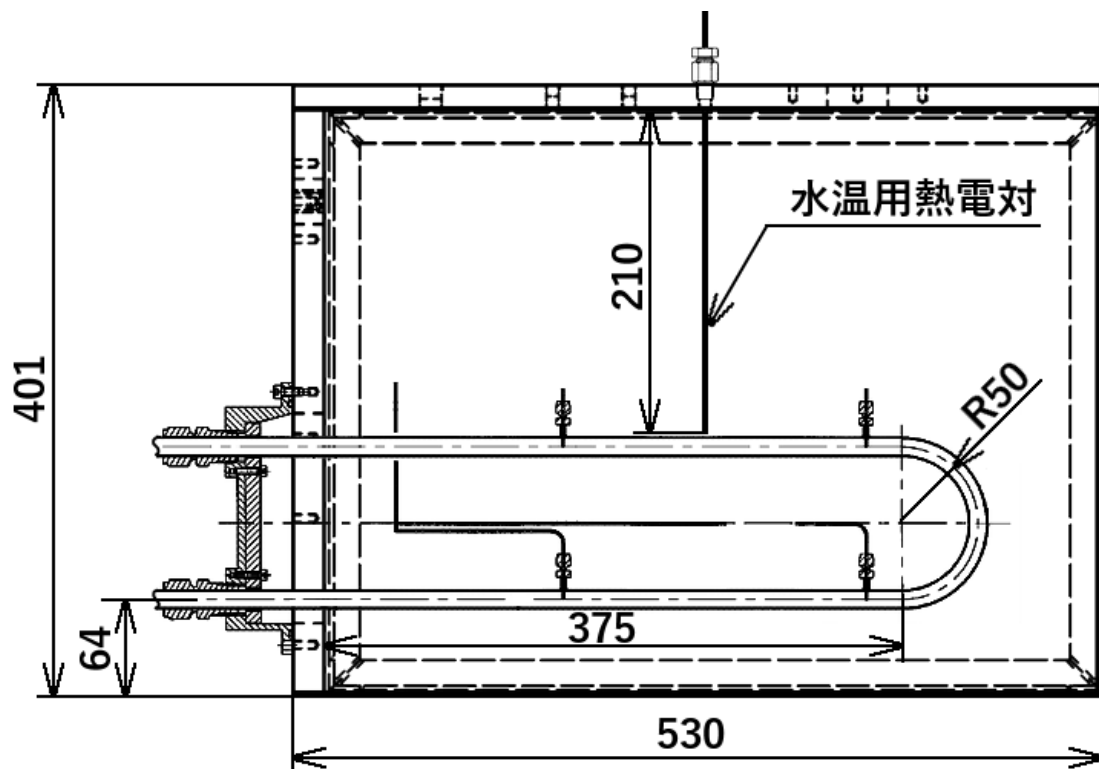


図 2.1.3 IC 模型部

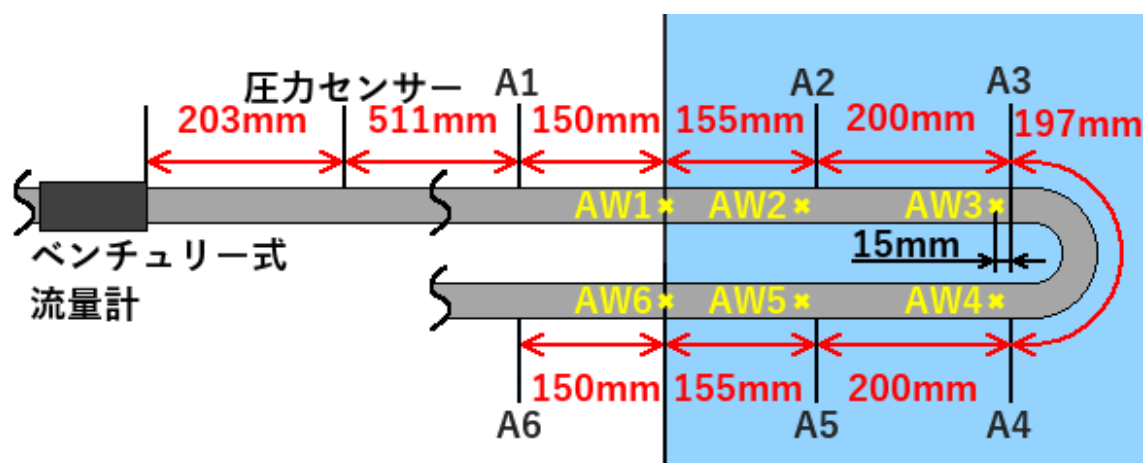


図 2.1.4 伝熱管の測定点

また,使用した伝熱管は表 2.1.2 に示す通りのものとなっている.

表 2.1.2 伝熱管の仕様について

水槽内の伝熱管長さ	907mm
内径	10.9mm
厚み	0.9mm
伝熱面積	0.036m ²
材質	SUS304

2.2 実験手順

実験は以下に示す手順に従って行った.なお,測定は伝熱管 A のみを使用して行った.

●アキュムレータの準備

- (1) アキュムレータ水位を確認し,過不足のある場合は調節した.
- (2) アキュムレータにつながる弁を閉め,アキュムレータを隔離した.
- (3) ヒーターをONにし,ヒーターの温度を 120℃に設定した.
- (4) アキュムレータ内が 120℃に達したら,外気につながる流量調節弁とブローバルブを 1 分間開き,蒸気ごと中に残っていた空気を排出した.
- (5) 流量調節弁・ブローバルブを閉め,ヒーターの温度を実験圧力の飽和温度に相当する温度に設定し,アキュムレータ内の圧力が実験圧力に達するまで待った.

●IC の操作

- (1) 水槽に冷却水を,伝熱管が浸るまで入れた.
- (2) 弁は伝熱管 A の隔離弁のみが開,他は全て閉の状態とした.
- (3) 入口弁を開いた.このとき,圧力が実験圧力よりも低下した場合は圧力が回復するまで待

った。

- (4) 伝熱管 A の出口弁を開き,IC を起動させた。
- (5) アキュムレータの圧力変化がほぼなくなるまで測定を続け,出口弁と入口弁を閉めて実験を終了した。

2.3 実験結果

2.3.1 2MPa 実験

まず,アキュムレータを 2MPa になるように加圧し,実験を行った.このとき,水槽の水位は 22.1cm であった.伝熱管内温度は図 2.3.1 のようになった。

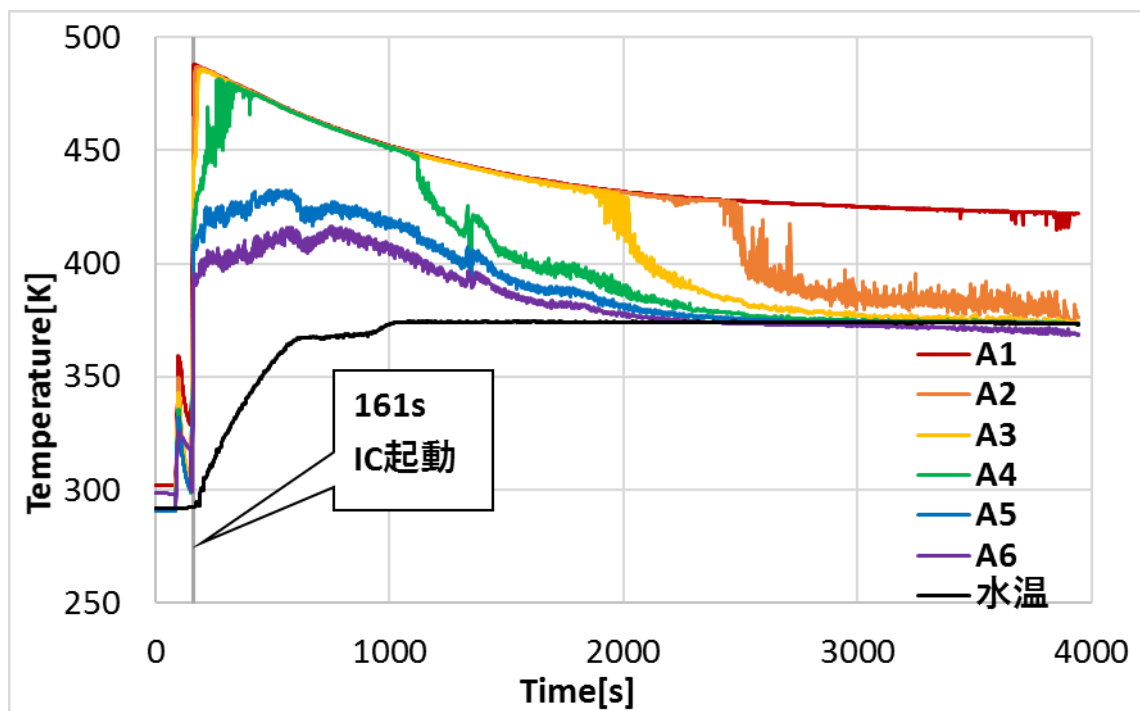


図 2.3.1 伝熱管内温度(2MPa)

A1 は水槽の外であるため,そこでの蒸気は飽和蒸気であり,A1 の温度は飽和温度である.したがって,A1 より低い温度となっている測定点以降では,蒸気は完全に凝縮し管内には水が満たされている.また,A5,A6 の温度は常に A1 を下回っている.これより,流入した蒸気は A5 の位置までには全量凝縮していることがわかる。

次に,外壁面温度の測定結果を図 2.3.2 に示す。

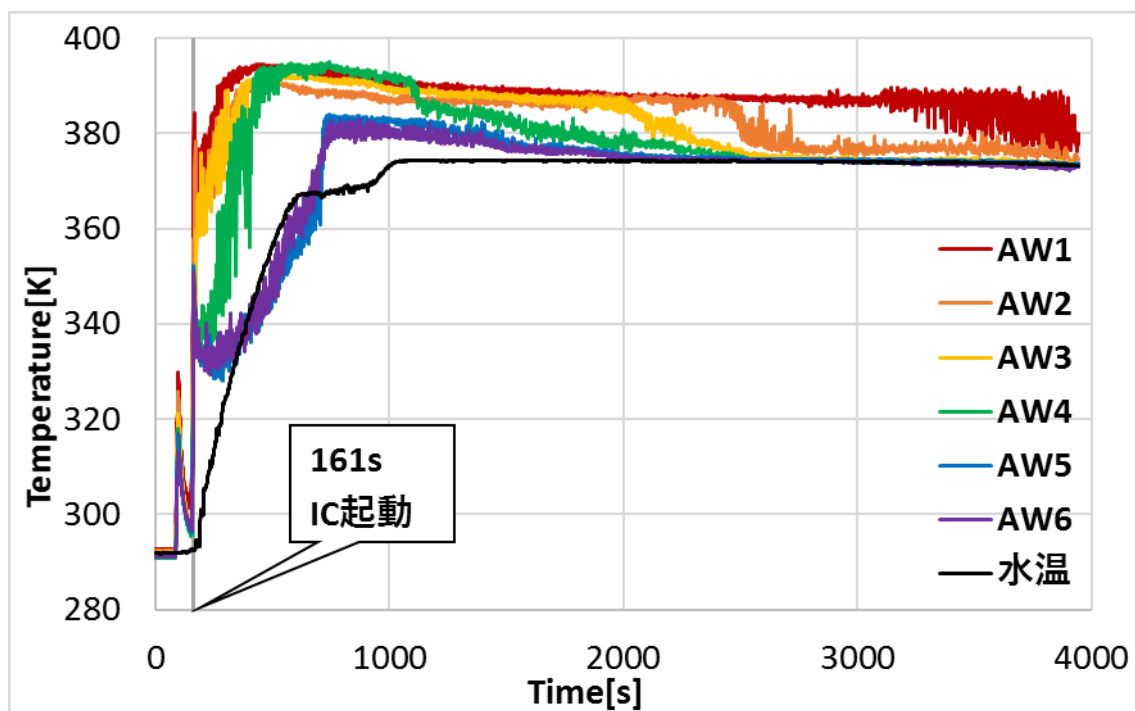


図 2.3.2 外壁面温度(2MPa)

これを見ると、測定開始から 500 秒付近では水温が壁面温度 AW5,AW6 を上回っている。水温が水槽全体で一様であれば、このような結果は考えにくい。2.1.2 で示したように、水温の測定点は上部にあり、AW5,AW6 の測定点は伝熱管下部の深い位置にある。図 2.3.1 にあるように、AW5 の位置では伝熱管内の蒸気が凝縮して温度が低くなっており、水温を測っている近くの AW2,AW3 の位置では伝熱管内は飽和蒸気で満たされている。これらのことから、冷却水に温度層ができており、下部の水温は、AW5,AW6 よりも低い温度となっていると考えられる。伝熱管上部では凝縮熱伝達によって冷却水が急速に加熱される一方で、下部では温度が低く凝縮も完了しているために冷却水の温度が上昇しにくく、冷却水上部の温度が伝熱管下部表面の温度を上回っている。また、AW4 の温度に注目すると、A4 の位置が飽和蒸気で満たされている間(A1 と同じ温度になっている間)は AW4 の温度が AW1 を上回っている。これは、ちょうど蒸気が液体に相変化する境界が AW4 の位置に来ていたため、AW4 の周辺で最も凝縮量が多く、発生する熱量が多かったためであると考えられる。A4 の位置で凝縮してから、A3 の位置が凝縮するまで、AW3 の温度が AW2 より高くなっていることも同様に考えられる。

次に、2MPa 実験における圧力の測定結果を図 2.3.3、流量の測定結果を図 2.3.4 に示す。

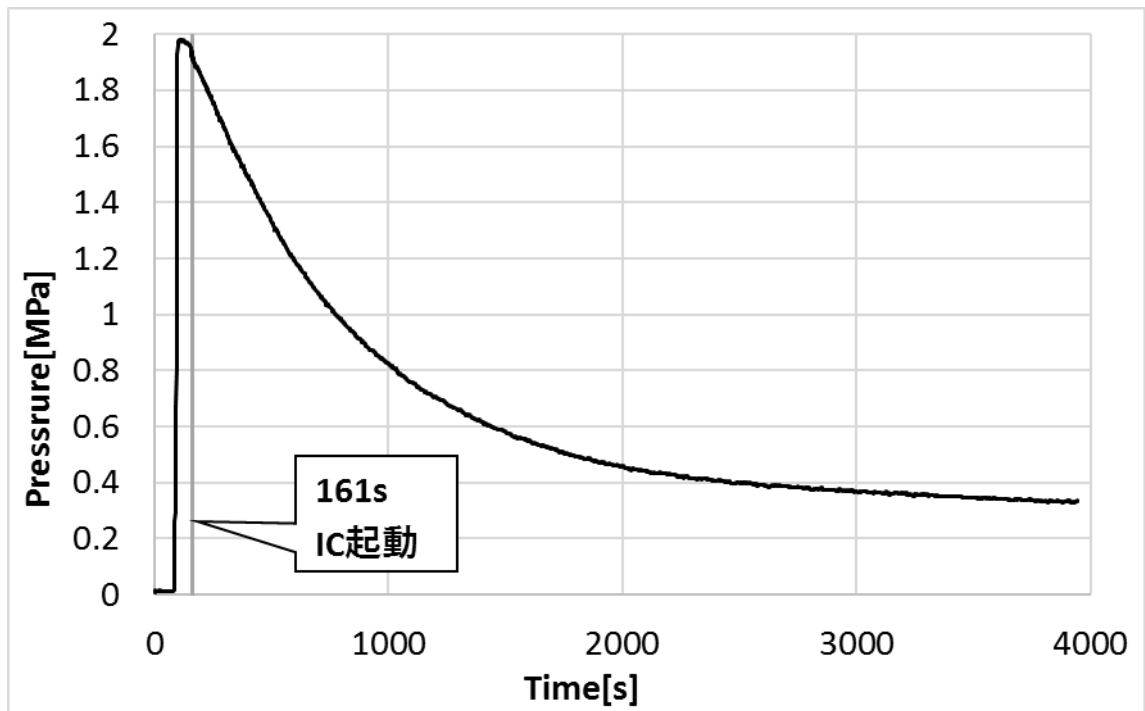


図 2.3.3 伝熱管内圧力(2MPa)

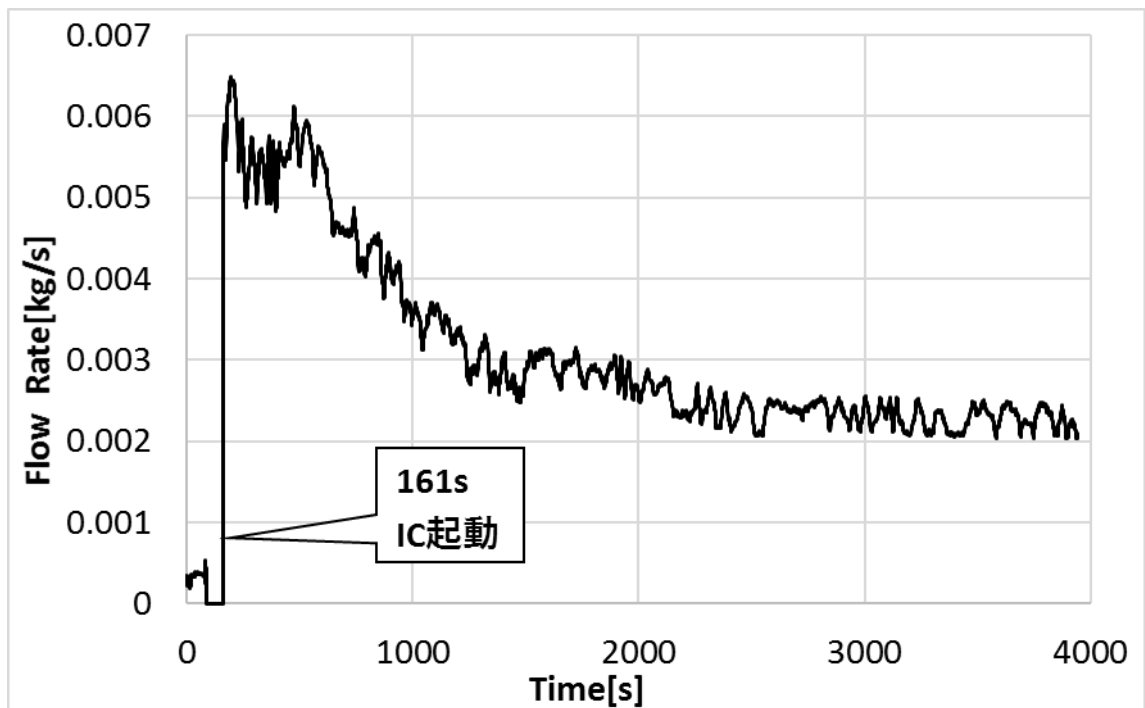


図 2.3.4 伝熱入口の蒸気流量(2MPa)

ここで、流量はベンチュリー式流量計の出力値 ΔP [Pa]を以下の式で変換して得たものである。

$$G = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot C \cdot \frac{\sqrt{2\rho_v \Delta P}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (2.1)$$

d と β は流量計の寸法より得られる定数で、 $d = 0.007\text{m}$, $\beta = d/D$, $D = 0.0185\text{m}$ である。 C は定数で $C = 0.95$, ρ_v は温度 A1 と圧力のデータを使い、蒸気表 [6]から計算した。

圧力は、伝熱管による冷却によって減少していくが、減少量は時間とともに少なくなっていく。また圧力の低下に伴って流量も減少している。圧力の変化を伝熱管内の温度変化と比較すると、蒸気の飽和温度の低下に伴って圧力が低下している。このことは、飽和温度の低下によって冷却水との温度差が小さくなると、伝熱管での除熱量が小さくなり、圧力の減少量も小さくなると説明できる。したがって、IC によって圧力容器を減圧するには、伝熱管での除熱量を大きくすることが重要であると考えられる。また、流量の変化をみると、IC が動き出す前に流量が少し上昇している。このときの時刻はちょうど IC 入口弁を開いたタイミングと一致している。また、同じタイミングで伝熱管の温度が一旦上昇している。このような温度や流量の変化が見られたのは、IC 入口弁を開いたことで伝熱管内に蒸気が流入し、出口がまだ閉じていたためにその場ですぐ凝縮して温度が下がったためである。

2.3.2 4MPa 実験

次に、アキュムレータを 4MPa まで加圧して行った実験の結果を述べる。水槽の水位は 22.0cm であった。なお、このときの実験では、冷却水の減少により伝熱管が露出しそうになったため、測定開始より 2560 秒後に出口弁を閉めて IC を停止させた。温度変化は伝熱管内が図 2.3.5、外壁面が図 2.3.6 のようになった。

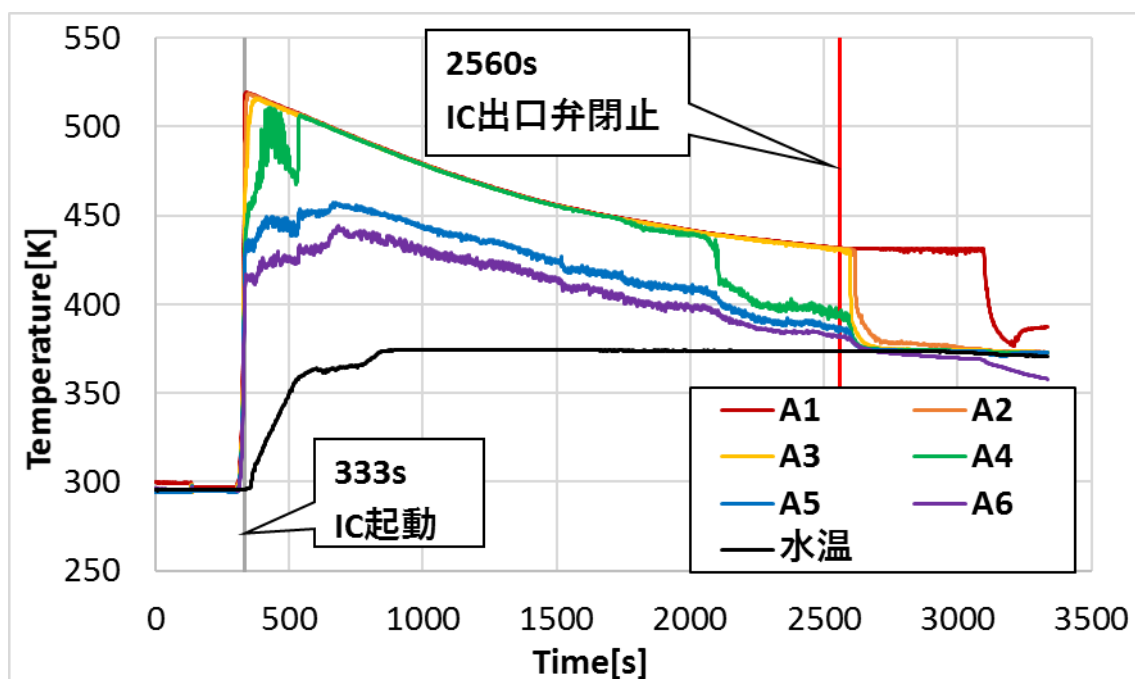


図 2.3.5 伝熱管内温度(4MPa)

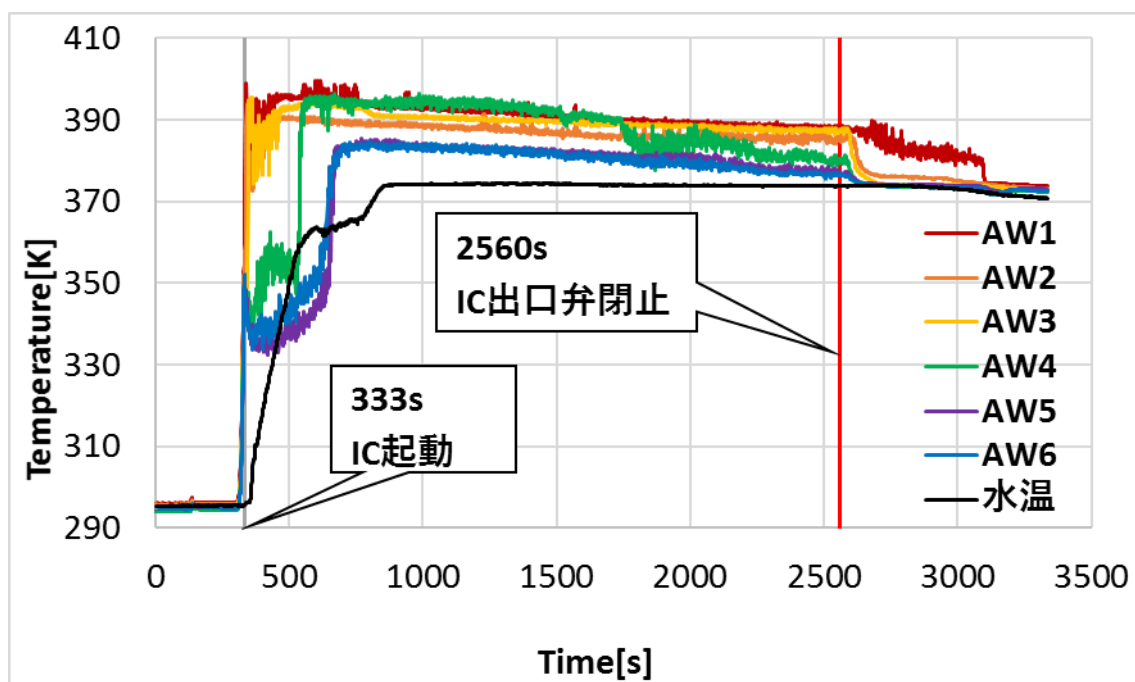


図 2.3.6 外壁面温度(4MPa)

2MPa における測定結果と見比べると,全体的な傾向は同じであり,蒸気が A5 の位置に到達するまでにすべて凝縮している点も 2MPa 実験と共通である.ただし,A3,A4 の位置が蒸気で満たされている時間はより長くなっており,外壁面温度に注目すると温度成層の影響(AW5,AW6 を上回るほどの水温の急上昇)もより顕著になっている.

次に,図 2.3.7 に圧力,図 2.3.8 に流量の測定結果を示す.

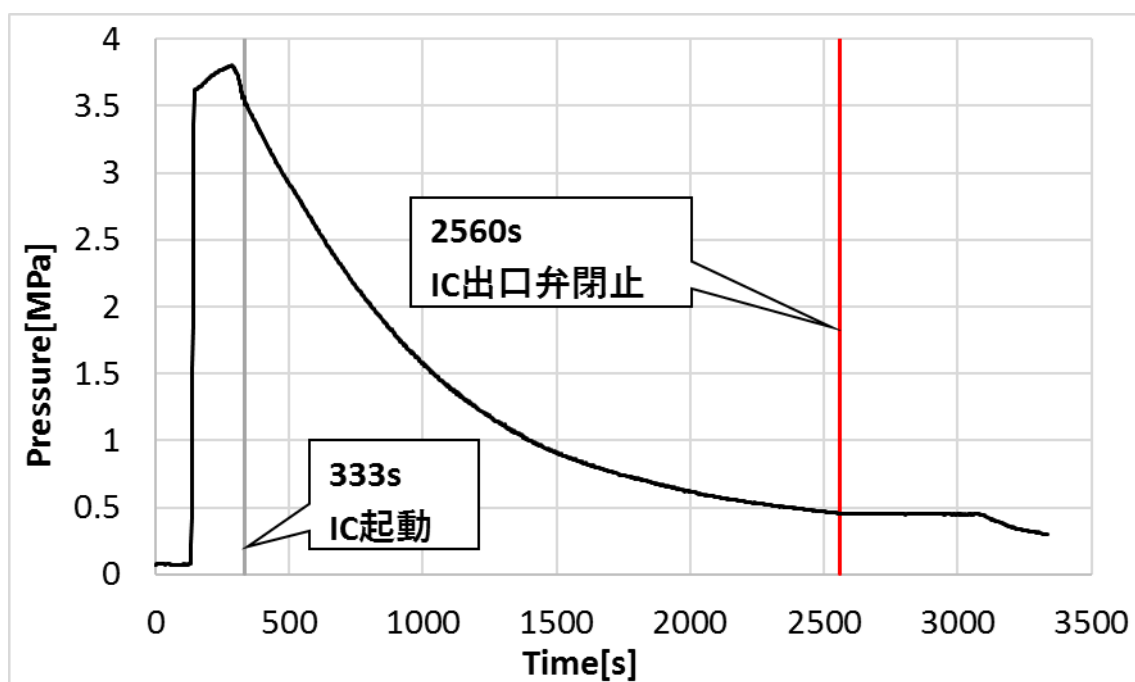


図 2.3.7 伝熱管内圧力(4MPa)

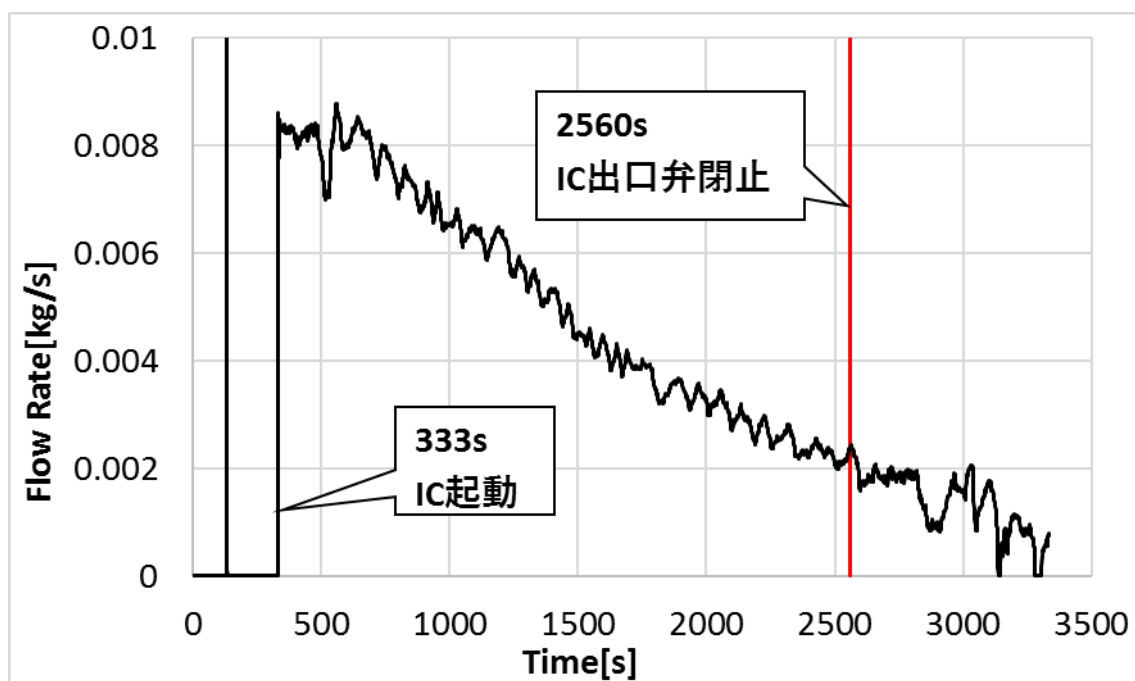


図 2.3.8 伝熱入口の蒸気流量(4MPa)

圧力と流量の変化は,飽和温度の変化と対応しており,2MPa での実験結果と同様の傾向を持っている.また,入口弁を開いたと同時に,流量が跳ね上がっているが,その時刻における温度

上昇は小さい。入口弁を開いた瞬間の蒸気の流入が一瞬であったため、大きな温度変化が現れなかったのであろう。

2.3.3 6MPa 実験

次に、アキュムレータを BWR の運転圧力よりもやや低い 6MPa まで加圧してから行った実験の結果を述べる。4MPa 実験で冷却水が不足したことから、冷却水の水位は高めに 27.7cm とした。伝熱管内の温度変化は図 2.3.9、外壁面の温度変化は図 2.3.10 のようになった。

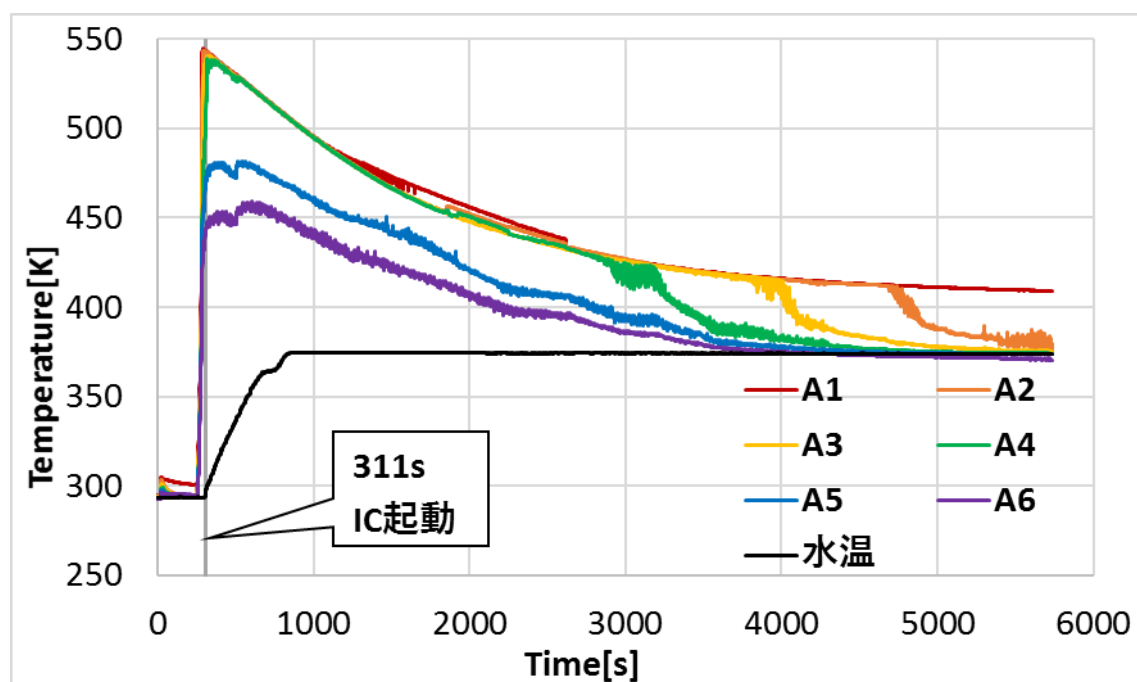


図 2.3.9 伝熱管内温度(6MPa)

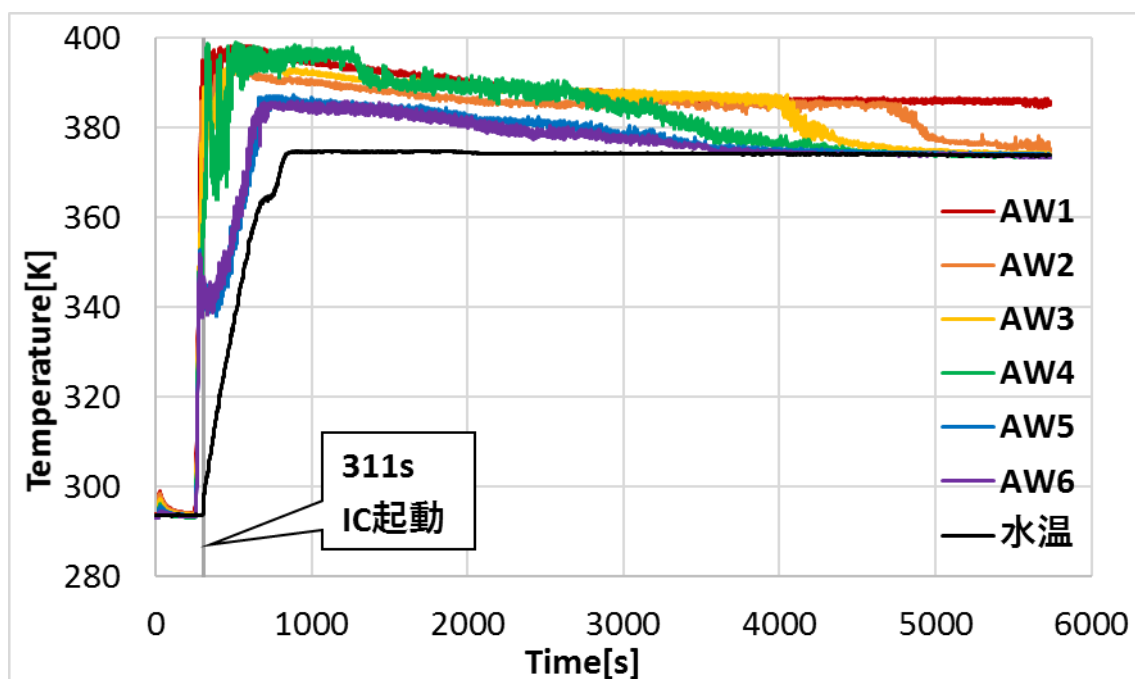


図 2.3.10 外壁面温度(6MPa)

図 2.3.9 から明らかなように,6MPa まで圧力を上げて,蒸気は A5 の位置に到達するまでに全量凝縮している.また,2MPa や 4MPa の場合と比較すると,A2~A4 の位置が蒸気で満たされている時間はより長くなっており,圧力を上げるほど,蒸気が凝縮するまでに時間を要するようになる傾向が見られる.このような傾向が見られるのは,高圧になるほど蒸気流量・流速が大きくなるので,凝縮するまでに到達する距離が長くなるためであると推測する.外壁面の温度に注目すると,2.3.1 で述べたような,凝縮による壁面温度の上昇がここでも見られる.A4 の位置で凝縮が起こっている間は AW4 が高温となり,A3 の位置で凝縮が起こるようになると AW3 が高温になることが図 2.3.10 から見て取れる.

次に,伝熱管内圧力の変化は図 2.3.11,流量の変化は図 2.3.12 のようになった.

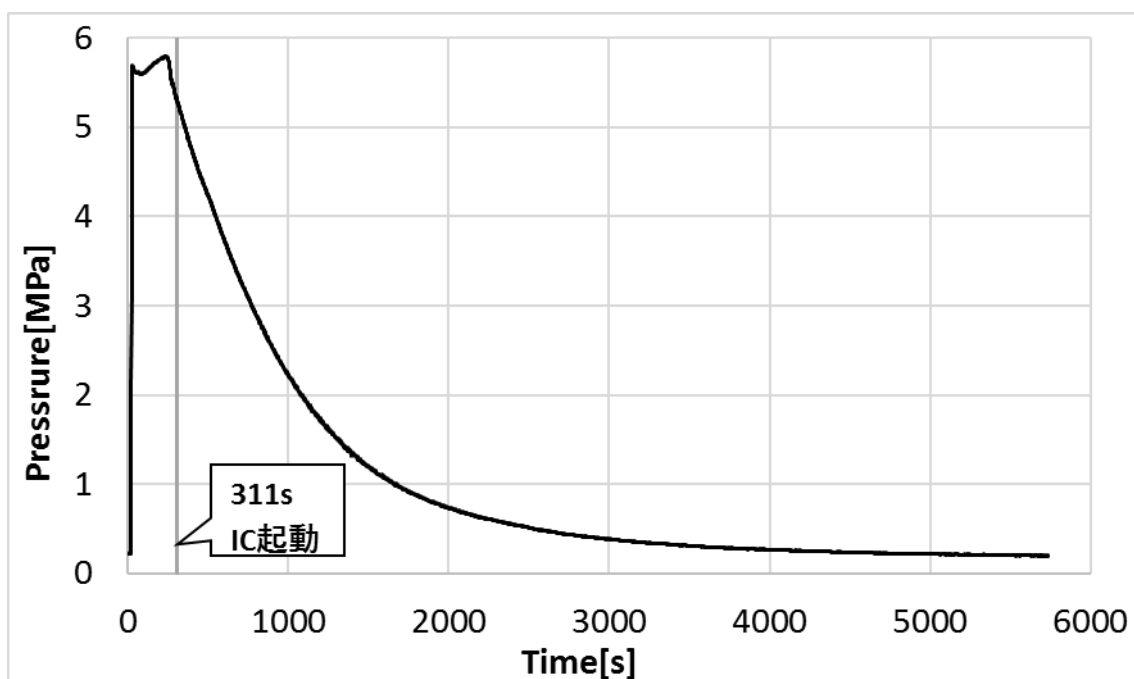


図 2.3.11 伝熱管内圧力(6MPa)

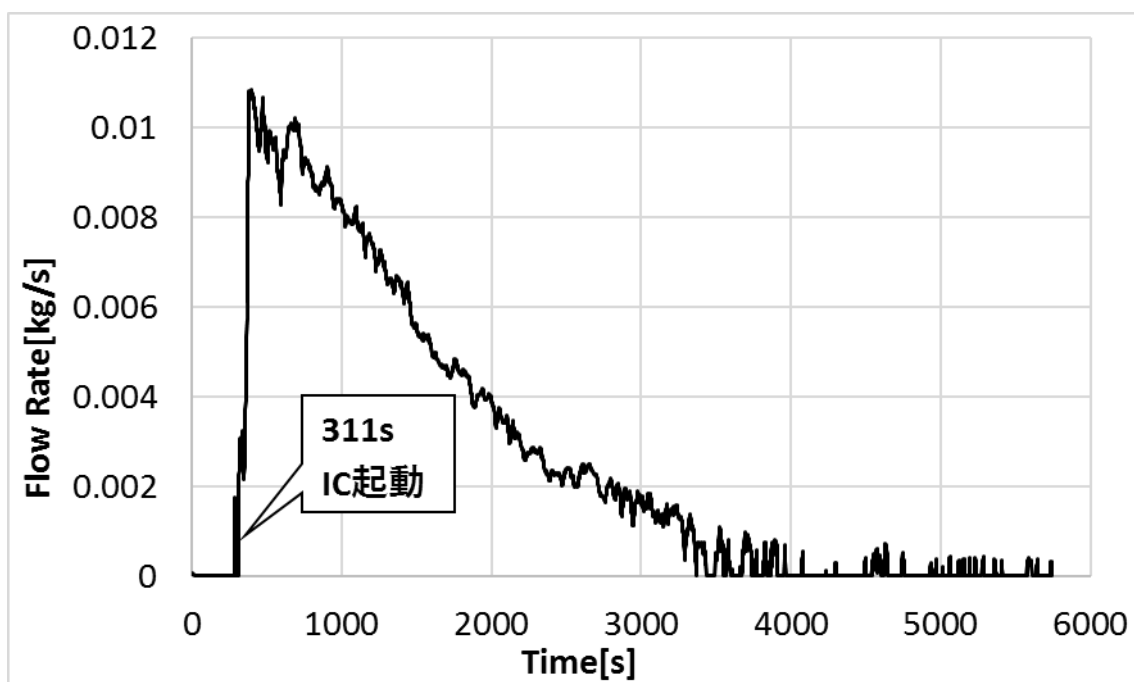


図 2.3.12 伝熱入口の蒸気流量(6MPa)

IC 起動後の圧力,流量の変化は,2MPa や 4MPa での実験と同じような傾向を示しているが,流量には入口弁を開いたことによる変化が見られない.しかし,伝熱管の温度に注目すると,2MPa 実験と同様に,IC が起動する前に一旦温度が上昇しているので,入口弁を開いたことによる蒸気の流入がここでも確認できる.流量の変化は,データの測定周期の 1 秒より短い変

化であったため、記録されなかった可能性がある。

2.3.4 除熱量の評価

実験結果より、伝熱管内の温度・圧力・流量を得ることができ、またどの実験においても A5 の位置までには蒸気の全てが凝縮していることがわかった。これらの結果により、実験装置の除熱量を見積もることができる。実験では伝熱管入口が飽和蒸気、出口が水となっているので、除熱量 Q は以下の式で表される。

$$Q = G(h_{vs} - h_{lc}) \quad (2.2)$$

ここで G は質量流量、 h_{vs} は飽和蒸気のエンタルピー、 h_{lc} は圧縮水のエンタルピーである。各エンタルピーは、実験で得られた温度と圧力をもとに蒸気表 [6]を使用して計算した。2MPa 実験での除熱量を図 2.3.13 に、4MPa 実験での除熱量を図 2.3.14 に、6MPa 実験での除熱量を図 2.3.15 に示す。

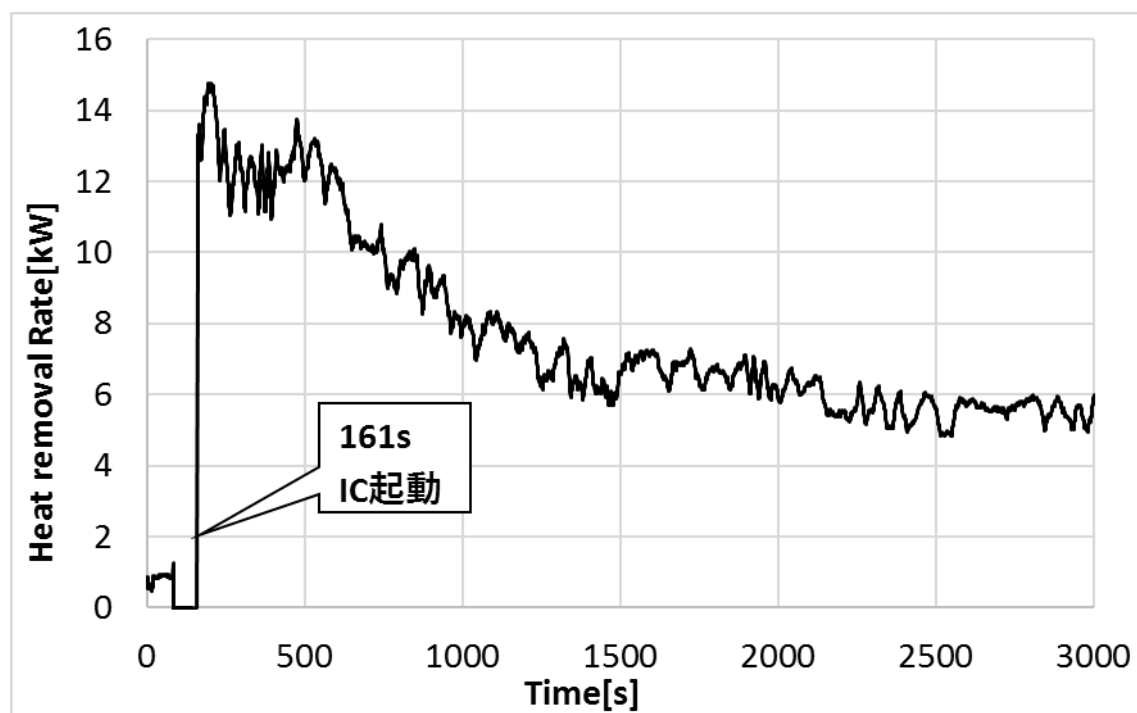


図 2.3.13 除熱量(2MPa)

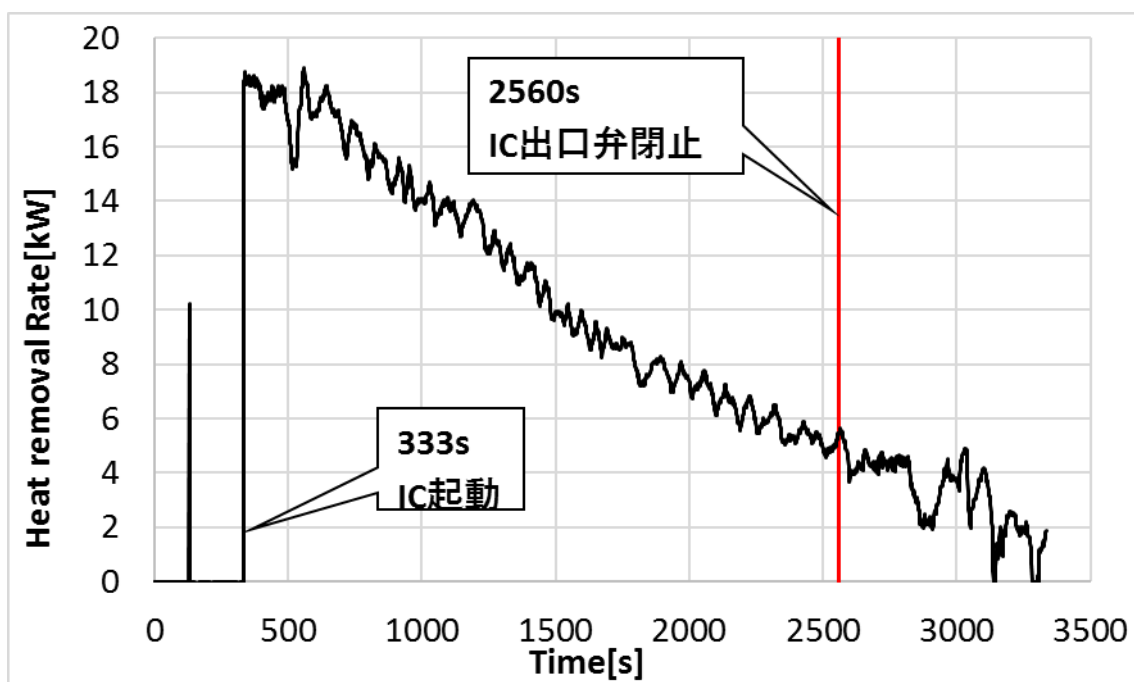


図 2.3.14 除熱量(4MPa)

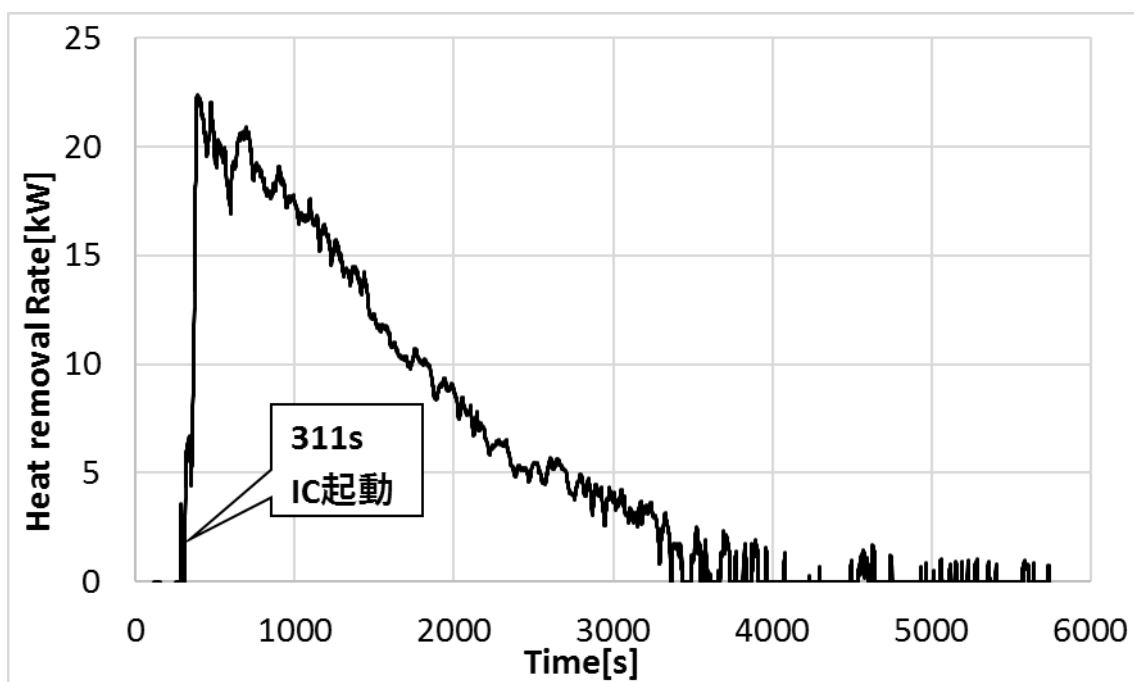


図 2.3.15 除熱量(6MPa)

得られた除熱量を伝熱管入口流量で整理した図を図 2.3.16 に示す.この図では,どの初期圧力に対しても流量と除熱量の関係は同じ比例関係になっている。これより、この実験装置では初期圧力を変化させても除熱量の傾向は変わらないことがわかる。

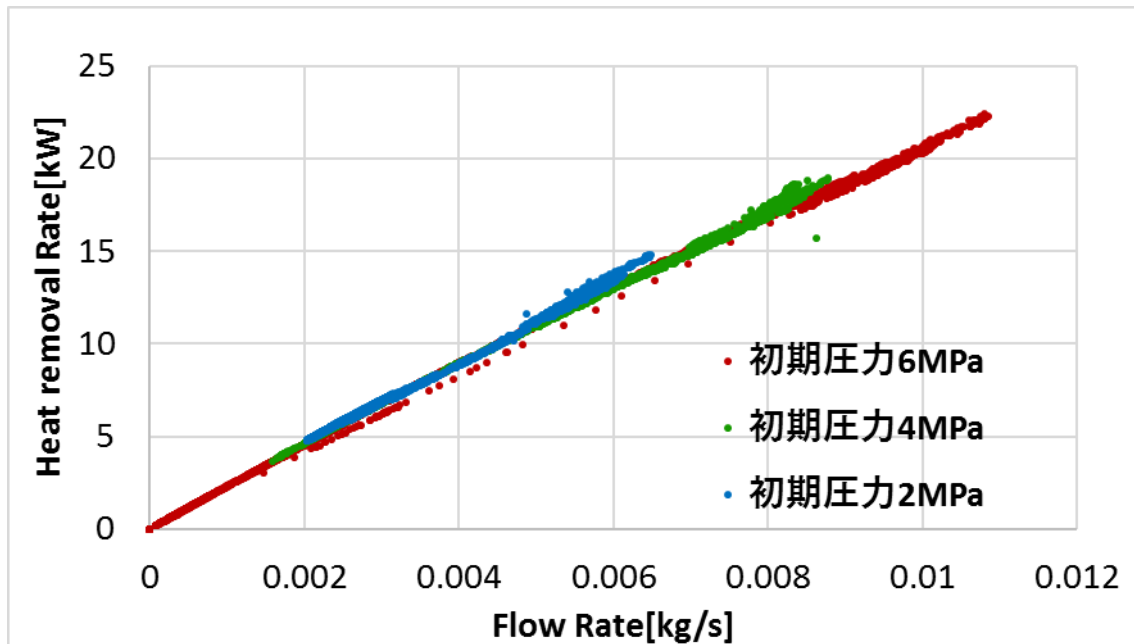


図 2.3.16 除熱量と伝熱管入口流量の関係

2.3.5 IC 模型部の観察

IC 水槽は透明なポリカーボネートで作られているため、内部の様子を観察することができる。実験の一部として、動作中の IC 内部の観察を行った。通常動作中の IC は次のような挙動を示していた。

(1) 入口弁を開いたとき

水槽内部に変化はない。

(2) 出口弁を開いた直後

配管から水が流れる音が聞こえ、IC が起動する。その後、入口側の伝熱管の表面からは小さな気泡が生成するが、すぐに潰れてしまう。また、出口側では気泡は見られない。このとき、冷却水は温度がまだ常温付近であるため、サブクール沸騰の状態にあり、気泡はすぐに凝縮して小さくなる。また、入口側でしか気泡が見られないのは、その部分の蒸気が凝縮熱伝達により、大きな熱流束で冷却水を加熱しているのに対し、出口側は蒸気の凝縮が完了して熱伝達率の低い液体の水となっているためである。このときの水槽の写真を図 2.3.17 に示す。図で白っぽい煙のように見えているものがサブクール沸騰によって生成した微細な気泡である。

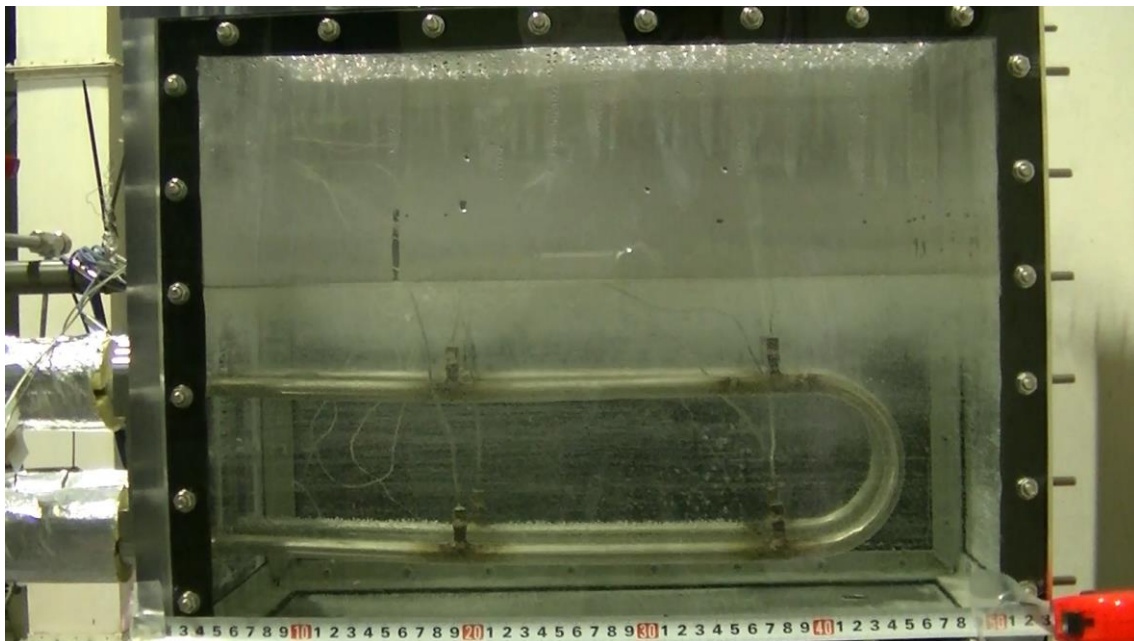


図 2.3.17 初期の IC 水槽の様子

(3) IC 起動より数分後

冷却水の上部に,陽炎のような層状のゆらぎが発生し,徐々に下へ降りていく.冷却水は凝縮熱伝達によって上部から先に加熱されていくので,下部がサブクール状態のまま,上部が100℃に到達した状態となり,2.3.1 でも述べた温度成層によってゆらぎが見えたものと考えられる.図 2.3.18 はこのときの水槽の写真であり,破線のすぐ上のところにゆらぎの面が存在する.

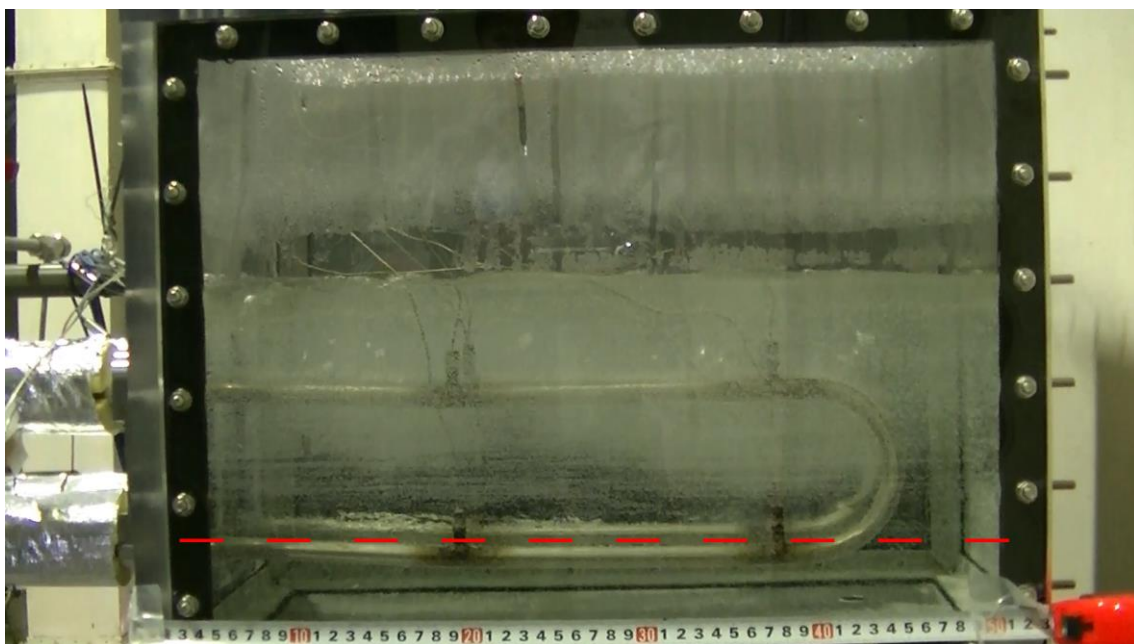


図 2.3.18 温度成層が生じている IC 水槽の様子

(4) ゆらぎが見えなくなった後

伝熱管の全体から、冷却水の激しい沸騰が起こる。このとき、冷却水はすべて 100°C に到達しているため、熱伝達率の低い出口側からも沸騰が起こり、沸騰による気泡は大きく成長する。また、伝熱管内の蒸気は入口側が高い熱伝達率をもっているため、冷却水の沸騰も入口側の方が激しい。このときの IC 水槽は図 2.3.19 のようになっている。



図 2.3.19 沸騰が生じている IC 水槽の様子

(5) 圧力が 1MPa 程度まで減少したとき

流量の減少により、冷却水への加熱量が少なくなり、伝熱管の出口側の周辺から徐々に沸騰が収まっていく。このときの水槽の写真を図 2.3.20 に示す。

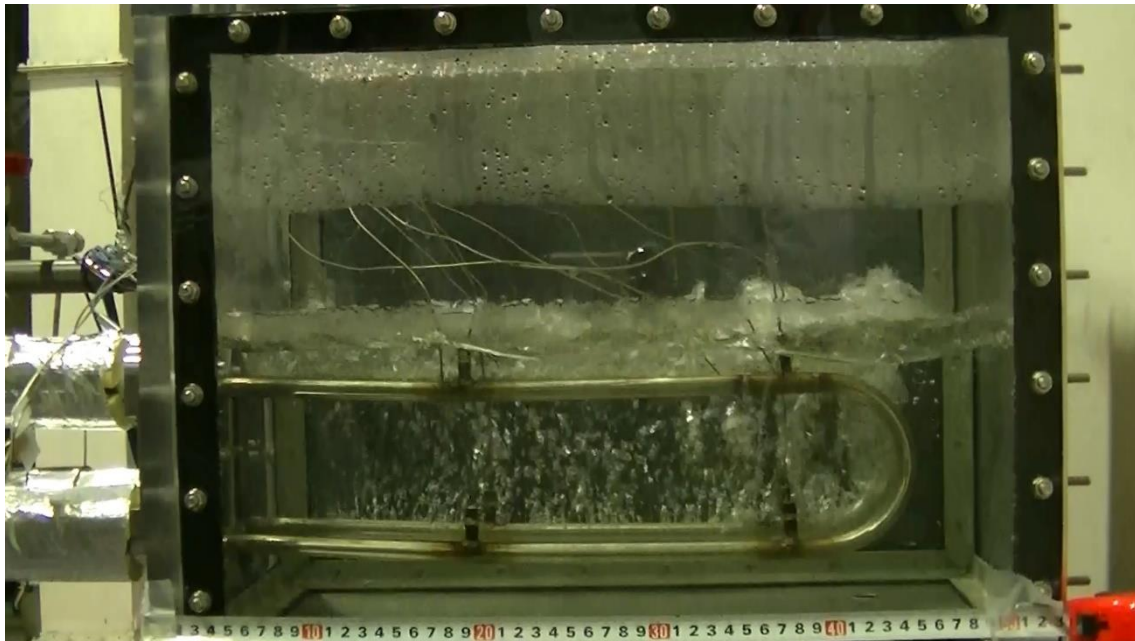


図 2.3.20 流量減少時の IC 水槽の様子

(6) 圧力が 0.5MPa 程度まで減少したとき

出口側の伝熱管の外壁面の温度が 100℃程度まで低下し,出口側の沸騰が止まる.沸騰は入口側のみとなり,圧力の低下が進むにつれて沸騰領域が狭くなっていく.

2.3.6 非凝縮性ガスの影響についての検討

福島第一原発 1 号機では,IC の弁を開いたにも関わらず,冷却水の蒸発が確認できないという事象が発生した.これは炉心で発生した非凝縮性ガスである水素が伝熱管内に侵入し,凝縮熱伝達を阻害したためであると推測される.また,実験装置でも圧力の調整のためにアキュムレータにプランジャーポンプで注水を行ったところ,IC が起動しなくなったというケースが確認された.注水された水は水道水であるため,水道水中に溶けている空気が IC に悪影響を及ぼした可能性がある.そこで,実験装置での IC に対する非凝縮性ガスの影響について検討するため,次のような実験を行った.

●プランジャーポンプの影響を確認する実験

- (1) 入口弁が開,出口弁が閉の状態とした.
- (2) アキュムレータを加圧し,圧力を 1.3MPa まで上げた.
- (3) プランジャーポンプで注水を行い,圧力を 1.15MPa まで下げた.
- (4) 出口弁を開いた.

この実験では,出口弁を開いても冷却水への加熱が起こらず,IC が起動することはなかった.

●アキュムレータおよび伝熱管内に空気を含ませる実験

- (1) IC の入口弁を開き,アキュムレータとつながっている状態とした.

- (2) アキュムレータを大気圧まで減圧し,内部に空気を導入した.
- (3) アキュムレータを隔離し,ブローをせず 2MPa になるまで加圧した.
- (4) IC 出口弁を開いて IC を起動させた.

この実験では,IC は問題なく起動した.その後,注水による実験装置への影響を検討するため,次のような操作を行った.

- (1) 出口弁を閉じた.
- (2) アキュムレータを 2MPa まで加圧してから,プランジャーポンプで 1 分間注水した.
- (3) 出口弁を開いた.

この操作の結果,注水を行ったにも関わらず IC は起動した.その後,圧力が十分低下するまで IC の運転を継続したところ,冷却水の沸騰領域が通常時の 2MPa 実験と比較して明らかに狭くなっていた.図 2.3.21 は空気を含ませない 2MPa 実験において最も冷却水の沸騰が激しくなった瞬間(IC 起動より 964 秒後)の写真であり,図 2.3.22 は上記の空気を含ませた 2MPa 実験において IC 起動から 964 秒が経過したときの写真である.これより,空気存在によって冷却水への除熱量が大きく低下していることが確認できる.しかし,プランジャーポンプでは再現性が悪く,非凝縮性ガスの影響に対する定量的な評価も不可能であるため,伝熱管内に直接非凝縮性ガスを注入し,その影響を定量的に評価できるようにすることが今後の課題となる.

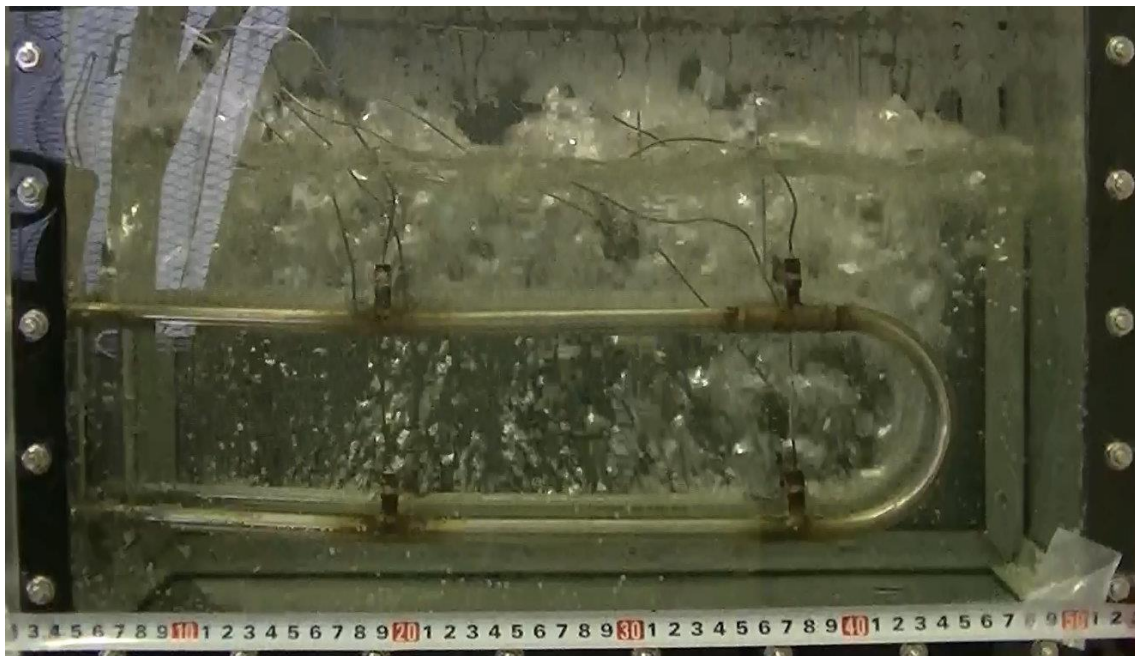


図 2.3.21 2MPa 実験における起動より 964 秒後の IC の様子(空気なし)

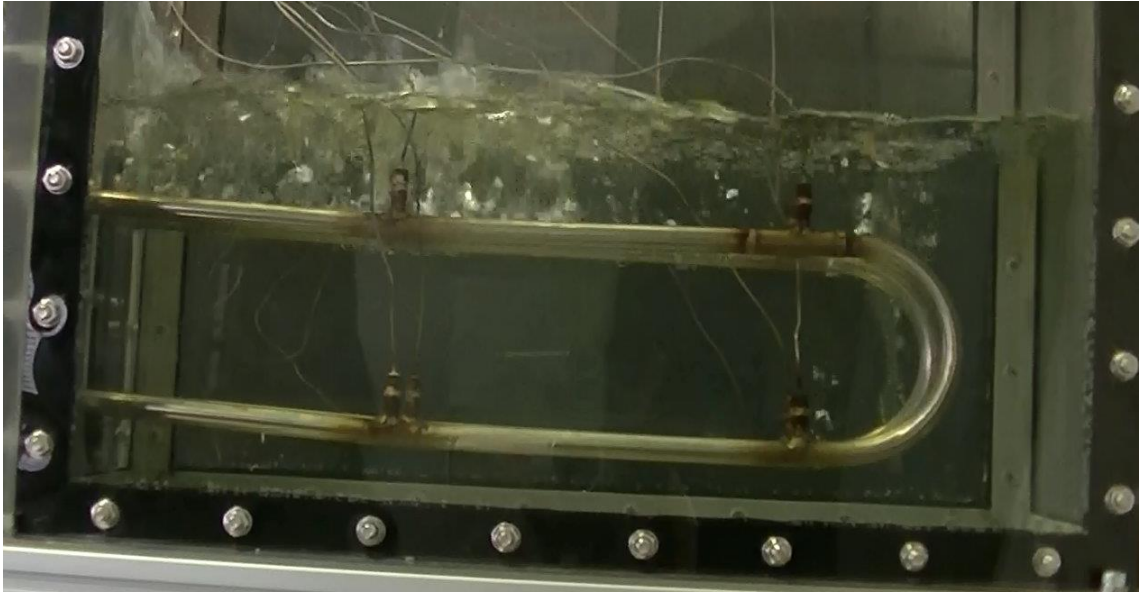


図 2.3.22 2MPa 実験における起動より 964 秒後の IC の様子(空気あり)

第3章 解析

3.1 TRAC-BF1 コードについて

TRAC-BF1 は,米国原子力規制委員会 (NRC) の予算の下に,米国アイダホ国立工学研究所 (INEL) (現 INEEL)で開発された,は商用 BWR を解析対象としている熱水力学解析コードである.

以下にコードの特徴について述べる.

- ・気液二相流の解析には二流体モデルが採用されている
- ・数値解法は SETS 法 (Stability Enhancing Two-Step Method) による.SETS 法ではゆっくりとした過渡変化を解析する場合,クーラン限界を超えるタイムステップサイズでも安定した計算を行うことができる.
- ・構成方程式部分のコーディングはモジュール化されている.従って容易にプログラムを変更でき,種々の構成方程式を検証するために活用できる.
- ・流体の物性値を計算する部分はモジュール化されている.標準として,水-水蒸気系または水-空気系に対する物性値計算が組み込まれているが,それ以外の流体に対する解析にも物性値計算ルーチンを差し替えることで使用可能である.

数値解法

TRAC では体系をセルごとにわけ,流動解析の基礎方程式と構成方程式は差分方によって解かれる.TRAC では, J. Mahaffy によって提唱された SETS 法を基本としている.SETS 法とは,移流項を陰的に扱うことによってクーラン条件による制約を緩め,なおかつ計算量を少なくするため方程式の各項の陰的扱いを最小とした二段階解法である.圧力・密度を含む項を陰的に扱う基本差分式と移流項を陰的に扱う安定化差分式の二段階としている.また,摩擦項や熱伝達項などについても適宜陰的に扱っている.TRAC コードでは,SETS 法の変形として解法を

- ①運動方程式の安定差分式を解く
- ②連続の式, 運動方程式並びにエネルギー式の基本差分式を解く
- ③連続の式とエネルギー式の安定差分式を解く

の様に 3 ステップに分けている.以下に TRAC で使用されている基礎方程式(1 次元)を以下に示す.

液相に対する連続の式

$$\frac{\partial(1-\alpha)\rho_l}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(1-\alpha)\rho_l V_l] = -\Gamma \quad (3.1)$$

気相に対する連続の式

$$\frac{\partial(\alpha\rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[\alpha\rho_g V_g] = \Gamma \quad (3.2)$$

液相に対する運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_l}{\partial t} + V_l \frac{\partial V_l}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_l} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{C_i}{(1-\alpha)\rho_l} (V_g - V_l) |V_g - V_l| \\ & - \frac{\Gamma^-}{(1-\alpha)\rho_l} (V_g - V_l) - \frac{C_{wl}}{(1-\alpha)\rho_l} V_l |V_l| - g \cos \theta \end{aligned} \quad (3.3)$$

気相に対する運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_g}{\partial t} + V_g \frac{\partial V_g}{\partial x} = & -\frac{1}{\rho_g} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{C_i}{\alpha\rho_g} (V_g - V_l) |V_g - V_l| \\ & - \frac{\Gamma}{\partial\rho_g} (V_g - V_l) - \frac{C_{wg}}{\alpha\rho_g} V_g |V_{gl}| - g \cos \theta \end{aligned} \quad (3.4)$$

エネルギー式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(1-\alpha)\rho_l e_l + \alpha\rho_g e_g] + \frac{\partial}{\partial x} [(1-\alpha)\rho_l e_l V_l + \alpha\rho_g e_g V_g] \\ = -P \frac{\partial}{\partial x} [(1-\alpha)V_l + \alpha V_g] + q_{wl} + q_{wg} \end{aligned} \quad (3.5)$$

また,これらの式に使われている文字の定義は表 3.1.1 に示す通りである.

表 3.1.1 TRAC の基礎式に使用されている文字の定義

C_i	気液界面せん断力係数[kg/m ⁴]	t	時間[s]
C_{wg}	壁面せん断力係数(気相) [kg/m ⁴]	V_g	気相流速[m/s]
C_{wl}	壁面せん断力係数(液相)[kg/m ⁴]	V_l	液相流速[m/s]
e_g	気相エネルギー[J]	x	距離[m]
e_l	液相エネルギー[J]	α	ボイド率
g	重力加速度[m/s ²]	Γ	気液界面での蒸発率[kg/(m ³ ・s)]
P	圧力[Pa]	θ	セルの方向と鉛直上向きの方角のなす角度[rad]
q_{wg}	気相への加熱量[J/(m ³ ・s)]	ρ_g	気相密度[kg/m ³]
q_{wl}	液相への加熱量[J/(m ³ ・s)]	ρ_l	液相密度[kg/m ³]

3.2 TRAC-BF1 で使用されている凝縮熱伝達モデルについて

IC 伝熱管内部のように飽和蒸気が冷たい壁面に接する状況では,壁面で冷やされた蒸気が凝縮し,液膜となって壁面を覆う膜状凝縮という現象が起こる.そのため,IC を TRAC-BF1 などの解析コードで解析するときは,この膜状凝縮による凝縮熱伝達が正しく計算できるかどうか重要となる.IC 伝熱管内での膜状凝縮熱伝達は,次の 2 つのプロセスに分けて考えることができる.

- (1) 蒸気と液膜の気液界面での熱伝達
- (2) 液膜から伝熱管内壁面への熱伝達

まず(1)の気液界面熱伝達についてであるが,TRAC-BF1 では表 3.2.1 に示す実験から得られた相関式を熱伝達率などの計算に使用している.これを見ると,気液界面の伝熱計算に使用されている相関式は大気圧付近での圧力で実施された実験に基づいていることがわかる.

表 3.2.1 TRAC の気液界面伝熱計算に使用されている相関式について [7]

Data Description	Lee-Ryley	Cook et al.
Test apparatus	Horizontal glass fiber in a horizontal duct	Vertical rectangular channel
Dimensions:		
Cross section (m)	0.025 x 0.025	0.381 x 0.038
Length (m)	0.229	-
Height (m)	-	0.965
Droplet diameter (μm)	230 - 1126	-
Droplet Reynolds number	64 - 250	-
Pressure (Mpa)	0.1 - 0.2	Slightly above atmospheric
Steam superheat ($^{\circ}\text{C}$)	2.8 - 33.9	-
Inlet steam velocity (m/s)	2.68 - 11.95	-
Inlet mass flow rate (kg/s)		
Water	-	0.8 - 1.78
Steam	-	0.066 - 0.104
Inlet temperature ($^{\circ}\text{C}$)		
Water	-	73 - 94
Steam	-	130 - 141

次に(2)の液膜から内壁面への伝熱計算については,水平円管外面上の膜状凝縮に対する Nusselt の近似解を使用して熱伝達率の計算が行われている [7].水平円管外面上の膜状凝縮では,図 3.2.1 のように,冷たい水平円管のまわりに蒸気が存在し,円管表面に凝縮液膜と蒸気境界相が生成する条件を考える.

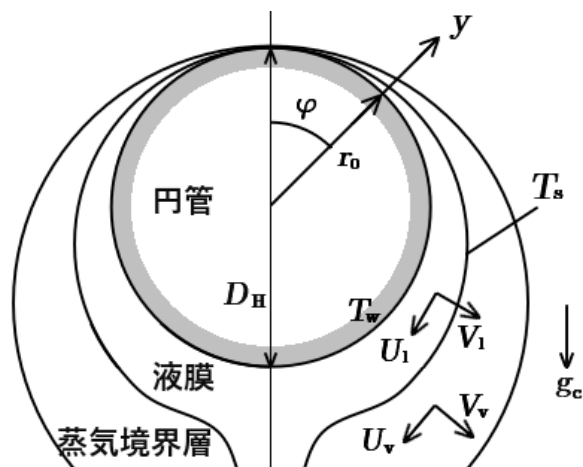


図 3.2.1 水平円管外面上の膜状凝縮

このとき,凝縮液膜についての質量,運動量および熱エネルギーの保存の式はそれぞれ次のように表される.ここに,以下に示す仮定

- (1) 凝縮液膜の慣性項は無視できる.
- (2) 凝縮液膜の対流項は無視できる.
- (3) 伝熱面は静止蒸気中に置かれており,気液界面におけるせん断力は無視できる.
- (4) 凝縮液の密度に対して蒸気の密度は無視できる.
- (5) 伝熱面温度は一様である.

を導入して,基礎式を考えると,凝縮液膜については以下のようなになる [8].

$$\nu_l \frac{\partial^2 U_l}{\partial y^2} + g_c \sin \varphi - \frac{1}{\rho_l r_0} \frac{dp}{d\varphi} = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial^2 T_l}{\partial y^2} = 0 \quad (3.7)$$

また,蒸気境界層についての質量および運動量の保存式は以下のようなになる.

$$\frac{\partial U_v}{r_0 \partial \varphi} + \frac{\partial V_v}{\partial y} = 0 \quad (3.8)$$

$$U_v \frac{\partial U_v}{r_0 \partial \varphi} + V_v \frac{\partial U_v}{\partial y} = \nu_v \frac{\partial^2 U_v}{\partial y^2} - \frac{1}{\rho_v r_0} \frac{dp}{d\varphi} \quad (3.9)$$

以上の式を,解析的に解いたものが Nusselt の近似解であり,熱伝達率は次のようになる.

$$H_l = 0.725 \left[\frac{\rho_l^2 g_c h_{fg} K_l^3}{\mu_l D_H (T_s - T_w)} \right]^{1/4} \quad (3.10)$$

TRAC-BF1 では,この熱伝達率を液膜と壁面の間の熱伝達率としている.これらの式に使われている文字の定義はに示す通りである.

表 3.2.2 熱伝達率計算に使用されている文字の定義

D_H	円管の外径[m]	U_l	液相周方向速度[m/s]
g_c	重力加速度[m/s ²]	U_v	気相周方向速度[m/s]
h_{fg}	蒸発潜熱[kJ/kg]	V_l	液相径方向速度[m/s]
K_l	熱伝導率[W/m・K]	V_v	気相径方向速度[m/s]
p	圧力[Pa]	y	円管中心からの距離[m]
r_0	円管の半径[m]	μ_l	粘性係数[Pa・s]
T_l	液相温度[K]	ν_l	動粘性係数[m ² /s]
T_s	液膜表面温度[K]	ρ_l	液相密度[kg/m ³]
T_v	気相温度[K]	ρ_v	気相密度[kg/m ³]
T_w	円管壁面温度[K]	φ	角度[rad]

3.3 解析体系・解析条件

3.3.1 解析体系の概要

解析を行うにあたって,実験装置を再現した図 3.3.1 のような解析体系を作製した.この解析体系は pipe,fill,break の3種のコンポーネントによって構成されている.伝熱管には pipe コンポーネントを利用し,pipe31 とした.pipe コンポーネントは文字通り配管を再現した1次元のコンポーネントで,他種のコンポーネント間をつなぐほか,伝熱管としても使用できる.今回は水槽を模した pipe コンポーネント(pipe66)を別に用意し,伝熱管の pipe の外壁から水槽の pipe へ熱輸送の計算をさせることで,IC の熱伝達を模擬した.また,実物の実験装置には水槽の外にも配管があるので,その部分は別のコンポーネント(pipe21,pipe22)として pipe31 に接続した.fill と break は境界条件を定めるコンポーネントで,fill は流量条件,break は圧力条件を与える.入口は fill11 とし,出口は break51 とした.また,水槽にも境界条件が必要となる.そこで水槽の下側に流量 0 の fill64,上側に大気圧に設定した break65 を配置することで実験装置を再現した.解析時間は,実験データの流量測定値が正しく測定されている(0 や負の値でない)間とした.

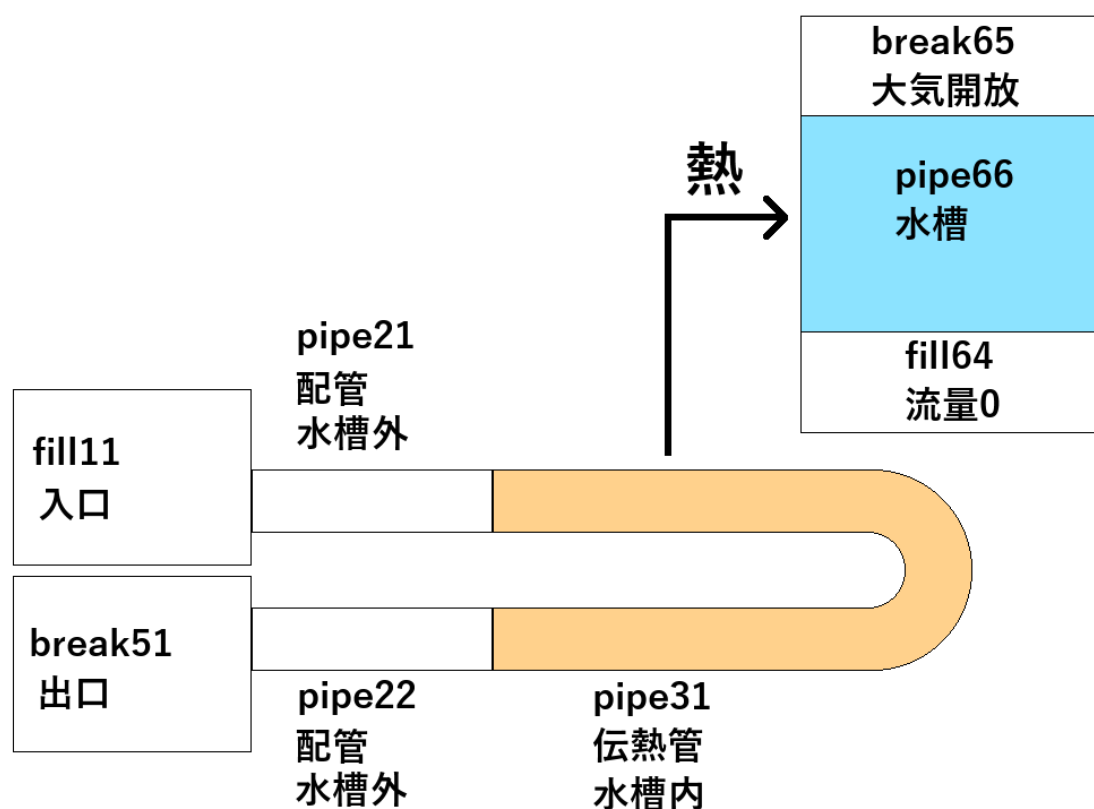


図 3.3.1 解析体系の概要

3.3.2 境界条件・解析体系の詳細について

表 3.3.1 と表 3.3.2 に,境界条件をまとめたものを示す.

表 3.3.1 入口境界条件

ボイド率	0.999
気相・液相流速	流量の実験値を使用
圧力	伝熱管内圧力の実験値を使用
気相・液相温度	温度 A1 の実験値を使用

表 3.3.2 出口境界条件

ボイド率	0.0
圧力	伝熱管内圧力の実験値を使用
液相温度	温度 A6 の実験値を使用
気相温度	圧力に対する飽和温度に設定

以下,解析体系について詳しく説明する.まず,伝熱管の pipe31 には実験装置と同じ厚みと内径,水力直径を与え,長さとし熱電対の測定点の位置が実物と一致するように図 3.3.2 のように 26 個のセルに区切った.なお,TRAC では温度はセルの中心点に定義されている.解析体系では曲がり部分は直角となっているが,その部分に対応するセル 12 とセル 17 には曲がり管の圧力損失を表すワイスバッハの式

$$\Delta P = \left(\zeta + \frac{\lambda l}{d} \right) \frac{\rho q^2}{2}, \quad (3.11)$$

$$\zeta = \left[0.131 + 0.1632 \left(\frac{d}{r} \right)^{3.5} \right] \frac{\theta}{90} \quad (3.12)$$

に従い管路抵抗として $\zeta + \frac{\lambda l}{d} = 0.8184$ を与えた.この式で d は管の内径, r は曲がり部の曲率半径, θ は曲がり部の角度である.

管内の初期圧力は実験結果より IC が起動した直後の圧力を入力し,管内と壁面の初期温度は IC 起動直後の対応する位置の温度測定値を入力した.さらに,伝熱の設定として,実物の IC の配置を考慮し,1~11 セル目までは pipe66 のセル 4 に,12~15 セル目までは pipe66 のセル 3 に,16~26 セル目までは pipe66 のセル 2 に熱を送るように,それぞれ設定した.管内の初期ボイド率は,IC 起動前の伝熱管は水で満たされていると仮定し,0.0 とした.

pipe21,pipe22 については pipe31 と同じ断面形状となるようにし,初期温度,圧力,ボイド率も pipe31 と同様に設定した.この部分は実物において水槽の外の部分に対応するため,外部との熱伝達を行わない設定とした.

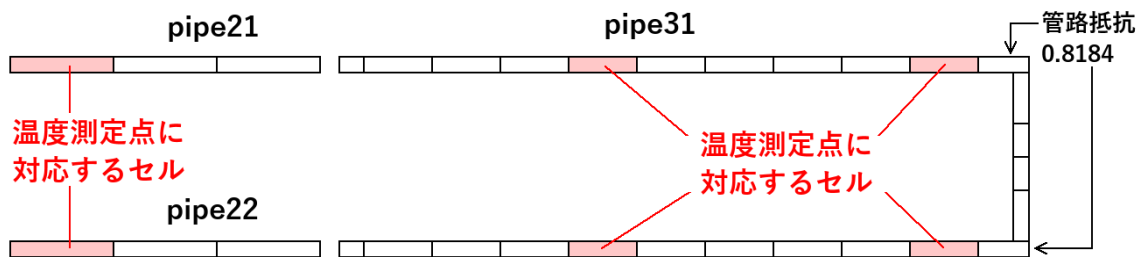


図 3.3.2 伝熱管部のノーディング

水槽に対応する pipe66 は,内容積が実物の水槽と等しくなるように設定した.実物の水槽は直方体で,水平に切った断面積は 0.15717m^2 ,高さは 0.385m である.pipe コンポーネントは円管として扱われるため,実物と断面積が等しくなるように半径を 0.2237m に設定し,高さ方向は実物と同じ長さとした.これにより,水槽の容積は実物の水槽と等しくなる.初期温度は一律に 300K ,初期圧力は大気圧(0.1MPa)とし,初期ボイド率は下から実験前の水面に対応するセルまで 0.0 ,それ以外を 1.0 とした.伝熱については,pipe31 で指定したセルとの間で熱のやりとりが行われるが,実物では伝熱管外壁と冷却水が熱伝達するのに対し,TRAC では伝熱管から,水槽の外壁を介して冷却水に熱が伝わるという違いがある.そこで,その誤差を小さくするため,pipe66 の壁面の厚さは 0.000001m と非常に薄く設定した.pipe66 のノーディングと伝熱の設定を図 3.3.3 に示す.

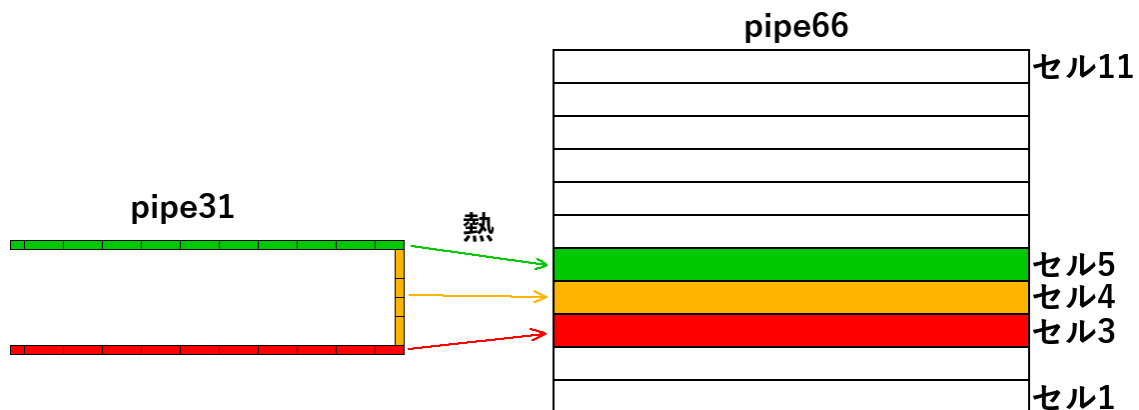


図 3.3.3 pipe66 とそれに対する伝熱の設定

fill コンポーネントと break コンポーネントには境界条件として時系列データを入力することができる.入口の境界条件を決定する fill11 には,実験で得られた伝熱管内圧力と,A1 の熱電対の温度の時系列データを,表 3.3.3 の例に示すように 100 秒ごとに区切って入力した.fill11 のボイド率は,飽和蒸気が流入する条件を考えれば本来は 1.0 であるが, 1.0 とすると液相が一切存在しないため,気液界面での熱伝達が起こらなくなり,蒸気が極端に凝縮しにくくなる.そこで,fill11 のボイド率は 1.0 に限りなく近い 0.999 とした.また,このボイド率をもとに,流速は流量が実験値と一致するように設定した.

表 3.3.3 6MPa 実験解析における fill11 温度の入力値

時間(s)	温度(K)	時間(s)	温度(K)
0	543.30	1600	458.75
100	536.10	1700	455.60
200	529.55	1800	452.45
300	522.40	1900	449.25
400	515.25	2000	445.90
500	508.25	2100	443.30
600	501.30	2200	440.60
700	494.75	2300	437.95
800	488.55	2400	431.10
900	483.05	2500	429.20
1000	480.00	2600	427.70
1100	475.80	2700	426.30
1200	472.75	2800	424.85
1300	468.80	2900	423.45
1400	465.55	3000	422.25
1500	462.15		

出口の条件を決定する break51 には,fill11 と同様に,伝熱管内圧力と A6 の温度の時系列データを入力し,ボイド率は 0.0 とした.

水槽の下側に位置する fill64 は,水槽の水が漏れないように塞ぐ役割を持っている.そのため,fill64 の流速(流量)は 0,温度・圧力・ボイド率は pipe66 と同様の数値とした.

水槽の上側に位置する break65 は,水槽内部を大気開放の条件にするためのものである.そのため,break65 の圧力は大気圧(0.1MPa)とし,温度は 300K,ボイド率は 1.0 とした.

3.4 解析結果

3.4.1 相関式に変更を加えない場合

まず,凝縮熱伝達の相関式には変更を加えずに,実験解析を行った.流量および圧力は実験値と合わせているので,伝熱管内温度の比較を行う.2MPa での解析結果は図 3.4.1,4MPa は図 3.4.2,6MPa は図 3.4.3 のようになった.なお,解析では気相温度と液相温度の両方が出力されるが,ここではボイド率 α を利用して

$$T = \alpha T_v + (1 - \alpha) T_l \quad (3.13)$$

のようにセルの中の体積平均の温度を求め,解析結果とした.

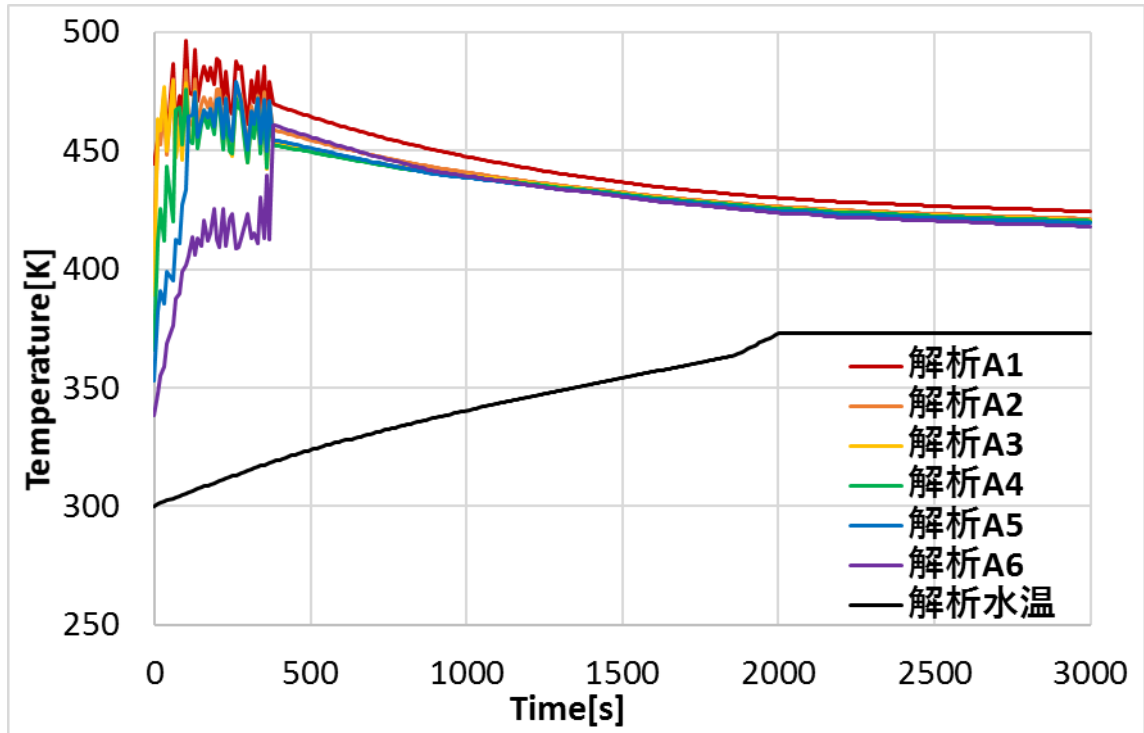


図 3.4.1 温度解析結果(2MPa)

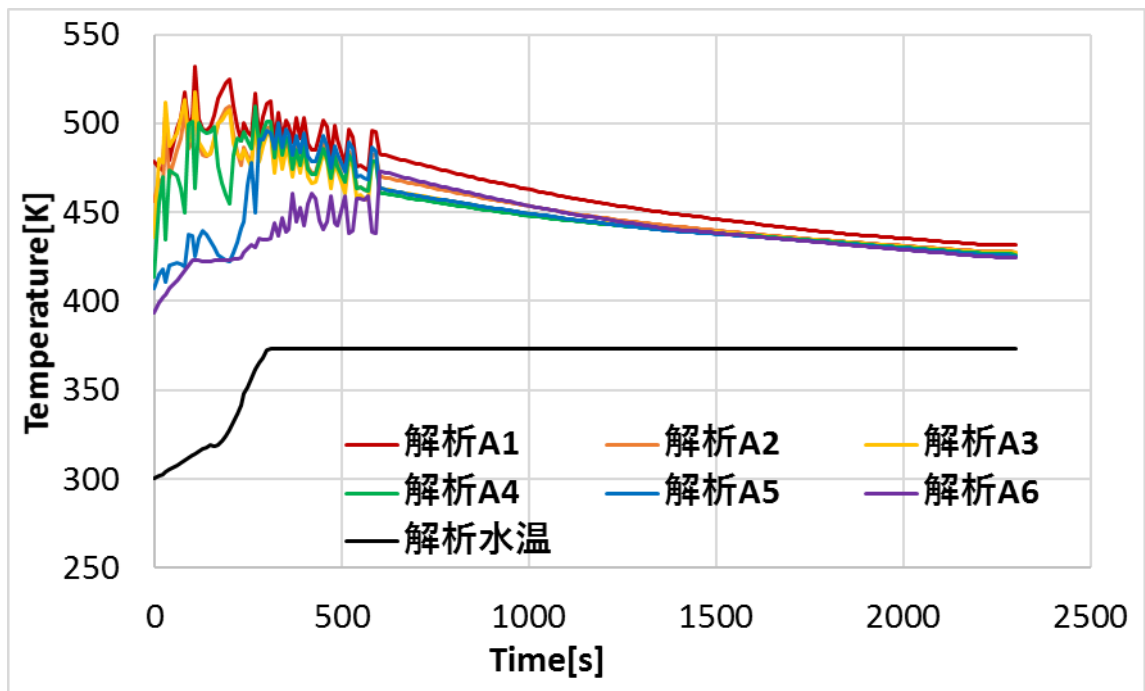


図 3.4.2 温度解析結果(4MPa)

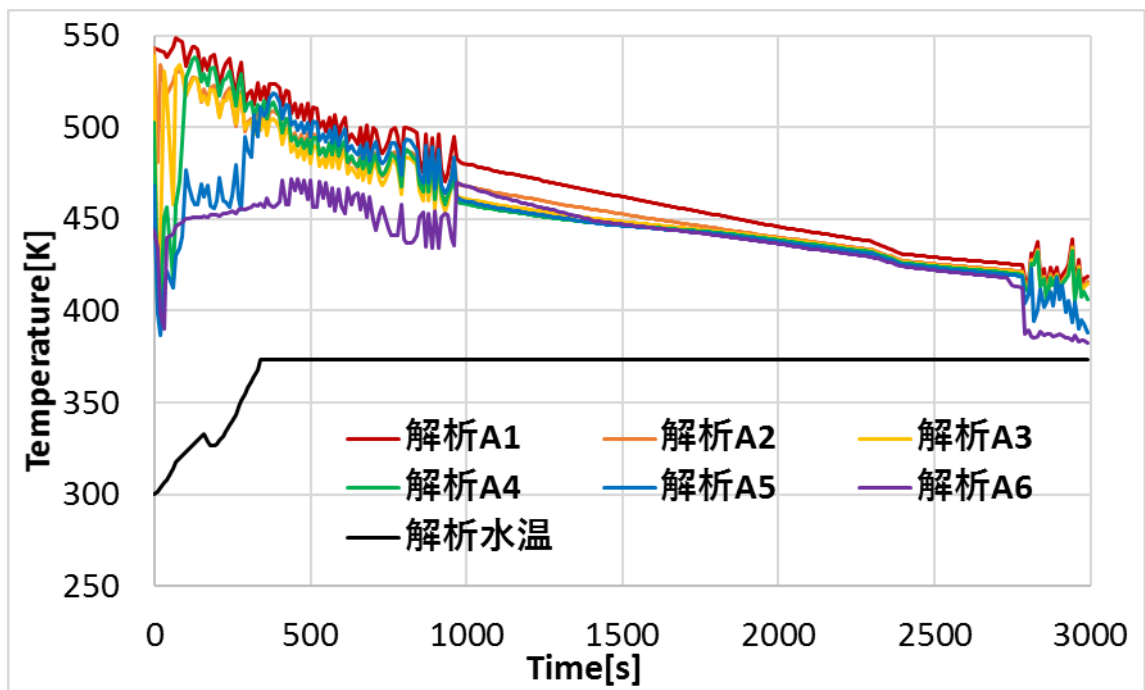


図 3.4.3 温度解析結果(6MPa)

この結果のうち,A1,A4,A6,水温を実験結果と比較した図を,2MPa のものを図 3.4.4,4MPa のものを図 3.4.5,6MPa のものを図 3.4.6 に示す.

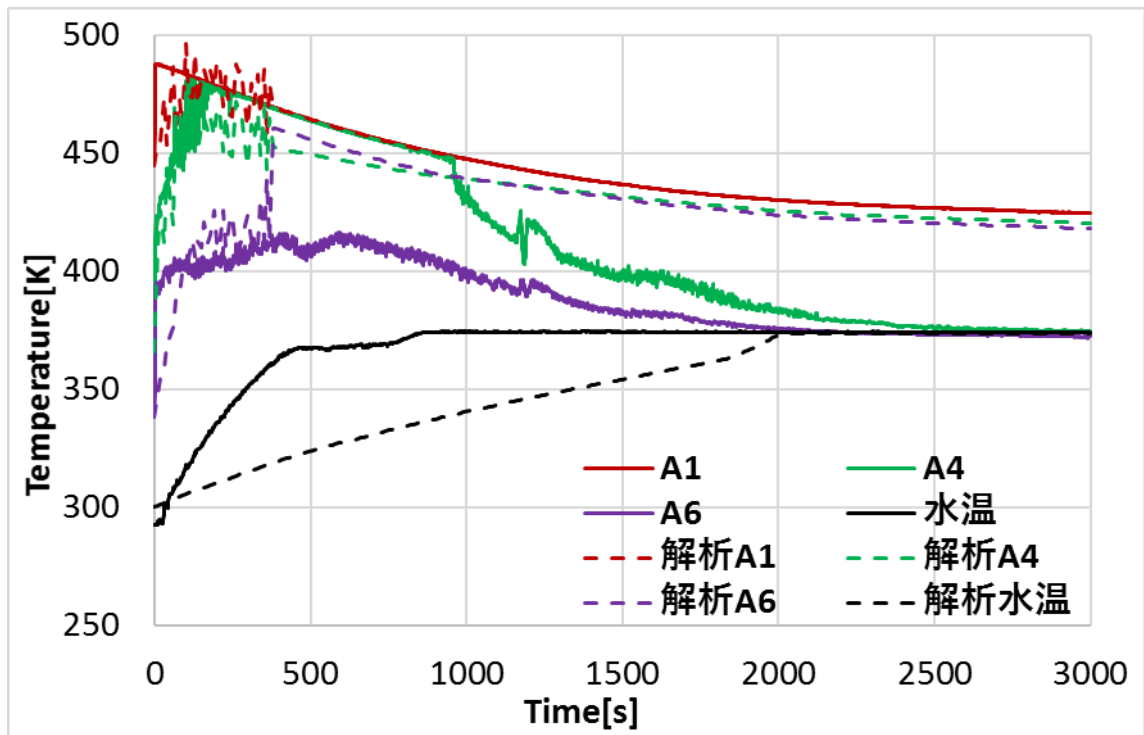


図 3.4.4 実験結果との比較(2MPa)

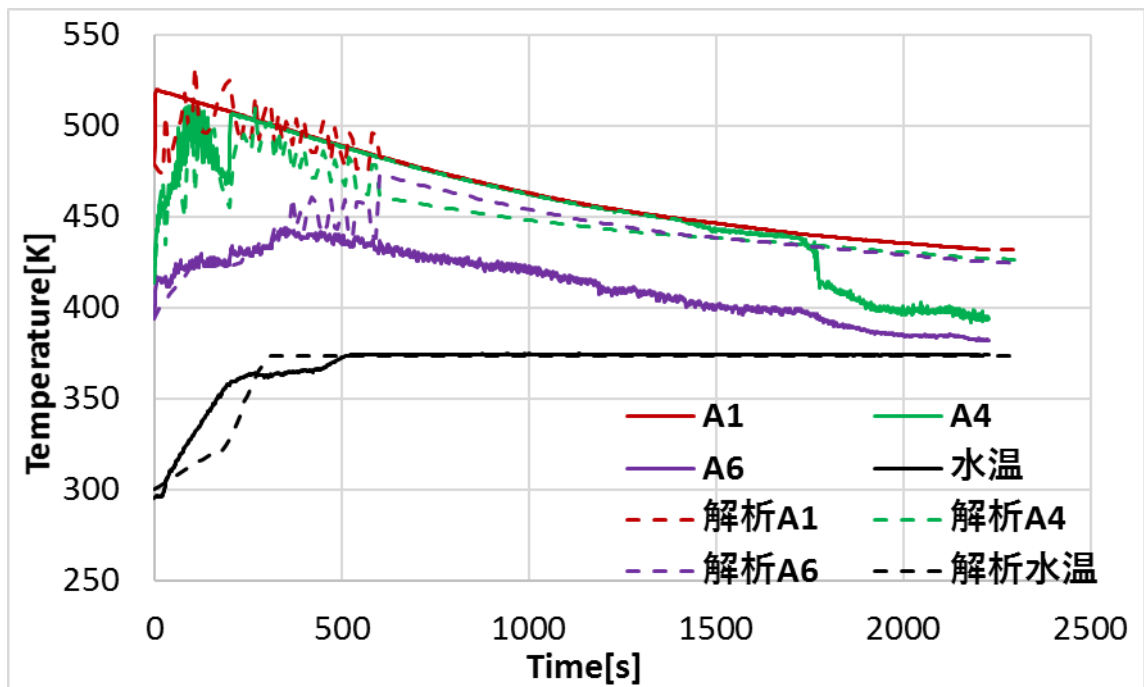


図 3.4.5 実験結果との比較(4MPa)

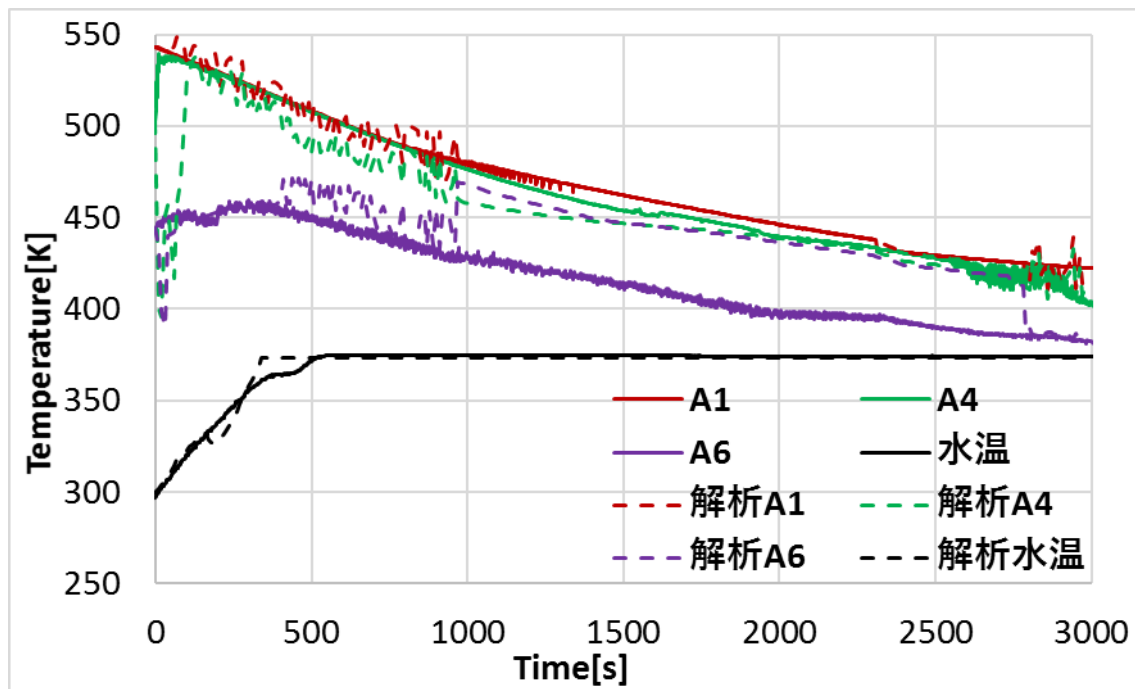


図 3.4.6 実験結果との比較(6MPa)

この解析結果を見ると、2MPa と 4MPa の場合には、A4 の位置で途中から凝縮が起こって温度が下がる変化が再現されていない。また、どの圧力の解析結果においても、A6 の温度が A1 の温度に近い温度となっている部分がある。これはそのときの A6 の位置が気相になっている、つまり蒸気が伝熱管内で凝縮しきらずに流出しているということを意味しており、実験と異なる結果となっている。また、2MPa の結果に注目すると、水温の上昇が実験に比べて非常に鈍くなっている。これは蒸気が凝縮せずに流出したことで、本来水に伝わるはずの蒸発潜熱ぶんのエネルギーが流出したために水への加熱量が少なかったためであると説明できる。以上の結果より、標準の TRAC-BF1 で用いられている凝縮熱伝達の相関式では、2～6MPa における IC 内の凝縮熱伝達を正しく再現できないことがわかる。

次に、除熱量の解析結果を、実験での除熱量と比較した図を図 3.4.7～図 3.4.9 に示す。

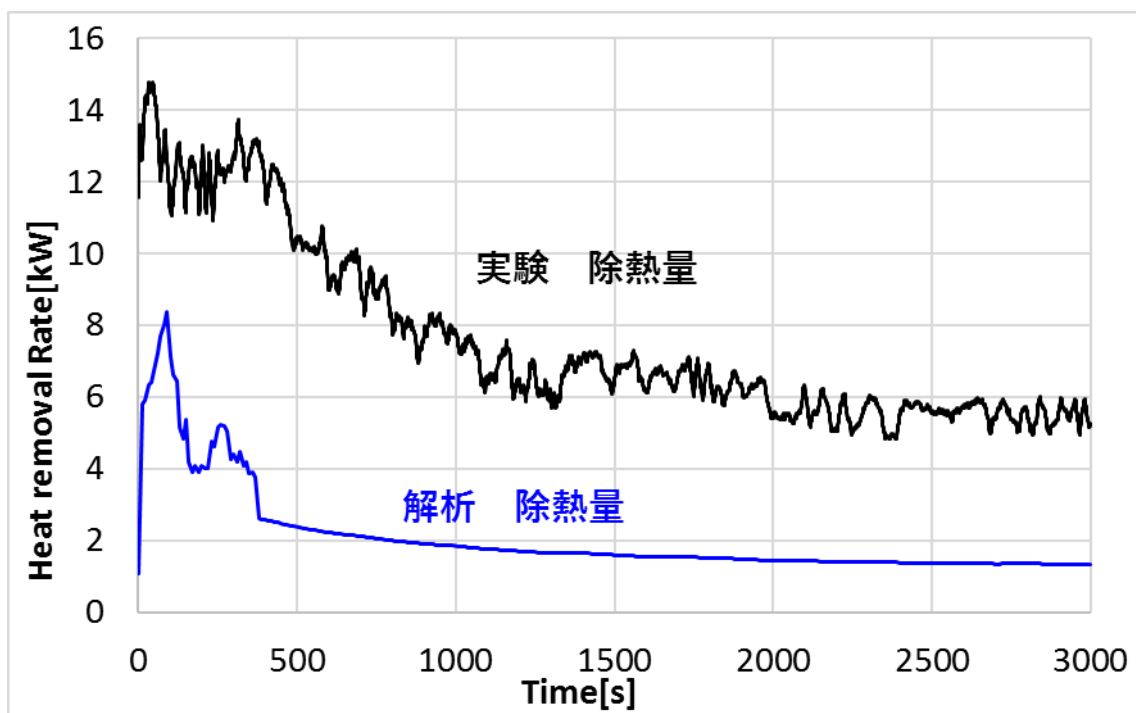


図 3.4.7 除熱量の比較(2MPa)

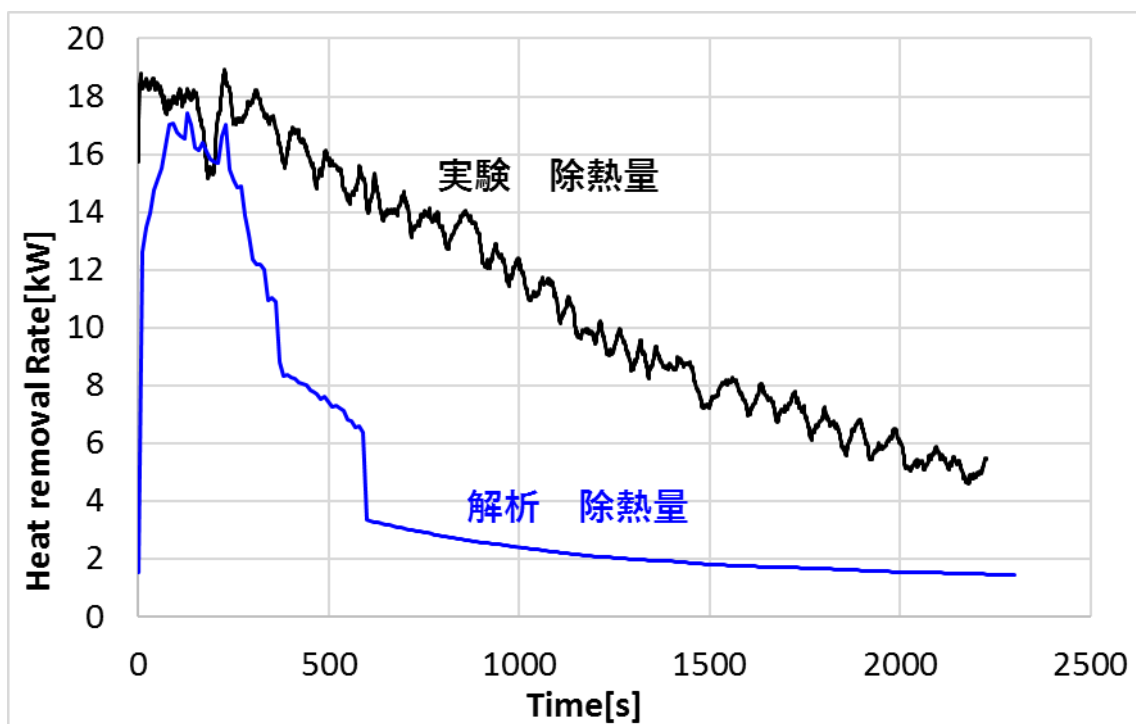


図 3.4.8 除熱量の比較(4MPa)

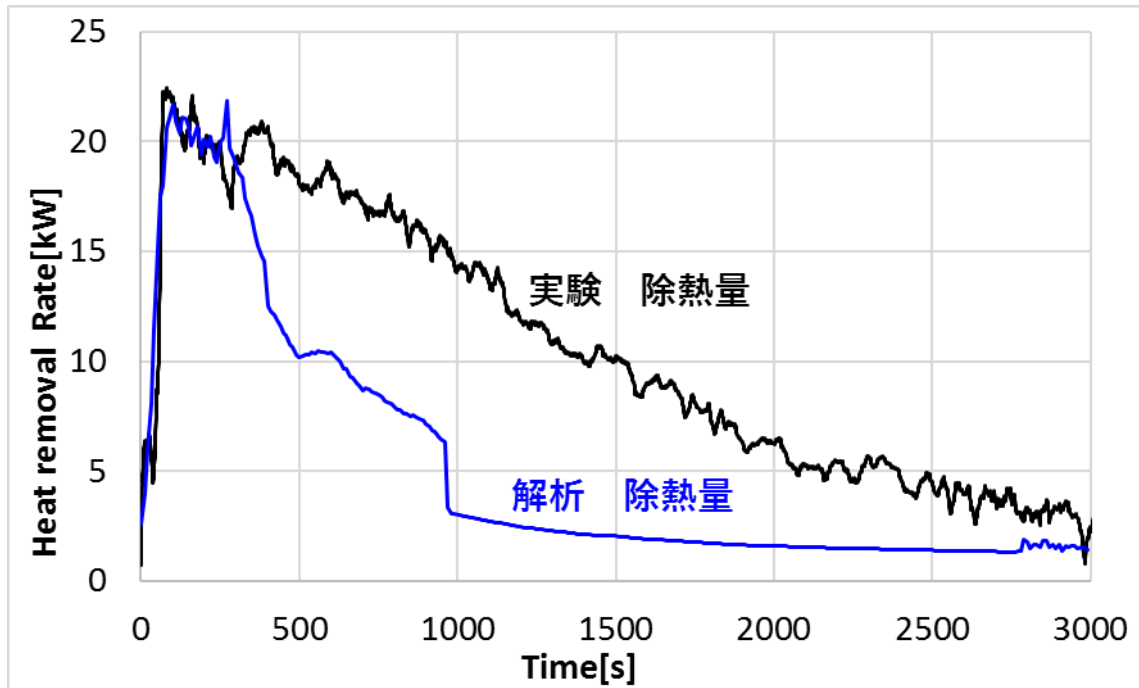


図 3.4.9 除熱量の比較(6MPa)

解析での除熱量は、2MPa のものを除くと最初は実験値と近い数値が出ているが、そこから急激に低下し最終的に 2kW 程度に落ち着いている。除熱量を温度変化の解析値と比較すると、A6 が飽和温度となっている、つまり蒸気が凝縮せずに流出している間は、除熱量も落ち込んでいる。よって、この解析では蒸気が凝縮せず、その蒸発潜熱の分の除熱ができていないことがわかる。

3.4.2 相関式を変更した場合

相関式に変更を加えない場合での解析結果では、実験と比較して蒸気の凝縮量や除熱量が小さかった。この結果について、TRAC-BF1 で使用されている相関式において、高圧条件下における熱伝達率が過小評価されていることが原因であると推測した。師岡らの研究では、高温高圧の条件下で凝縮液膜表面の乱れの増加と液膜界面からの液滴の飛散により、気液界面での伝熱が改善するという知見が示されている [9]。そこで、相関式に手を加え、気液界面の熱伝達率が 3,5,7 倍に増加するように相関式の設定をそれぞれ変更して解析を行った。以下では、温度分布の傾向より、最も実験での温度変化に傾向が近いと判断した 5 倍の解析結果を代表とし、解析結果とする。伝熱管内温度の解析結果を、図 3.4.10～図 3.4.12 に示す。また、この解析結果と実験値のうち、A1,A4,A6 と水温を比較したものを図 3.4.13～図 3.4.15 に示す。

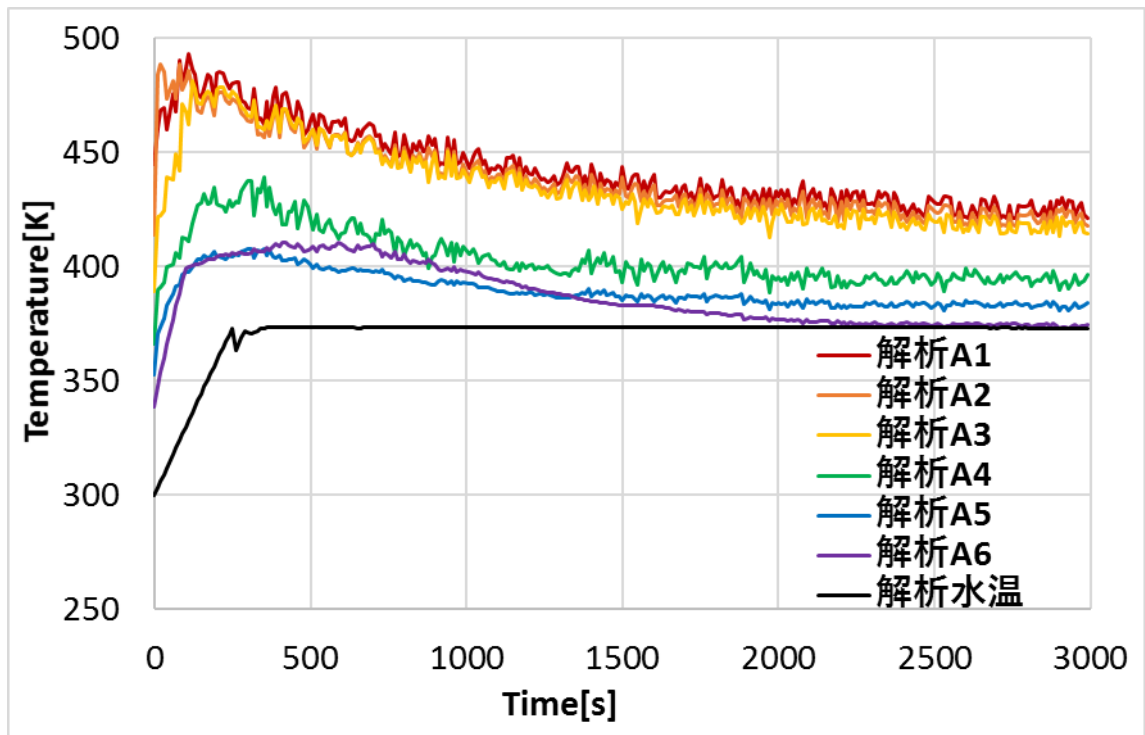


図 3.4.10 温度解析結果(2MPa, 相關式変更後)

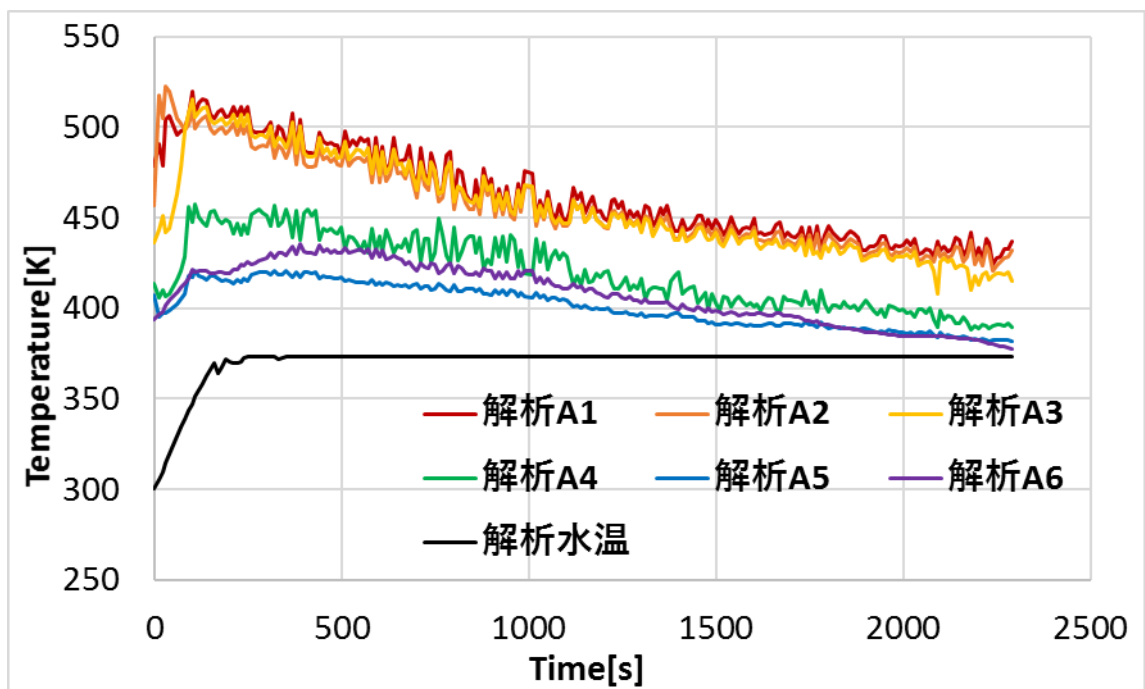


図 3.4.11 温度解析結果(4MPa, 相關式変更後)

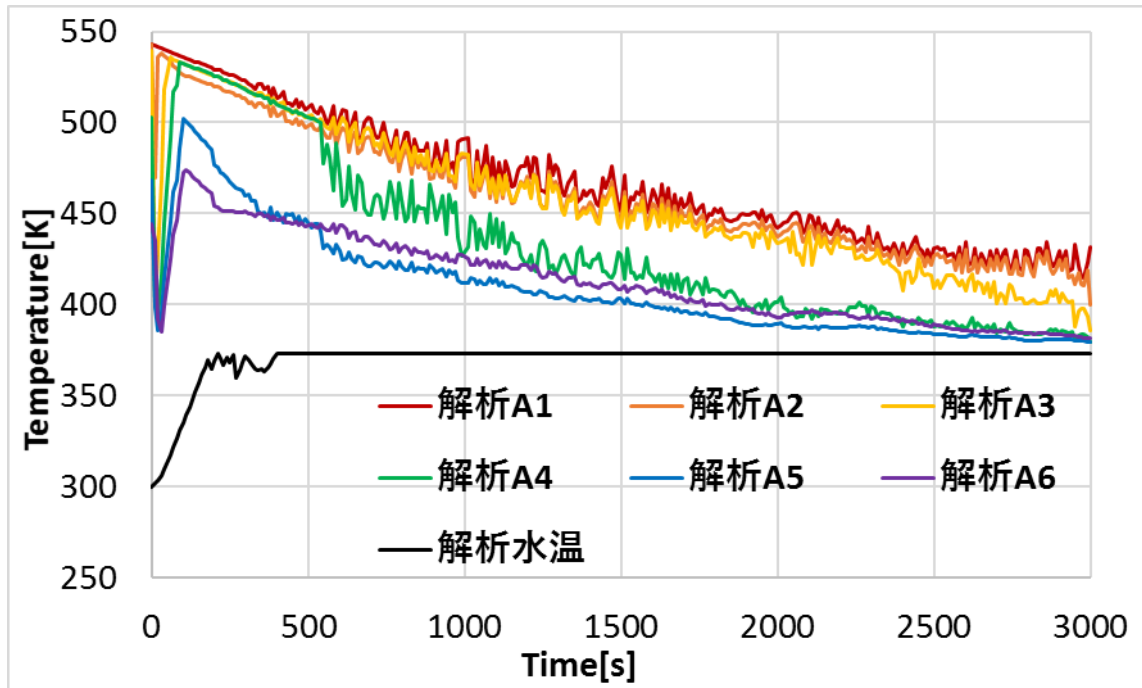


図 3.4.12 温度解析結果(6MPa, 相関式変更後)

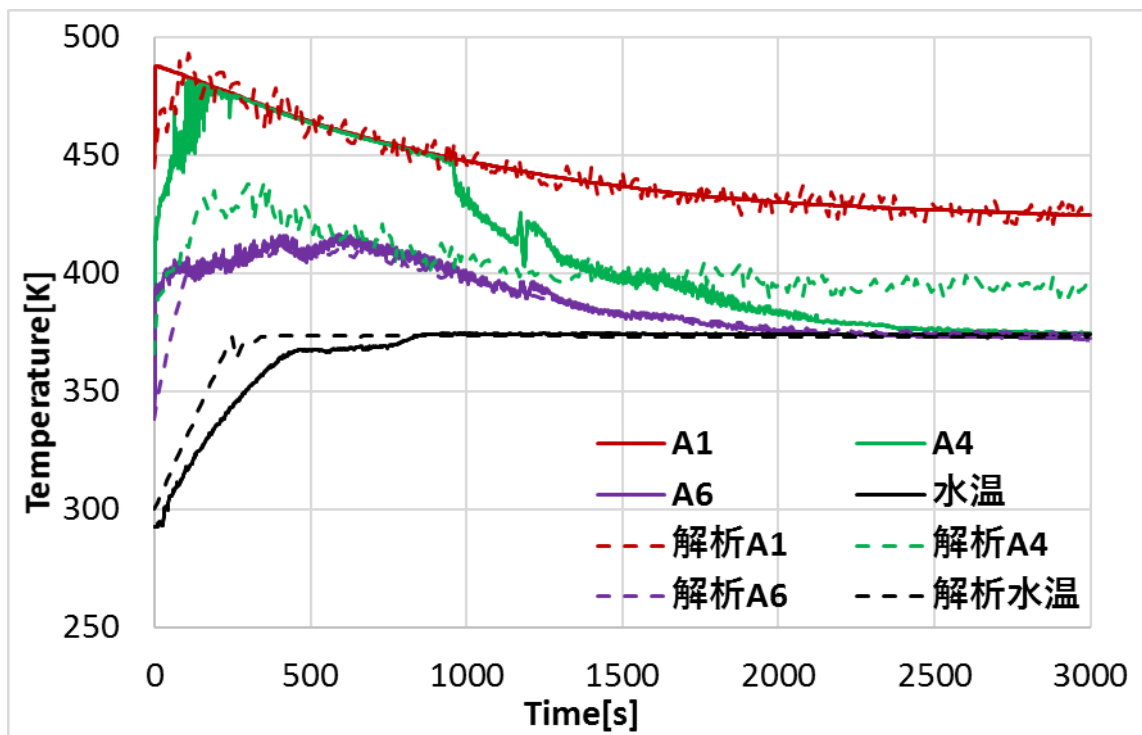


図 3.4.13 実験結果との比較(2MPa, 相関式変更後)

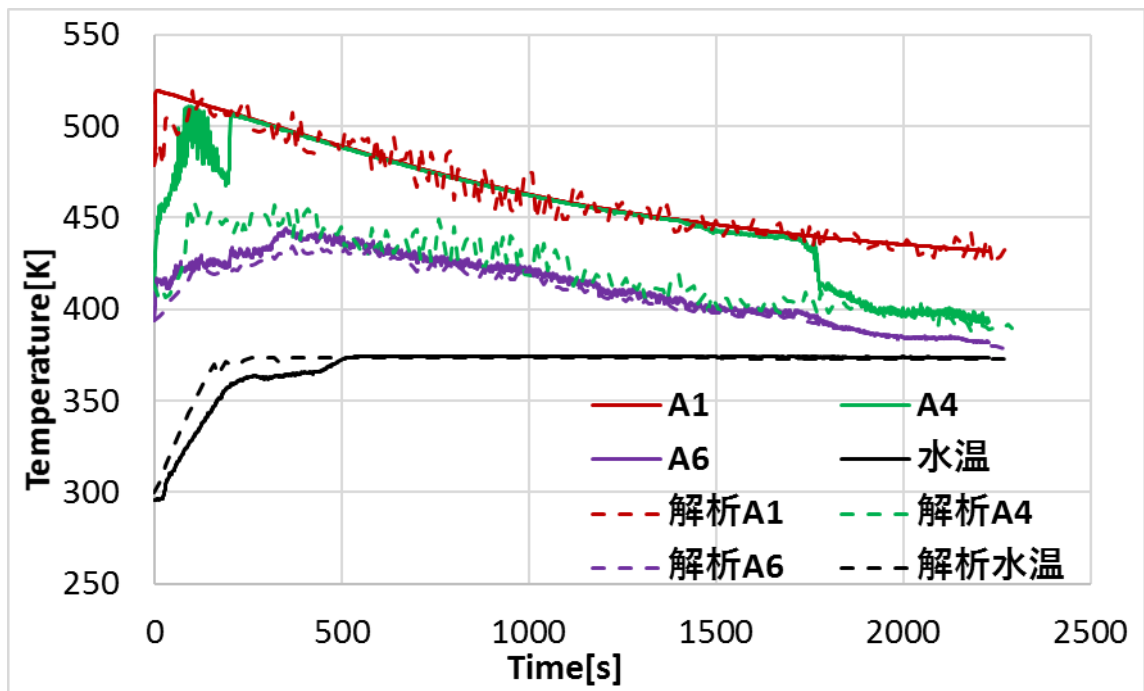


図 3.4.14 実験結果との比較(4MPa,相関式変更後)

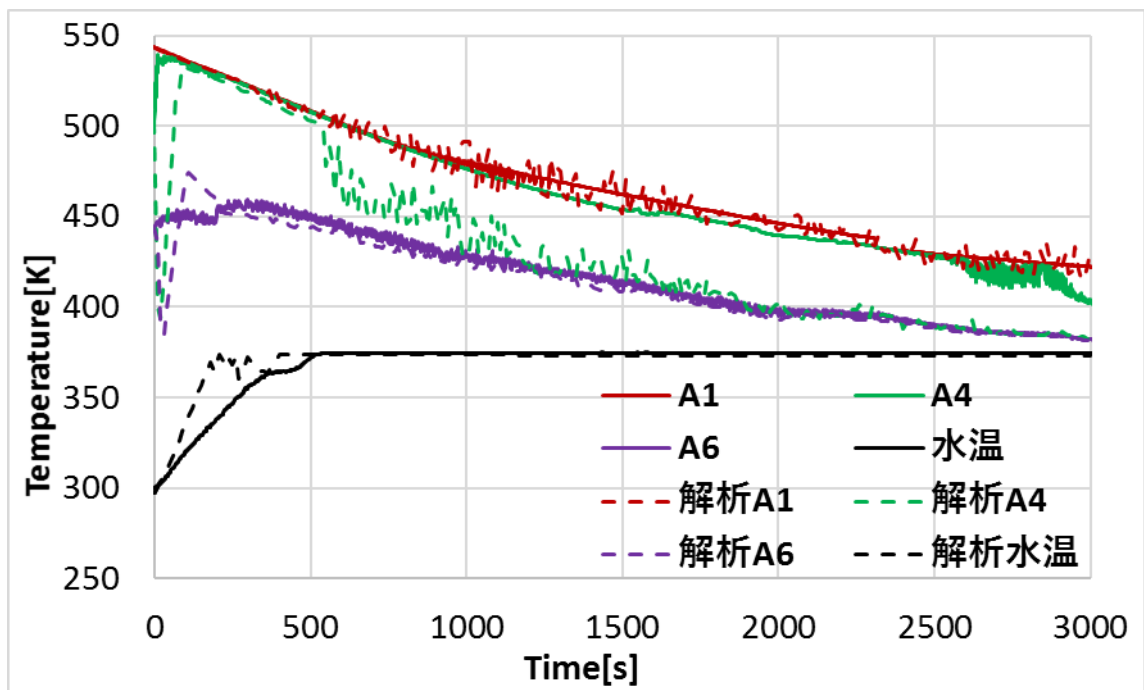


図 3.4.15 実験結果との比較(6MPa,相関式変更後)

相関式に変更を加えた解析結果では,A5,A6 の温度は常に飽和温度を下回っており,実験で見られた蒸気の全量凝縮が再現できている.また,実験値との比較では,A6 の温度は実験値と

よく一致しており、2MPa のときの水温変化も実験値に近くなっている。相関式を変更した解析では、変更を加えない場合の解析結果と比較して、伝熱管内での現象をより正確に再現できていると言える。しかし、変更後の解析結果でも、A2～A4 の蒸気の凝縮は再現できておらず、A5 の温度が A6 を下回るなど、実験と合わない点が多い。凝縮熱伝達にはさまざまな要因が関係するため、単純に気液界面熱伝達を高めただけでは伝熱管内の現象を完全に再現することはできない。より良い再現のためには、実験をもとに、原子炉運転圧力での現象を再現できるような新しい相関式を考案する必要がある。

次に、相関式を変更した場合の除熱量の解析結果を、実験値と比較した図を、図 3.4.16～図 3.4.18 に示す。

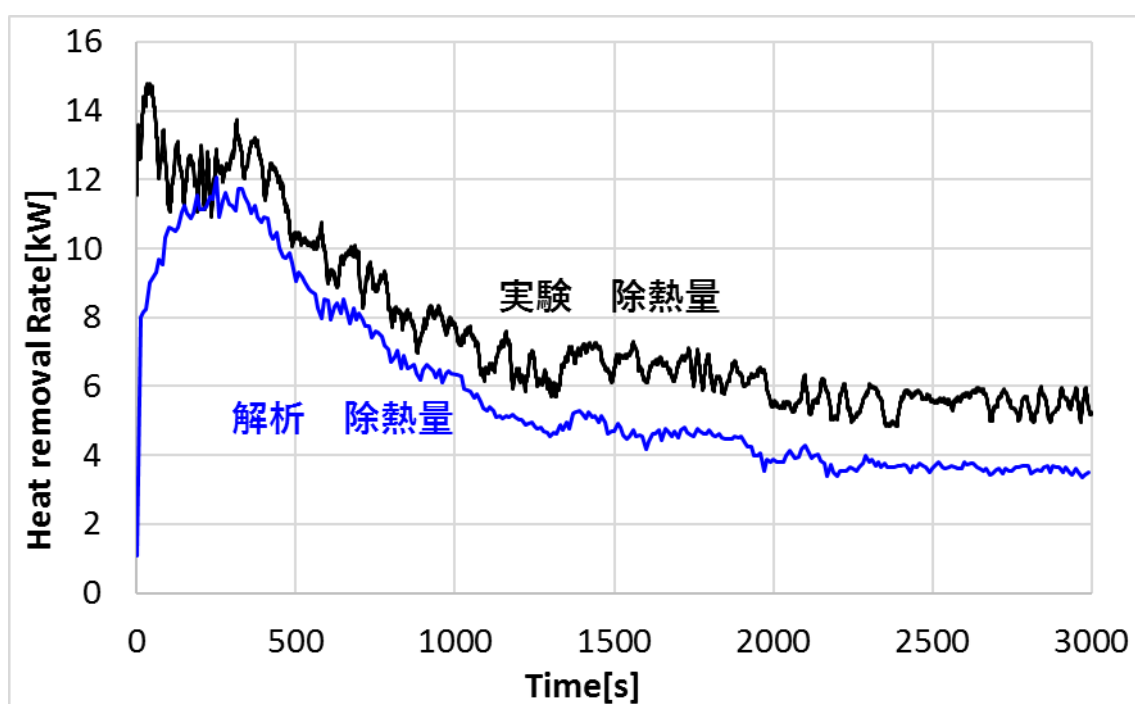


図 3.4.16 除熱量の比較(2MPa,相関式変更後)

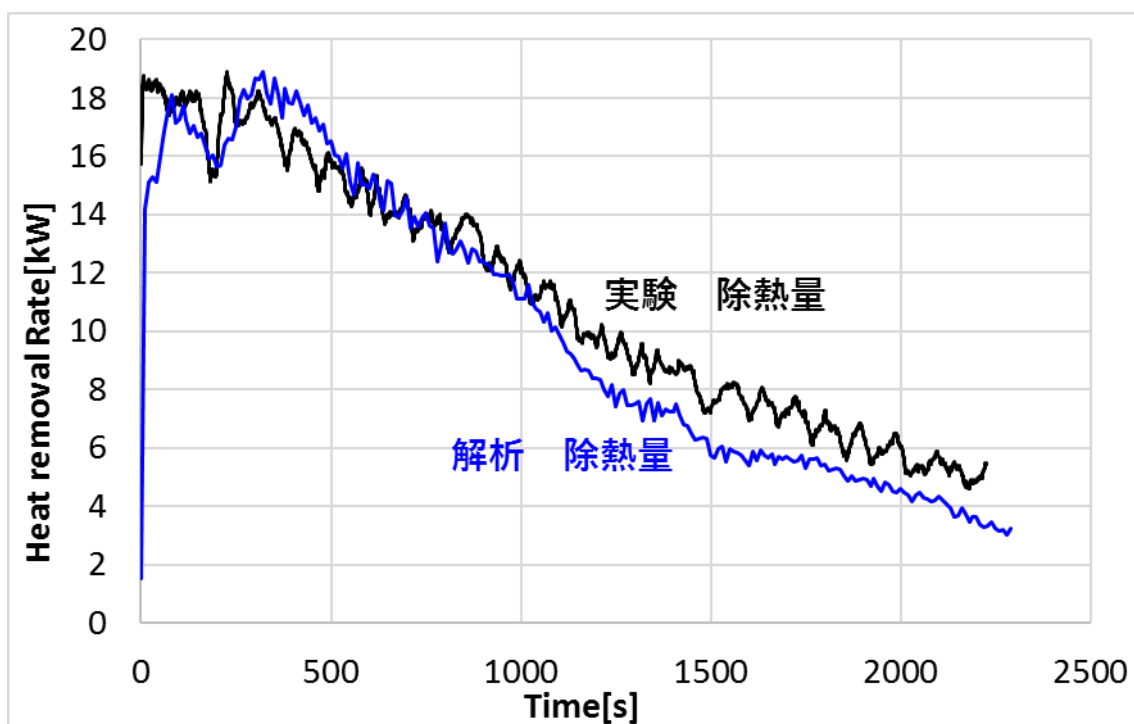


図 3.4.17 除熱量の比較(4MPa,相関式変更後)

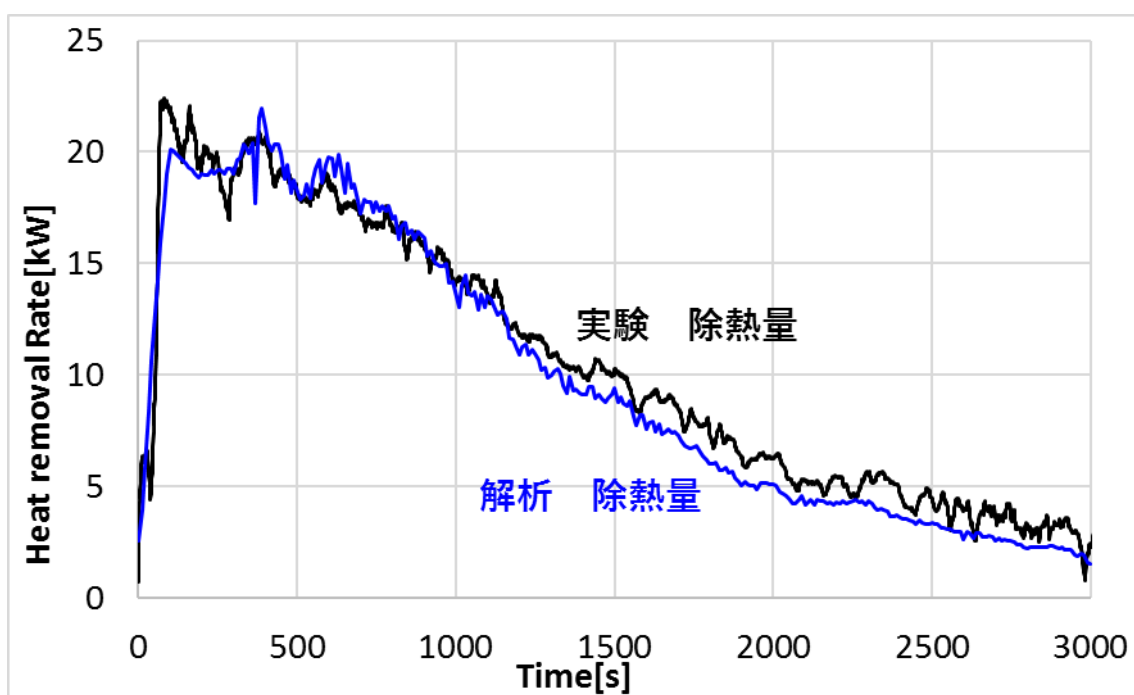


図 3.4.18 除熱量の比較(6MPa,相関式変更後)

除熱量の解析値は,相関式を変更しない場合と比較すると非常に実験値に近くなっている。除熱量には蒸発潜熱が支配的であり,解析で蒸気の全量凝縮を再現できたため,このような

実験値に近い除熱量が得られたと考えられる.以上の結果より,気液界面熱伝達率を高めることで温度分布や除熱量が実験値に近づいたことから,標準の相関式では2~6MPaの圧力における気液界面熱伝達率が過小評価されており,相関式の改良が必要であることが明らかとなった.

第4章 結論

本研究では、実機 IC を模擬した実験装置を用いて 2,4,6MPa の初期圧力で飽和蒸気の除熱実験を行った。また、実験結果をもとに二相流解析コード TRAC-BF1 を用いた実験解析を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 実験の結果、それぞれの圧力で伝熱管の温度、圧力、流量と水温を得ることができ、そこから実験装置の IC 内で蒸気が全量凝縮していることを明らかにした。また実験データを用いて実験装置の除熱量を評価した。

- IC 水槽の観察により、凝縮熱伝達による伝熱管内部の温度変化によって冷却水が沸騰する領域が遷移していく様子を外から観察できた。また、起動中の IC 水槽内部で温度層が発生することを確認した。

- 実験解析の結果、TRAC-BF1 で使用されている標準の凝縮熱伝達の相関式では、2～6MPa における実験体系での IC 内の温度変化を再現できないことを確認した。また、凝縮熱伝達の相関式を変更し、気液界面での熱伝達率を高めることで、温度分布や除熱量が実験値に近づくことがわかった。このことから、標準の相関式では高圧における気液界面熱伝達率が過小評価されており、IC 内部の凝縮熱伝達が正しく再現できないことがわかった。

- IC 起動前に伝熱管とアキュムレータ内に空気を含ませることで、除熱が明らかに鈍ることを確認できた。また、プランジャーポンプでアキュムレータに注水した条件では実験体系で IC が起動しなくなるケースを確認した。

また、以下の事項に関しては、今後の課題としたい。

- 伝熱管の内壁面に熱電対を追加し、熱電対の位置における局所熱伝達率を取得する。

- 実験装置に非凝縮性ガスを注入するラインを増設し、伝熱管内の非凝縮性ガスによる冷却性能の低下や IC が起動しなくなる条件について、定量的な評価を行う。

- 実験装置から取得したデータより、原子炉運転圧力における凝縮熱伝達率の再現が可能な相関式を提案する。

参考文献

- [1]GE Hitachi Nuclear Energy, “The ESBWR Plant General Description,” (2011).
- [2] Yu LIU, Yu YU, “A T-H Model For Residual Heat Removal System Reliability Analysis,” Energy Procedia 39 (2013), 283 – 293.
- [3]Ji Xing, Daiyong Song, Yuxiang Wu, “HPR1000: Advanced Pressurized Water Reactor with Active and Passive Safety,” Engineering 2 (2016), 79–87.
- [4]下江 知弘,「非常用復水器を用いた過酷事故緩和に関する研究」 (2014).
- [5]小林 正英,奈良林 直,辻 雅司,千葉 豪,永田 泰典,下江 知弘,「福島第一原子力発電所 1 号機の自己分析」,日本原子力学会和文論文誌 (2015).
- [6]日本機械学会,「日本機械学会 蒸気表〈1999〉」 (1999).
- [7]S. Z. Rouhani, R. W. Shumway, W. L. Weaver, C. L. Kullberg, “TRAC-BF1/MOD1: AN ADVANCED BEST ESTIMATE COMPUTER PROGRAM FOR BOILING WATER REACTOR ACCIDENT ANALYSIS VOLUME 1: MODEL DESCRIPTION,” Idaho National Engineering Laboratory (1992).
- [8]藤井 哲,「膜状凝縮熱伝達」,九州大学出版会 (2005).
- [9]師岡 慎一,久保 伸二,白川 健悦,湯浅 寛子,山本 哲三,小野 寛,「高温高圧下での凝縮熱伝達に関する研究」,Thermal Science & Engineering, Vol.15, No.2 (2007), 63-66.

謝辞

本研究を進めるにあたって、奈良林先生と山本先生には大変丁寧かつ熱心にご指導を頂き、実験装置の組み立てからデータのとり方、TRAC 解析に至るまでお力添えを頂きました。千葉先生にはゼミや進捗報告会を通じて様々なアドバイスを頂き、研究を進める上で非常に大きな助けとなりました。ご指導して下さった先生方に心から感謝を申し上げます。ワークショップの森さんには、実験装置の製作、装置の組み立ての手伝いや修理をして頂きました。森さんの協力がなければ、この研究は成り立ちませんでした。深く感謝いたします。また、原子炉工学研究室の先輩の皆さんはいつも親身に相談に乗ってくれました。特に倉先輩にはご自身が忙しい中でも実験装置の準備から実験中の作業に至るまでご協力を頂きました。初めての研究室生活で研究をやり遂げることができたのは先輩の皆さんのおかげです。本当にありがとうございました。そして、同期の仲間たちには日常の何気ない会話からも元気をもらうことができ、研究室生活の大きな支えとなりました。研究を進める中で力になって頂いたすべての方々に、改めて深く感謝の気持ちを述べさせていただきます。

質問への回答

卒業研究発表会で受けた質問・コメントに対する回答を以下に記載する。

Q.解析で気液界面での熱伝達のみを検討しているが、壁面の熱伝達や熱伝導の影響は考慮したか。

A.解析では、実験と異なり蒸気が凝縮しきらなかったことを問題視した。IC 伝熱管のように蒸気が冷たい壁面に接する状況では凝縮液膜が壁面を覆う膜状凝縮という現象が起こる。ここで蒸気の凝縮量に影響するのは気液界面での熱伝達だけである(気液界面での伝熱が進まなければ、壁面に熱が入っていかなくなるので、壁面の相関式のみを調整しても凝縮量は増えない)。また、相関式の変更の有無に関わらず解析で壁面温度が蒸気よりも数十度低くなっていることも確認した。以上より解析結果と実験結果の違いには気液界面での熱伝達が支配的であると判断した。

Q.TRAC では膜状凝縮の液膜はどのように扱われているのか。

A.TRAC では二流体モデルを採用しており、一つのセルに気相部分と液相部分が存在するとして計算を行う。さらに、セル内のボイド率や流速などによって流動様式(環状流、スラグ流など)の判定を行い、流体がどのような形態で存在しているかを決定する。以上のモデルにより、膜状凝縮の液膜は TRAC 内では環状流あるいは環状噴霧流の液相部分として扱われる。

Q.凝縮熱伝達率の相関式は理論式か実験式か。

A.気液界面での相関式は最大 0.2MPa 程度の圧力で実施された実験に基づく実験式である。液膜と壁面の間の熱伝達に関する相関式は、円管の表面に凝縮液膜が生成する条件に対する近似解から導かれた式で、理論に基づいているが仮定をしているため厳密な理論式ではない(水平円管外面上の膜状凝縮に対する Nusselt の近似解)。

C.Nusselt の相関式を使うと熱伝達率が過小評価されるのは当たり前である。

A.Nusselt による膜状凝縮熱伝達率の相関式は Nusselt の水膜理論(垂直な平板上に液膜ができる条件を想定)が有名で、その式では液膜の対流を考慮していないので確かに熱伝達率が過小評価されやすいが、TRAC で使われている Nusselt の式は前述の通りそちらではない。TRAC で使われている Nusselt の式は対流もある程度考慮されたものである。後者の式でも過小評価されるのであれば、壁面での熱伝達についても今後の研究で検討していきたい。

Q.解析では気液界面の熱伝達率を 5 倍としていたが、その倍率はどう決めたのか。また、倍率を小数点以下まで決めるなど、相関式の適用性をより高める検討はしないのか。

A.倍率は 3,5,7 倍の 3 つのケースについて検討し、その中から代表として 5 倍の結果を示した。ただし単純に倍率をかけただけでは高压条件に適用できるモデルとはならないため、今後は相関式の根本的な改良を行っていきたい。