

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に
属しますので公開できません。

重大事故等対策の有効性評価に係る シビアアクシデント解析コードについて

(第4部 GOTHIC)

第58回審査会合(平成25年12月17日)資料2-2-8 改訂2

目次

－ 第4部 － GOTHIC －

1. はじめに.....	3
2. 重要現象の特定.....	4
2.1. 事故シーケンスと評価指標.....	4
2.2. ランクの定義.....	4
2.3. 物理現象に対するランク付け.....	5
3. 解析モデルについて.....	9
3.1. コード概要.....	9
3.2. 重要現象に対する解析モデル.....	11
3.3. 解析モデル.....	12
3.4. ノード分割.....	27
3.5. 入出力.....	35
4. 検証／妥当性確認.....	36
4.1. 重要現象に対する検証／妥当性確認方法.....	36
4.2. NUPERC試験解析.....	40
4.3. 構造材凝縮熱伝達モデルの感度検討.....	71
4.4. 熱伝達試験との比較.....	74
4.5. 熱伝導解析解との比較.....	76
4.6. PAR特性検証.....	77
4.7. イグナイタによる水素燃焼モデルの検証.....	99
4.8. 実機解析への適用性.....	100
5. 有効性評価への適用性.....	120
5.1. 不確かさの取り扱いについて（評価指標の観点）.....	120
5.2. 不確かさの取り扱いについて（運転員操作の観点）.....	121
6. 参考文献.....	123
添付1 解析コードにおける解析条件.....	125
添付2 PANDA試験.....	126
添付3 代替スプレイポンプの攪拌効果について.....	133

1. はじめに

本資料は、格納容器損傷防止に関する重大事故対策の有効性評価（以下、「有効性評価」と称す。）のうち、水素燃焼解析において適用しているGOTHICコード*について、

- ・有効性評価において重要となる現象の特定
- ・GOTHICコードの解析モデル及び入出力に関する説明
- ・妥当性評価
- ・有効性評価への適用性

に関してまとめたものである。

* GOTHIC Code, Version 7.2a-p5 Windows 2000/XP (with associated GOTHIC Documentation), EPRI Palo Alto, CA, EPRI Product 1013072, 9-Feb-2006

2. 重要現象の特定

2.1. 事故シーケンスと評価指標

GOTHICコードが適用される、格納容器破損防止対策における重要事故シーケンスグループについて、具体的な重要事故シーケンス、及びその事象の推移と評価指標について記述する。

(1) 水素燃焼

格納容器損傷防止に係る重要事故シーケンスグループである水素燃焼では、事故時の格納容器内の熱流動ならびに原子炉及び格納容器内で発生する水素の拡散・混合挙動を評価する。

水素燃焼において想定するシナリオとして、大破断LOCA+ECCS作動失敗を想定する。事象初期においては1次系からの破断流による格納容器内への質量エネルギー放出が顕著であり、格納容器内の圧力・温度上昇が見られる。また、破断流の一部は、スプレイ及びそれに伴う凝縮、構造材表面における蒸気凝縮に伴い、液相が形成されサンプへの流入に至る。

炉心は、ECCSの炉心注入失敗により、冷却能力が長期的に不足するため、燃料が高温状態に至り、熔融する。燃料の過熱過程において水素が発生し、破断口から格納容器内に放出される。熔融した燃料は原子炉容器を貫通し原子炉キャビティに落下し、格納容器内には原子炉内のジルコニウム-水反応で生成された水素が大量に放出される。また、格納容器内における放射線水分解・金属腐食及びコンクリートの熔融などによっても水素が発生する。

発生した水素は、格納容器内に設置された水素処理設備により処理され、格納容器内の水素濃度の増加が抑制される。この過程において、格納容器内部の圧力及び温度は、格納容器気相部における質量エネルギーにより変動する。

評価指標は格納容器内の水素濃度であり、審査ガイド（参考文献1）に示されるとおり、原子炉格納容器内の水素濃度がドライ条件に換算して13vol%以下又は酸素濃度が5vol%以下であれば爆轟は防止できると判断される。

2.2. ランクの定義

本資料の本文「2.1 有効性評価における物理現象の抽出」で抽出された物理現象のうちGOTHICで評価する事象において、考慮すべき物理現象を対象に、表2-1の定義に従って「H」、「M」、「L」及び「I」のランクに分類し、「H」及び「M」に分類された物理現象を重要現象として抽出する。

表 2-1 ランクの定義

ランク	ランクの定義	本資料での取り扱い
H	評価指標に対する影響が大きいと考えられる現象	物理現象に対する不確かさを実験との比較や感度解析等により求め、実機評価における評価指標及び運転操作への影響を評価する
M	評価指標に対する影響が中程度と考えられる現象	事象推移を模擬する上で一定の役割を担うが、影響が「H」に比べて顕著でない物理現象であるため、必ずしも不確かさによる実機評価における評価指標及び運転操作への影響を評価する必要はないが、本資料では実機評価への影響を感度解析等により評価するか、「H」と同様に評価することとする
L	評価指標に対する影響が小さいと考えられる現象	事象推移を模擬するためにモデル化は必要であるが、評価指標及び運転操作への影響が明らかに小さい物理現象であるため、検証／妥当性評価は記載しない
I	評価指標に対し影響を与えないか、又は重要でない現象	評価指標及び運転操作へ影響を与えないか、又は重要でない物理現象であるため、検証／妥当性評価は記載しない

2.3. 物理現象に対するランク付け

水素濃度を評価指標とした物理現象とランクの関係を表 2-2に示し、以下に説明する。表 2-1の定義に従い、物理現象に対してランク付けを行い、「H」及び「M」に分類された物理現象を重要現象として抽出した。

2.3.1. 区画間・区画内の流動

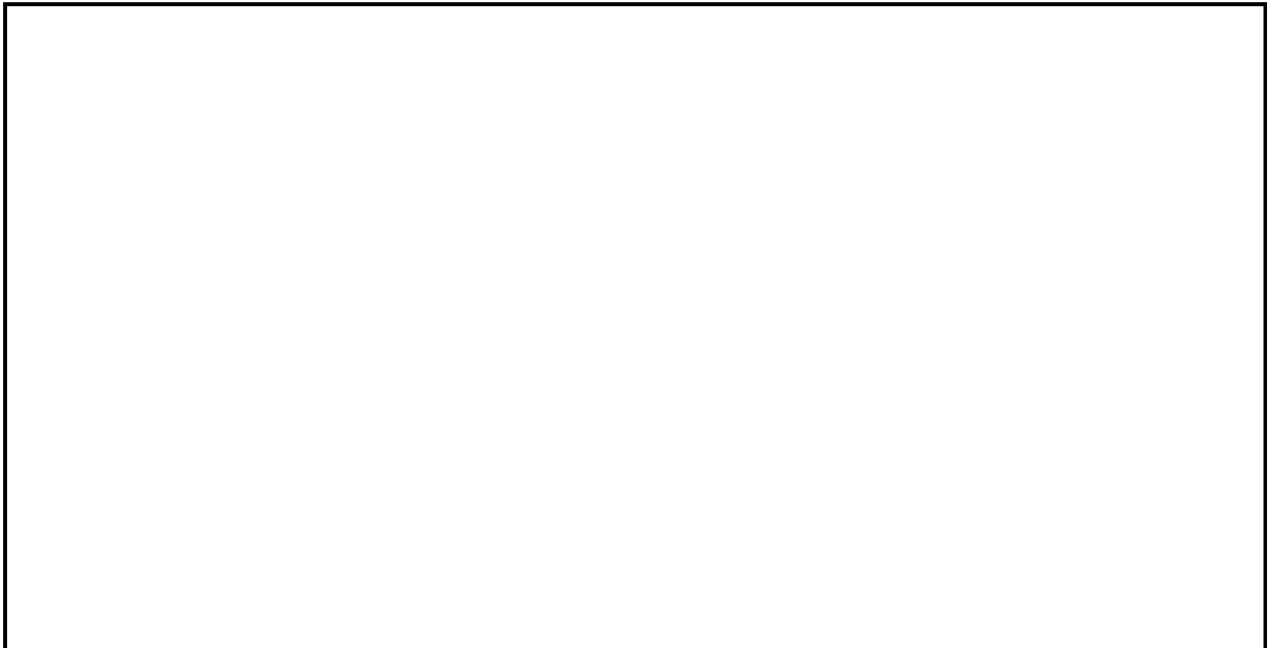
--



2.3.2. 気液界面の熱伝達



2.3.3. 構造材との熱伝達及び内部熱伝導



2.3.4. スpray冷却

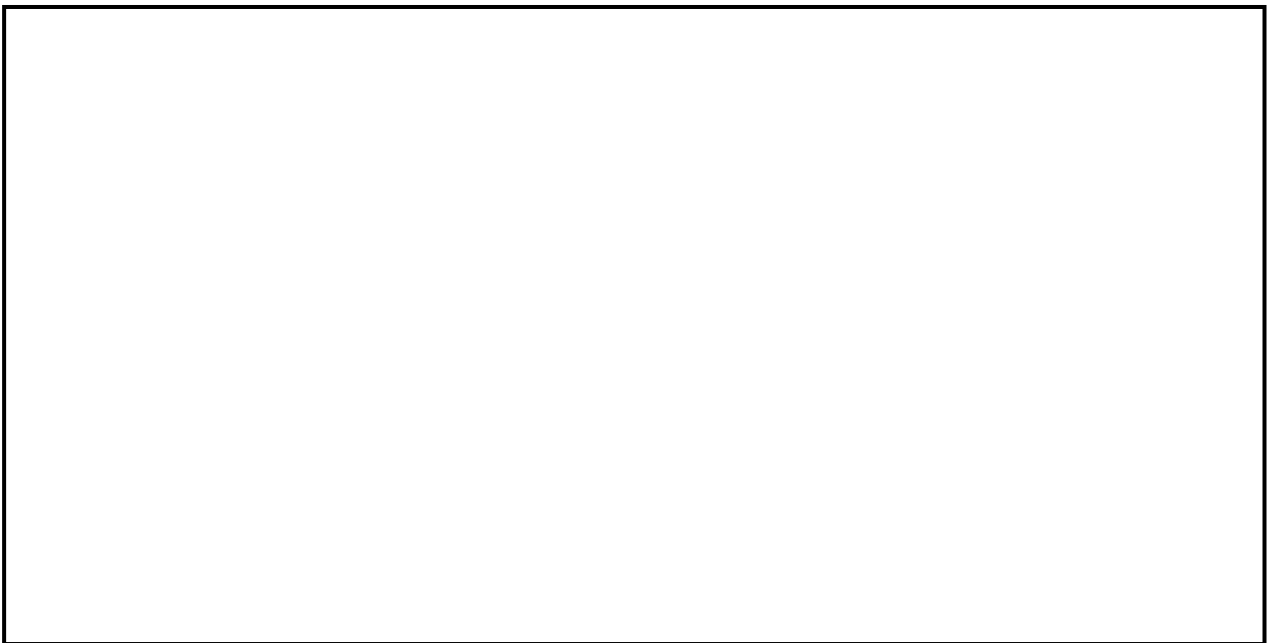


枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

2.3.5. 水素発生



2.3.6. 水素処理



枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 2-2 格納容器破損防止対策の有効性評価（水素燃焼）のランク

		水素燃焼
分類	物理現象	評価指標
		水素濃度
格納容器	(1) 区画間・区画内の流動	H
	(2) 気液界面熱伝達	L
	(3) 構造材との熱伝達及び内部熱伝導	H
	(4) スpray冷却	H
	(5) 水素発生	H (GOTHICでは計算しないため「I」)
	(6) 水素処理	H

3. 解析モデルについて

3.1. コード概要

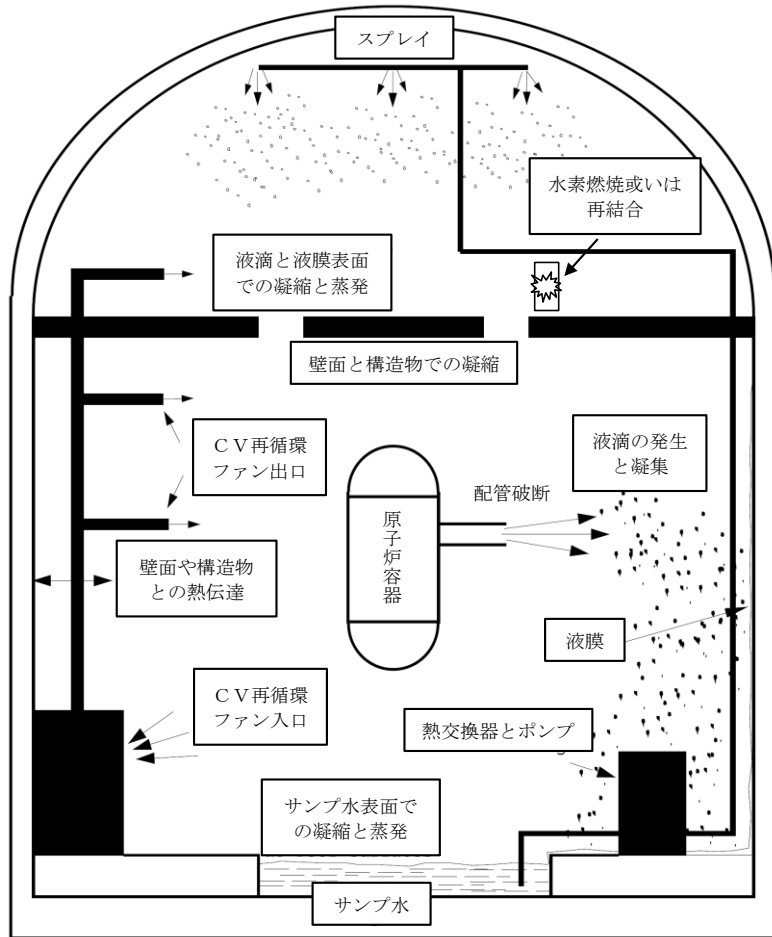
GOTHIC (Generation of Thermal-Hydraulic Information for Containments) コードは、原子力発電プラントの格納システムの事故解析を主目的に、米国NAI (Numerical Applications Inc.) により開発された汎用熱流動解析コードである (参考文献 2)。

コードは質量、エネルギー及び運動量の 3 保存則を気相・液相・液滴相の各流体場に適用し、状態方程式、熱伝導方程式、各種構成式及び相関式などを解くことにより流体、構造材の相互作用、機器の作動を考慮した過渡解析が可能である。流体場においては各種ガス組成の考慮が可能である。空間はノードとして模擬され、それらはパスにより接続される。ノードは集中定数系、或いは有限差分法で分割する分布定数系による模擬が適用可能である。

また、ポンプ、バルブ、スプレイ、ファン、空調機器、熱交換器、イグナイタ、水素結合器等の機器設備の作動及び制御に対しても組み込みのコンポーネントモデルにより模擬可能である。

これらにより、想定した事故シーケンスに従って原子炉格納容器 (CV) 内の水素を含む流体の過渡状態が計算される。

GOTHIC コードによる解析モデルを図 3-1 に示す。また、以下にコードの構成要素の概要を示す。



出典：EPRI Product 1013072, GOthic Technical Manual, Figure 2-1

図 3-1 GOthicコードモデル概念図及びサンプルモデル

3.2. 重要現象に対する解析モデル

2章で示した現象のうち、評価目的に対し影響が大きいと判断した重要現象（表 2-2において「H」に分類された物理現象）について、その物理現象を評価するために必要となる解析モデルを表 3-1に示す。

表 3-1 重要現象に対する解析モデル

重要現象	必要な解析モデル
区画間・区画内の流動	保存式モデル 流動を模擬する構成式及び相関式 非凝縮性ガスの輸送モデル ノーディングスキーム（空間離散化）
構造材との熱伝達及び内部熱伝導	多相流モデル 熱伝達モデル（自然/強制対流、輻射、凝縮） 熱伝導モデル
スプレー冷却	多相流モデル 界面積モデル 界面熱伝達モデル（凝縮では相変化アナログを考慮）
水素処理	P A R 特性モデル イグナイタによる水素燃焼モデル

3.3. 解析モデル

GOTHICコードの主要な解析モデルを以降に示し、その概要を表 3-2に纏める。

表 3-2 GOTHICコードのモデル一覧

項目	モデル
基本式	<ul style="list-style-type: none"> ・気相、液相、液滴からなる3相の流体場 ・質量保存則、エネルギー保存則、運動量保存則 ・各種構成式・相関式及び状態方程式 ・沸騰・凝縮など多相状態の変化（二相流況、相間摩擦、物質輸送、熱伝達など） ・気相には蒸気及びガス組成を考慮
数値解法	<ul style="list-style-type: none"> ・陰解法、半陰解法、陽解法から選択（実機・検証解析では半陰解法を使用）
区画間・区画内の流動	<ul style="list-style-type: none"> ・離散化モデル（パス/ジャンクションでノード間を接続） ・集中定数系では気液分離と気相部における液滴の存在を模擬する流況モデルを適用 ・分布定数系では二相流況を全てモデル化
構造材との熱伝達及び内部熱伝導	<ul style="list-style-type: none"> ・自由対流（McAdams）・強制対流熱伝達（Dittus-Boelter）・混合領域をモデル化 ・輻射モデル ・凝縮モデル（実験相関式或いは熱・物質伝達のアナログ） ・熱伝導モデル
スプレイ	<ul style="list-style-type: none"> ・液滴径・流量、温度 ・流動様式モデル ・自由対流（McAdams）、強制対流熱伝達（Dittus-Boelter）、混合領域モデル ・相変化（物質伝達）は界面を定義しアナログにより計算
水素処理	<ul style="list-style-type: none"> ・PAR特性を組込関数として模擬 ・イグナイトによる水素燃焼モデル

3.3.1. 区画間・区画内の流動

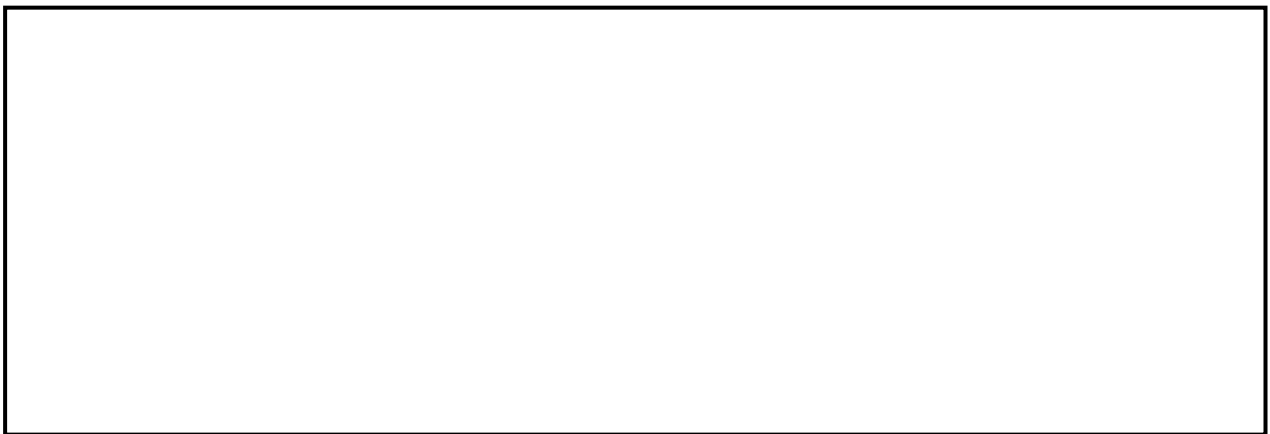
格納容器内の区画・区画内の流動を適切に模擬するため、格納容器を適切にノード分割する。流動計算で取り扱われる流体は各種ガス組成及び蒸気を含む気相、液相及び液滴相となり、これら各相に対して質量、エネルギー、運動量の保存式を各種の構成式及び相関式と合わせて数値的に解き、格納容器内の流動を模擬する。流体の各相に対しては非平衡状態の模擬が可能であり、多相の流況及び界面状態、相間の相互作用が考慮される。また、これら流体に合わせ、アイス及びミストも考慮することが可能である。

(1) 空間に対するモデル

ノードモデルには集中定数系モデル、ノードを有限差分法で分割する分布定数系モデルがある。

集中定数系ノードでは、熱水力学的諸量がノード平均として扱われ、流体各相のノード間の質量、エネルギー及び運動量の伝播は、ノード間接続の流路面積、慣性長及び流動抵抗を考慮したパスにより模擬される。ノード内の流体が二相となる場合、ノード内の床面側に液相が、天井側に気相が存在する Pool/Drop 流動様式となる（図 3-2参照）。また、ノード内に構造材等のヒートシンク、破断口等の境界条件を設定することができる。

分布定数系ノードでは、ノードを複数のサブノードに分割することで流体の熱水力学的諸量の空間変化が詳細に模擬される。ノード内の質量、エネルギー及び運動量の空間変化は、サブノードに分割されたメッシュ構造体系で、有限差分法により求められる。また、乱流を考慮した多次元のモデル化が可能である。分布定数系ノードでは、図 3-2に示される流動様式が考慮され、流動様式に応じた界面熱伝達等を表す構成式、構造材表面の熱伝達等を表す相関式により二相流れが模擬される。分布定数系ノードはパスにより集中定数系ノードと接続することができる。



(2) 気液界面の熱伝達

PWRのシビアアクシデント時において、格納容器内で水素が発生するような状態で考慮されるべきである流体間の熱・物質伝達に関する相互作用を図 3-3に示す。流体は液相（水）・気相（蒸気）・液滴の三相による流体場を想定している。流体間では、液相・気相間、液滴・気相間において凝縮・蒸発・沸騰・フラッシング等が、液滴相・液相間では、デポジット・ディエントレイン・凝集等が考えられる。構造材表面では流体との熱・物質伝達の相互作用が計算され、構造材表面を介して流体の相や保有エネルギーに変化が及ぶ。これらの相互作用のうち、流体間の界面における熱・物質伝達に関し、GOTHICコードにおけるモデルと取扱いを示す。

流体の相間における相互作用は、空間における流況を判断した上で界面積・状態量等から判断される。流況（Flow Regime）を識別することにより、相間（液相・気相間、液滴・気相間）の熱伝達及び抗力が作用する界面積が定義される。集中定数系ボリュームでは Pool/Drop 流動様式が、分布定数系においては図 3-2に示される流動様式が考慮される。液相・気相間、液滴・気相間の熱・物質伝達モデル概念図を図 3-4に示す。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

流体が相変化を伴う場合、それによる輸送量は界面に対し作用する。この界面に対し、相間の物質伝達、熱伝達、運動量などの輸送量は、界面の両面における質量・エネルギーバランスから算出される。

蒸気の凝縮に対しては、熱・物質伝達間のアナログを考慮する機構論的なモデルにより伝達量が計算される。伝熱量は以下のとおりとなる。

$$Q_{vl} = H_{vl} A_{vl} (T_{ll} - T_v) + \Gamma_l h_{vs}$$

$$Q_{ll} = H_{ll} A_{vl} (T_{ll} - T_l) - \Gamma_l h_l$$

H_{vl}, H_{ll} : 熱伝達係数

Γ_l : 相変化質量

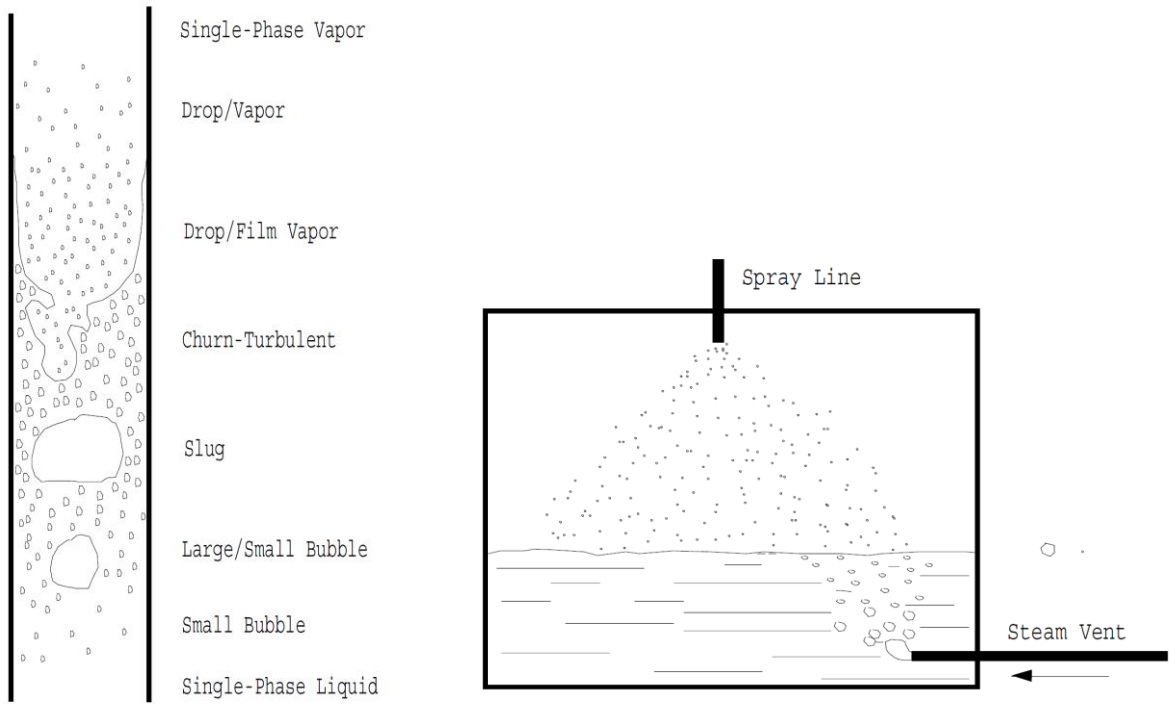
k_{vs}, k_l : 接触表面割合

A_{vl} : 界面積

T_v, T_l, T_{ll} : 温度

(3) まとめ

このように格納容器内の空間を適切にノード分割した上で、気液界面の熱伝達や後述する構造物との熱伝達を表記する構成式・相関式と合わせて流体の保存式を解くことで、区画間・区画内の流動が模擬される。

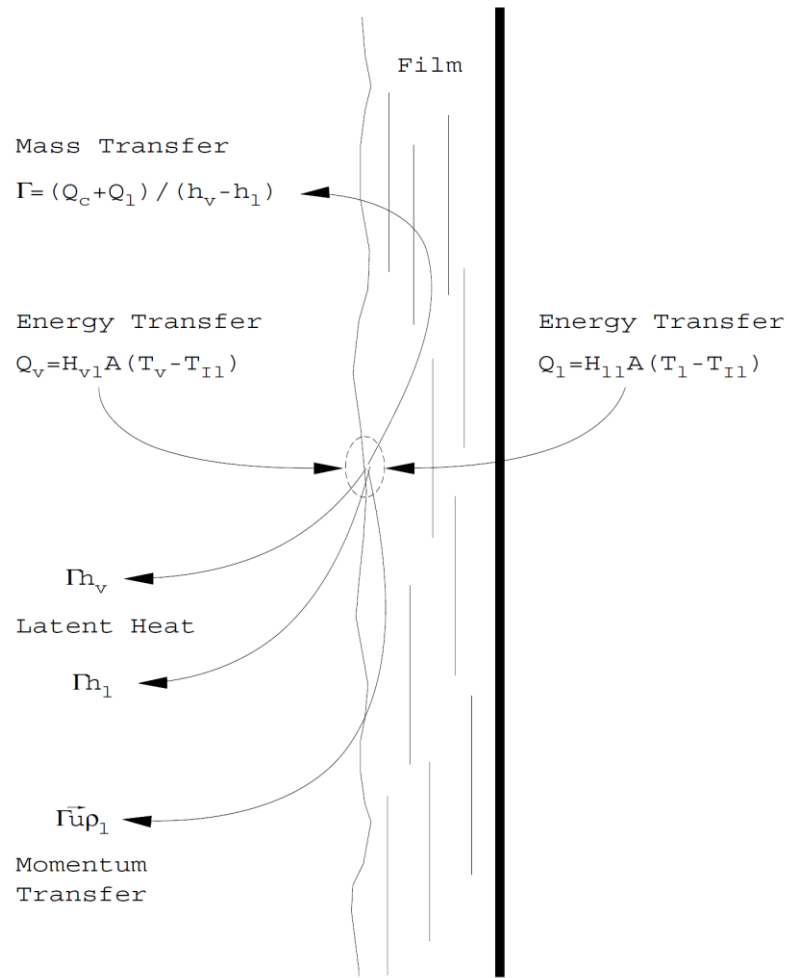


分布定数系における Flow Regime

集中定数系における Flow Regime

出典：EPRI Product 1013072, GOthic Technical Manual, Figure 8-1 and 8-3

図 3-2 二相流モデル



出典：EPRI Product 1013072, GOthic Technical Manual, Figure 8-6

図 3-3 界面伝達モデル

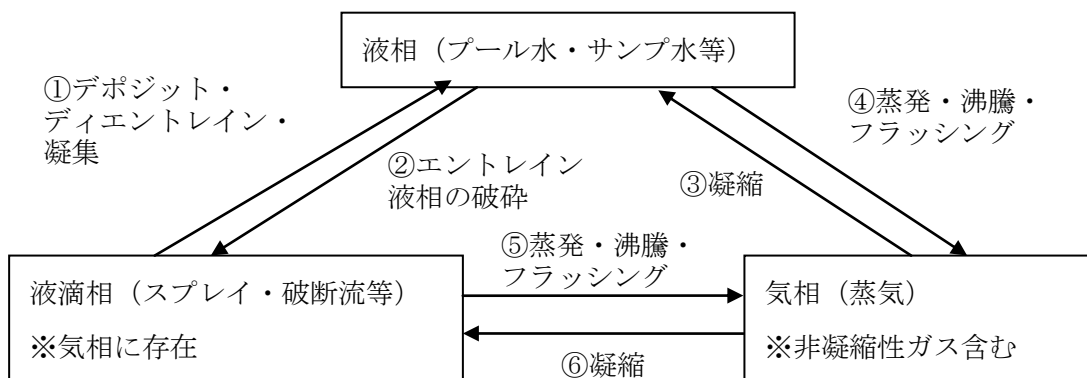


図 3-4 流体間の相互作用 (界面における熱・物質伝達)

3.3.2. 構造材との熱伝達及び内部熱伝導

流体と構造物表面との間の、単相、輻射、凝縮熱伝達が考慮される（図 3-5参照）。以下に、GOTHICコードに具備される代表的な熱伝達モデルを示す。

- ・単相熱伝達（McAdams（参考文献 3）：自由対流、Dittus-Boelter（参考文献 4）：強制対流）
- ・輻射熱伝達（壁面-気相、壁面-壁面、Stefan-Boltzman（参考文献 3）式に基づく）
- ・凝縮熱伝達（内田（参考文献 5）・田上（参考文献 6）、Gido-Koestel（参考文献 7）、Diffusion Layer Model（参考文献 8））

熱伝達モデルにより、凝縮伝熱量は以下のとおりとなる。

$$Q_{cond} = \lambda_t \lambda_{wv} H_{cond} A_{cn} \Delta T_{cond}$$

H_{cond} : 凝縮熱伝達係数

λ_t : 強制関数

λ_{wv} : 接触表面割合

A_{cn} : 伝熱面積

ΔT_{cond} : 温度差

なお、構造物表面での伝熱量は以下のとおりとなる。

$$Q_w = Q_{cond} + Q_{conv_v} + Q_{conv_l} + Q_{rad}$$

熱構造材表面の凝縮は、気体の流動強度と境界部分の密度差、非凝縮性ガスの存在など気体組成・状態量、表面の液膜の状況に影響を受ける。コードでは、実験相関式或いは構造材表面の液膜濡れの影響を考慮する機構論的モデルを用いてこれら影響が考慮される。

事故時に原子炉 1 次系から冷却材が放出されると格納容器内に蒸気が広がるが、構造材はヒートシンクとなり表面で蒸気凝縮が作用し、上昇する格納容器圧力と雰囲気温度の抑制に寄与する。一方、格納容器スプレイによる冷却、再循環ユニットによる気相部の自然対流冷却が開始されると、構造材表面にある液相が再蒸発を始める。これら冷却材-構造材熱伝達は、これらに対応するための上記の凝縮及び対流熱伝達モデルにより模擬される。以下に構造材表面の凝縮熱伝達モデルの概要を示す。

(1) 田上ブローダウン式（参考文献 6）

日本で実施した Safe Project（参考文献 9）において、1 区画の閉空間に対する L B L O C A ブローダウン（二相放出）を想定し得られた実験相関式である。対象となる区画の自由体積、放出エネルギー積分値、放出期間の関数により、ブローダウン時のピーク凝縮熱伝達係数を定義する。なお

本式をベースにした修正田上相関式が、日本国内の設置許可申請書添付十における格納容器健全性評価及び長期内圧評価に使用されている。

(2) 直接凝縮モデル

構造材表面における直接凝縮モデルを示す。なお、本節で示す凝縮モデルは、濡れ面における凝縮膜が継続的に落下することで、気相と構造材との接触性が確保される状態を仮定している。

① 内田相関式 (参考文献 5)

熱構造材との熱流束が過度に大きい、或いは過度に少ない場合を除いて適用可能である。対象となる領域の蒸気・非凝縮性ガスの比のべき乗により凝縮熱伝達係数を定義する。過熱状態に対しては適用しないものとする。本式をベースにした修正内田相関式が整備されており、LOCAを想定した設計基準事故(DBA)の解析で、修正田上相関式と組み合わせて使用されている実績がある。

② Gido-Koestel 相関式 (参考文献 7)

熱・物質伝達のアナロジにより、熱構造材表面における凝縮に伴う物質伝達を算出、これにより等価的な熱伝達係数を定義する。気相が過熱・飽和いずれの状態においても適用可能である。表面の凝縮膜による伝熱促進を組み込んでおり、液膜厚さ・流速が考慮される。

(3) Diffusion Layer Model (参考文献 8)

Diffusion Layer Model (DLM) は、熱・物質伝達のアナロジを用いて凝縮率と顕熱伝達率を計算する。このモデルは開発元 (NAI) の検証により、最適な熱伝達予測であることが確認されている。うち、DLM-FM は構造材近傍の気相におけるミストの発生及び構造材表面の液膜擾乱効果を考慮することで、最確評価が可能である。

GOTHICコードの実験検証においては、例えばNUPEC試験解析などでDLM-FMを使用している。他のモデル検証解析を以下に示す。

- ・ 内田試験
- ・ Wisconsin 大学 大気圧試験 (参考文献 10)
- ・ Wisconsin 大学 加圧試験 (参考文献 10)
- ・ Wisconsin 大学 Flat Plate Tests (参考文献 11)
- ・ Debhi 試験 (参考文献 12)
- ・ CVTR 試験 (参考文献 13)
- ・ BFMC 試験 (参考文献 14、15、16)
- ・ HDR 試験 (参考文献 16、17)
- ・ ヌッセルト理論 (参考文献 18)

(4) 膜状凝縮モデル (Film)

格納容器内の壁面のような熱構造物とは異なり、液相で浸されている濡れ面（配管内部など）に対しては、膜状凝縮モデルを適用する。このモデルでは膜状凝縮のみならず、周辺の流体との单相熱伝達及び沸騰も模擬可能である。凝縮のモデルは内田と Gido-Koestel の組み合わせ、或いはそれらの最大値が適用される。

その他、GOTHICコードによるモデル化で考慮される事項は以下の通りである。

- ・ 溶融炉心デブリによる輻射は、ソースタームとして境界条件で考慮する。
- ・ 格納容器外面での大気との熱伝達の影響は模擬しない。
- ・ ヒートシンクモデルは、表面における流体・空間からの伝熱を内部の熱伝導モデルに渡す。

格納容器本体及び構造物内部の伝熱は平板体系（場合によっては円柱或いは円筒）により模擬される。即ち、構造物の厚さ方向に離散化された体系において1次元熱伝達方程式が数値的に解かれ、構造物内の温度分布が求められる。熱伝導の計算においては、厚さ方向に分割した層ごとの密度・熱伝導率・比熱が入力データとして与えられる。厚さの分割は、計算における温度拡散の強度に従い設定する。

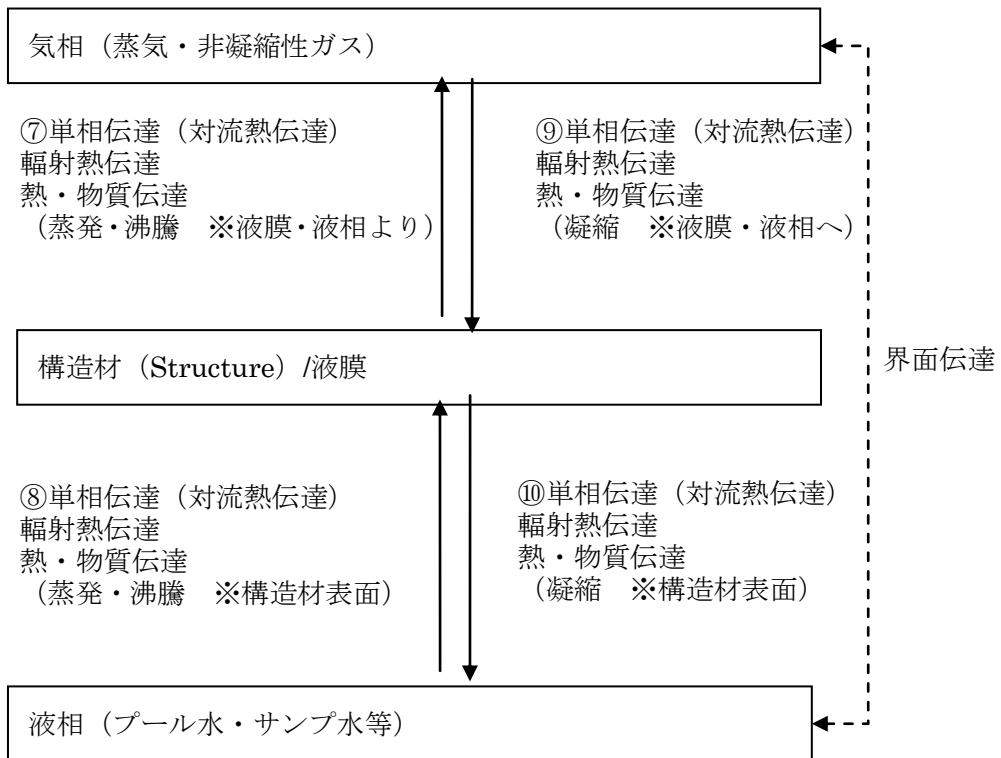


図 3-5 流体と構造物の相互作用 (構造材表面における熱・物質伝達)

3.3.3. スpray冷却

3.3.1章（2）における気液界面の熱伝達のうち格納容器内の全体的な圧力に大きく影響するスプレイ冷却は、分散液滴を考慮する3流体モデルを採用することから、スプレイ液滴を独自の流体場として、質量・エネルギー・運動量の保存則において考慮する。スプレイの模擬にあたっては、ノミナルパラメータ（液滴径及び流量、温度）が入力により与えられる。スプレイモデルが設定されるノードでは、設定されたスプレイ液滴がノード内に分散すると仮定され、通常、重力に従って落下する動きとなる。また、パスを用いてスプレイ液滴の流れ方向を定義することもできる。スプレイによる流体の冷却及び凝縮は、気液界面の熱伝達、流体の相変化は、相間の運動量交換とともに、界面積、界面熱伝達、界面抗力からなる構成式により模擬される。構成式について、集中定数系ボリュームでは Pool/Drop 流動様式が、分布定数系においては以下に示される流動様式が考慮される。

- Pool
- Small Bubble
- Large/Small Bubble
- Churn-Turbulent
- Film/Drop
- Single Phase Vapor

流動様式はノードのボイド率等に判定され、また、同様にパスに対しても適用される。相間の自由対流熱伝達、強制対流熱伝達及び混合領域に対しては以下のモデルが適用される。

- Dittus-Boelter
- McAdams
- それらの混合効果

蒸気の凝縮においては、熱・物質伝達間のアナログを考慮する機構論的なモデルが具備されている。また、コードは3流体を考慮することから、対向流及び気相中の分散液滴を陽にモデル化することができる。

3.3.4. 格納容器内の水素発生

実機プラントの解析では、水素の発生源として以下を考慮する。

- 炉内でのジルコニウム-水反応による水素発生
- 格納容器内での溶融デブリによる水素発生
- 格納容器内での放射線水分解による水素発生
- 格納容器内での金属腐食による水素発生
- 格納容器内でのヒドラジン分解による水素発生

いずれについても、MAAPコードによる解析結果に基づいて時刻歴の水素発生量が評価され、

境界条件としてGOTHICコードに与える。発生する水素は、3ループプラントの場合、大破断LOCA+ECCS注入失敗において、以下の区画に放出されるものとしている。MAAPとGOTHICで水素放出先のノード分割が異なる場合は、ノードの体積による重みで放出量を分割している。

<炉内及び溶融デブリによる水素発生>

- ・破断口が存在する区画（SG室）
- ・加圧器逃しタンクのラプチャディスクが存在する区画（SG室）
- ・RV破損口存在区画（RVキャビティ）

<放射線水分解、金属腐食、ヒドラジン分解による水素発生>

- ・オペレーションフロア以下の各区画

なお、境界条件は時系列による水素の放出質量流量、圧力及び温度である。流量に対しては後述するように補正を行っている。適用する圧力及び温度は、炉心から発生する水素に対してはMAAPの計算結果によるもの、それ以外については発生量算出の時点で参照したMAAP結果を使用している。

3.3.5. 水素処理

実機プラントの解析では、水素処理設備の特性を模擬し水素の再結合もしくは燃焼を化学的に解いた上で熱・流動の観点から周辺領域への影響を考慮した計算体系とする。具体的には、水素処理設備が広域なドーム部に設置される場合には、3次元的なノード分割を考慮した上で、水素処理設備の設置位置を定義する。また、下部区画等の1次元の或いは限定された範囲で等方的な流動が予想される位置に設置される場合は、単一の評価ボリューム内で水素処理設備による効果を考慮し、それが周囲に与える影響についてはボリューム間を接続するパスにより模擬される。

以降に、水素処理設備である静的触媒式水素再結合装置（PAR）、水素燃焼設備となるイグナイタについて説明する。

（1）PARによる水素処理

PARの性能評価式は製造元より提示されており、実証試験において試験結果との相関関係の確認が行われている。水素処理速度は再結合率の性能評価式に基づき、PAR設置場所における水素及び酸素の体積比、圧力の関数となる。触媒の反応度は温度に依存するが、触媒温度は水素濃度に、ガス温度は圧力に依存するため、評価式はこれらを含む形となる。また、PARの入口流量は、触媒温度（水素濃度に依存）と圧力によるため、入口流量を直接的なパラメータとする必要がないが、水素処理速度は圧力条件に制約される。水素の再結合率に係る性能評価式を以下に示す。

$$\gamma = \eta \cdot \min(\text{XH}_2, 2 \cdot \text{XO}_2, 8.0) \cdot (\text{A} \cdot \text{P} + \text{B}) \cdot \tanh(\text{XH}_2 - 0.5)$$

ここで、

γ : 再結合率 (g/s)

η : 1.0 ($\text{XO}_2 > \text{XH}_2$)

XH_2 : 水素体積比 (%)

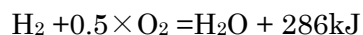
XO_2 : 酸素体積比 (%)

P : 圧力 (MPa)

A, B : 係数

A 及び B は試験結果に基づき設定される係数となる。

また、PAR では水素の再結合により、以下のように量論的に化学反応熱が発生するが、この発生熱は GOTHIC コードにおいて考慮される。



GOTHIC コードでは、PAR が設置されるノードの水素及び酸素の体積比、圧力が性能評価式の入力として与えられ、性能評価式に基づいて再結合率、即ち、ノード内の水素処理速度が計算される。計算された水素処理速度に基づき発生する化学反応熱量が計算され、当該ノードの雰囲気への熱源として考慮される。

(2) イグナイタによる水素燃焼

GOTHIC コードに組み込まれるイグナイタモデルについて説明する。イグナイタへ通電されると、その表面部が 900°C まで上昇することで、周囲空気温度を水素の自己発火温度である約 560°C まで上昇させ、イグナイタ周囲の水素を自己燃焼させる。イグナイタ周囲の水素が燃焼する

ことで、さらにその周囲の水素も火炎伝播によって燃焼し、瞬時に格納容器内の水素濃度を低下させる効果が期待できる。

GOTHICコード内において水素燃焼を模擬する場合、対象となるボリュームの種別に応じ適用される燃焼モデルが異なる。集中定数系においてはHECTRコードと同様なモデルを使用する。これは、ガスの状態がクライテリアに適合した場合に、対象区画における一定割合の水素が燃焼するとし、パスを經由して隣接区画に燃焼が伝播するものとする **Discrete Burn Model** と、外からの水素供給に基づき燃焼が継続する **Continuous Burn Model** による。**Discrete Burn Model** はイグナイタによる着火で区画燃焼が生じるとする。**Continuous Burn Model** では、イグナイタによる燃焼判定によらず自然着火のみの模擬に対し使用するが、パスを經由した隣接区画への燃焼伝播は評価されない。分布定数系においては、機構論的な燃焼モデルが適用される。これは、対象セルの気相成分（水素及び酸素濃度）及び乱流要素により層状或いは乱流燃焼のうち最大のものが生じるとするものである。

図 3-7に水素濃度に応じたイグナイタによる火炎伝播挙動を示す。水素濃度が4%から可燃限界に入り、約4%から6%では火炎は上方伝播のみ、約6%から8%では上方と水平に伝播、約8%以上で下方伝播も起きる。このため、水素濃度が約8%未満ではイグナイタより高い領域が燃焼し、8%以上では区画全体に火炎が広がる。また、水素濃度と希釈ガス濃度から水素の燃焼火炎速度が計算される。水素濃度が低い場合には、火炎は上方にしか伝播しないが、水素濃度が高まるにつれて水平方向への火炎伝播が生じ、ついには下方への火炎伝播が生じることを模擬している。

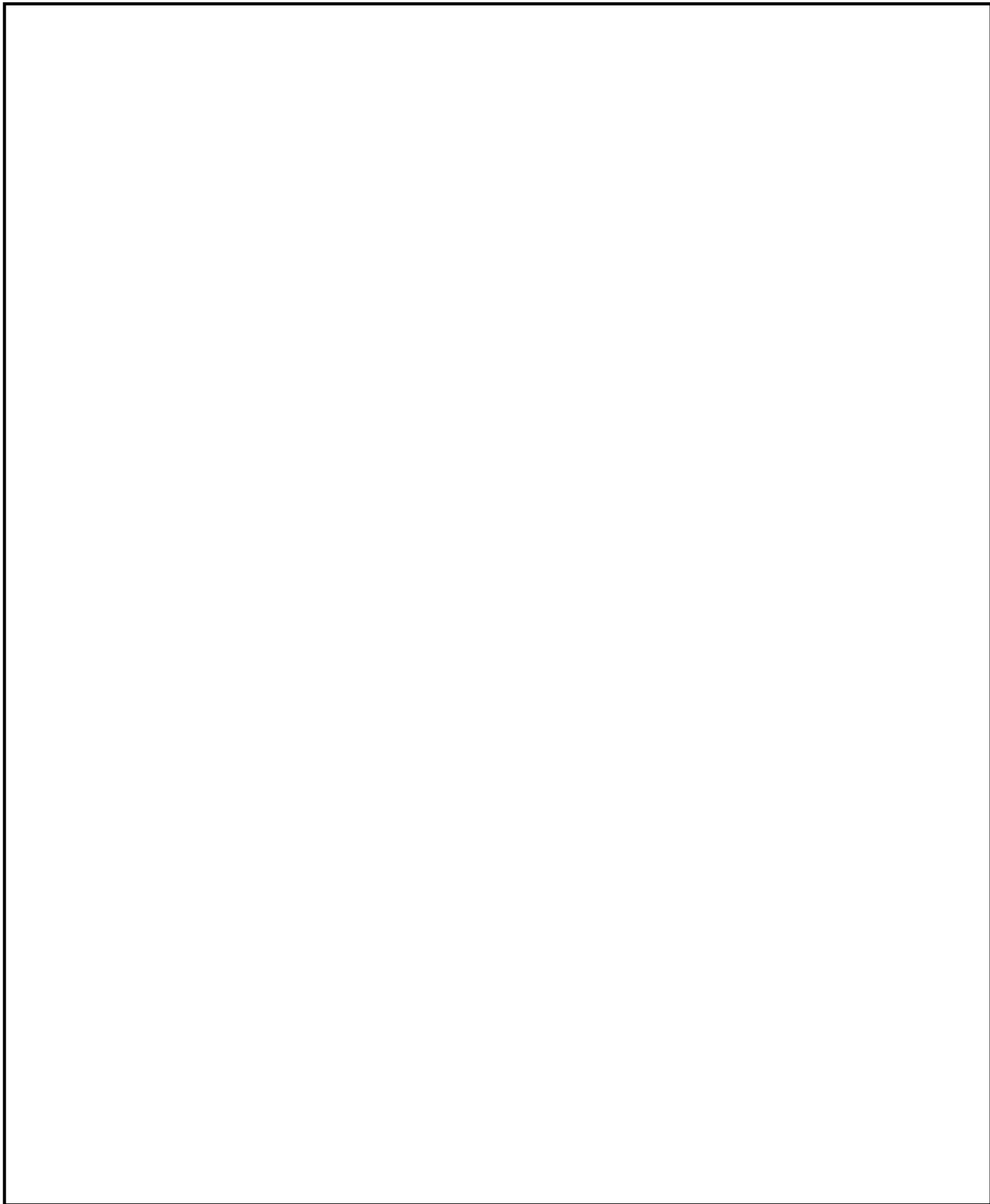
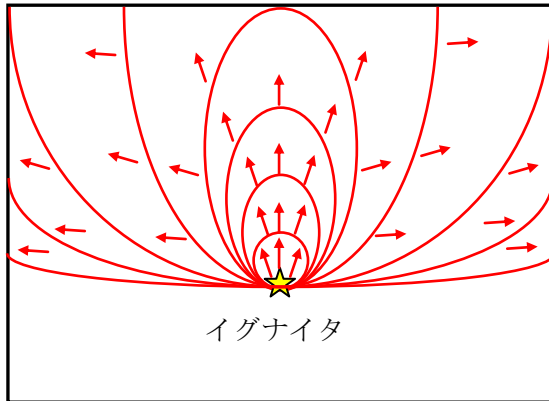


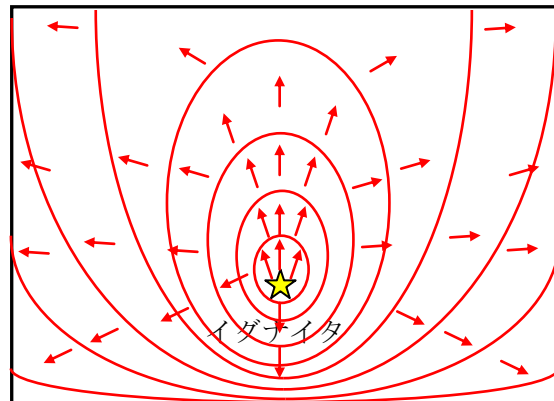
図 3-6 PAR組み込みロジック

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

(6% ≤ 水素濃度 < 8%)



(8% ≤ 水素濃度)



[補足] 火炎伝播の方向

- 4% ≤ 水素濃度 < 6% : 上方のみ
- 6% ≤ 水素濃度 < 8% : 上方・水平
- 8% ≤ 水素濃度 : 上方・水平・下方

図 3-7 イグナイタによる水素燃焼挙動

3.4. ノード分割

有効性評価における実機プラントのノーディングスキームは、形状、模擬する物理現象の強度、数値計算上の必要条件により基本的な分割を定める。



GOTHICコードによる空間の模擬に対し適用する解法には集中定数系及び分布定数系があり、それらの比較を表 3-3に示す。集中定数系で考慮できるものは、基本的に分布定数系によっても模擬可能である。

プラントノーディングを図 3-8から図 3-11に示す。なお、ノード分割は想定される物理現象及びその模擬の要否、数値計算上の扱い等によって検討すべきものであり、解析により得られる結果がこの分割方針により大きく変わることがないようにする必要がある。

また、想定する事故シーケンスによって支配的な現象が異なる場合などは、その模擬の必要性に応じて分割手法を見直す必要が生じることがある。

解析では、原子炉からの冷却材と水素の放出源としてループ室の破断口に境界条件が設定される。また、原子炉圧力容器の破損による放出についても同様に、境界条件としてキャビティ室に設定される。これ以外で、放射線水分解及びヒドラジン分解、格納容器内の金属腐食に伴う水素発生に関しても、それぞれの箇所において境界条件により模擬している。同様に水素の重要事故シーケンスとして想定される事象では格納容器スプレイに期待することから、スプレイモデルを設定し、ドーム部の各ノードに境界条件として設定される。実機解析全体の評価の流れ及びインプット・アウトプットの関係を図 3-12に示す。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 3-3 集中定数系と分布定数系の比較

項目	集中定数系ノード	分布定数系ノード
特徴	ノード内の物理諸量を平均値として表す。他ノードとの流体の伝播はパスにて模擬され、移流慣性はパスで考慮されるが、ノード内では瞬時に一様に拡散・混合する。	ノード内をサブノードに詳細分割し、ノード内の物理諸量の空間・時間変化を模擬。集中定数系ノードとパスで接続することができる。流体の対流・乱流を模擬することができる。
適用例	格納容器下部区画	格納容器ドーム部
保存式	質量保存側 エネルギー保存側 運動量保存側 (いずれも流体場である気相・液相・液滴相に対し考慮)	質量保存側 エネルギー保存側 運動量保存側 (いずれも流体場である気相・液相・液滴相に対し考慮)
流動様式	Pool/Drop	Pool, Small Bubble, Large/Small Bubble, Churn-Turbulent, Film/Drop, Single Phase Vapor
構造材と流体の熱伝達	流体と構造物表面との間の、単相、輻射、凝縮熱伝達が考慮される。	流体と構造物表面との間の、単相、輻射、凝縮熱伝達が考慮される。
乱流モデル	使用しない	k-εモデルなど
数値解法	ノード-パス	有限体積における差分法 (スタッガード格子)

表 3-4 ノード分割の考え方

対象区画	ノード分割の考え方
全体的な考え方	
ドーム	
下部	
水素処理設備	

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

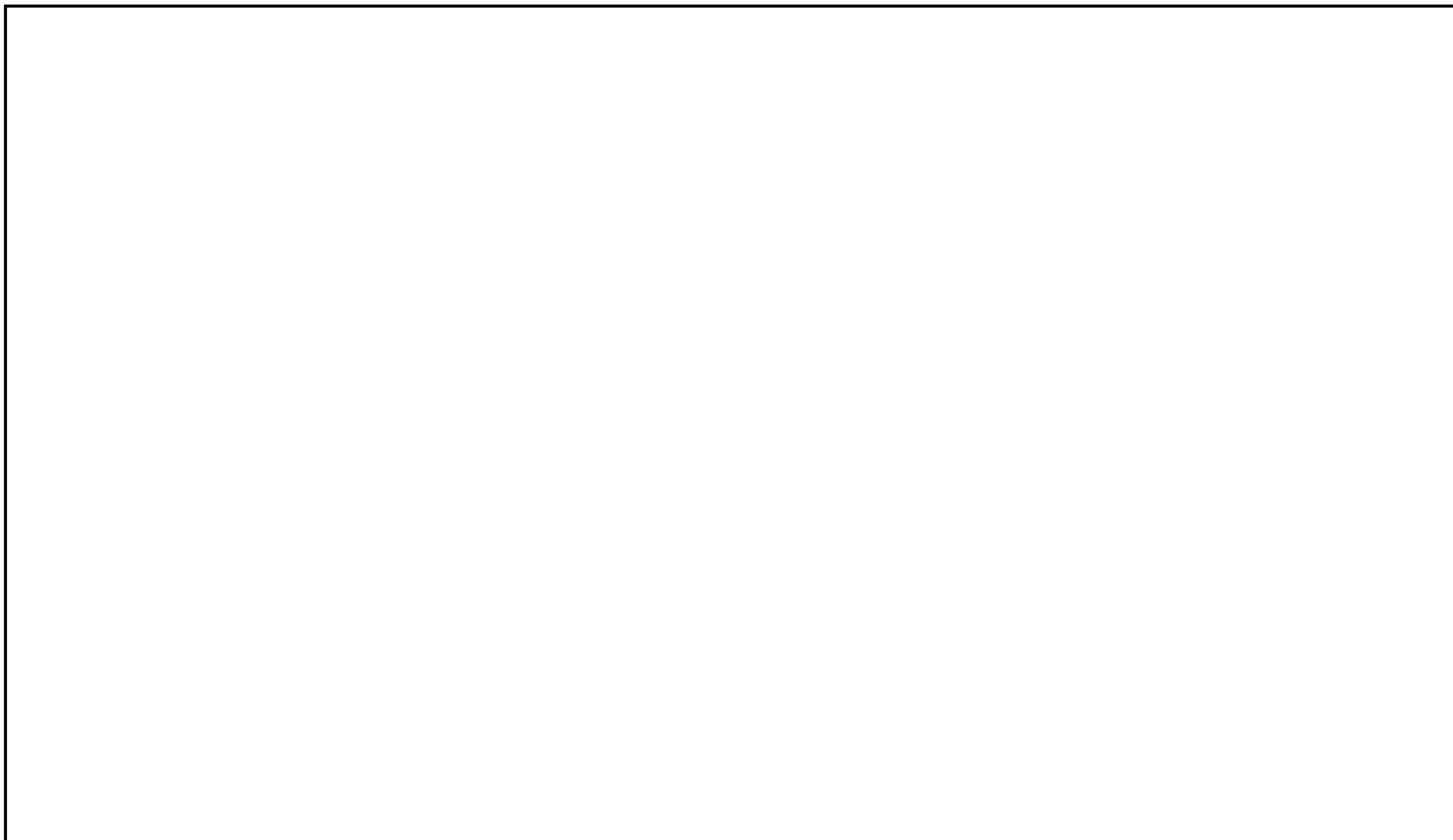


図 3-8 GOTHICコードによる水素濃度評価解析ノード図と実機プラントの対応（3ループプラントの例）

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

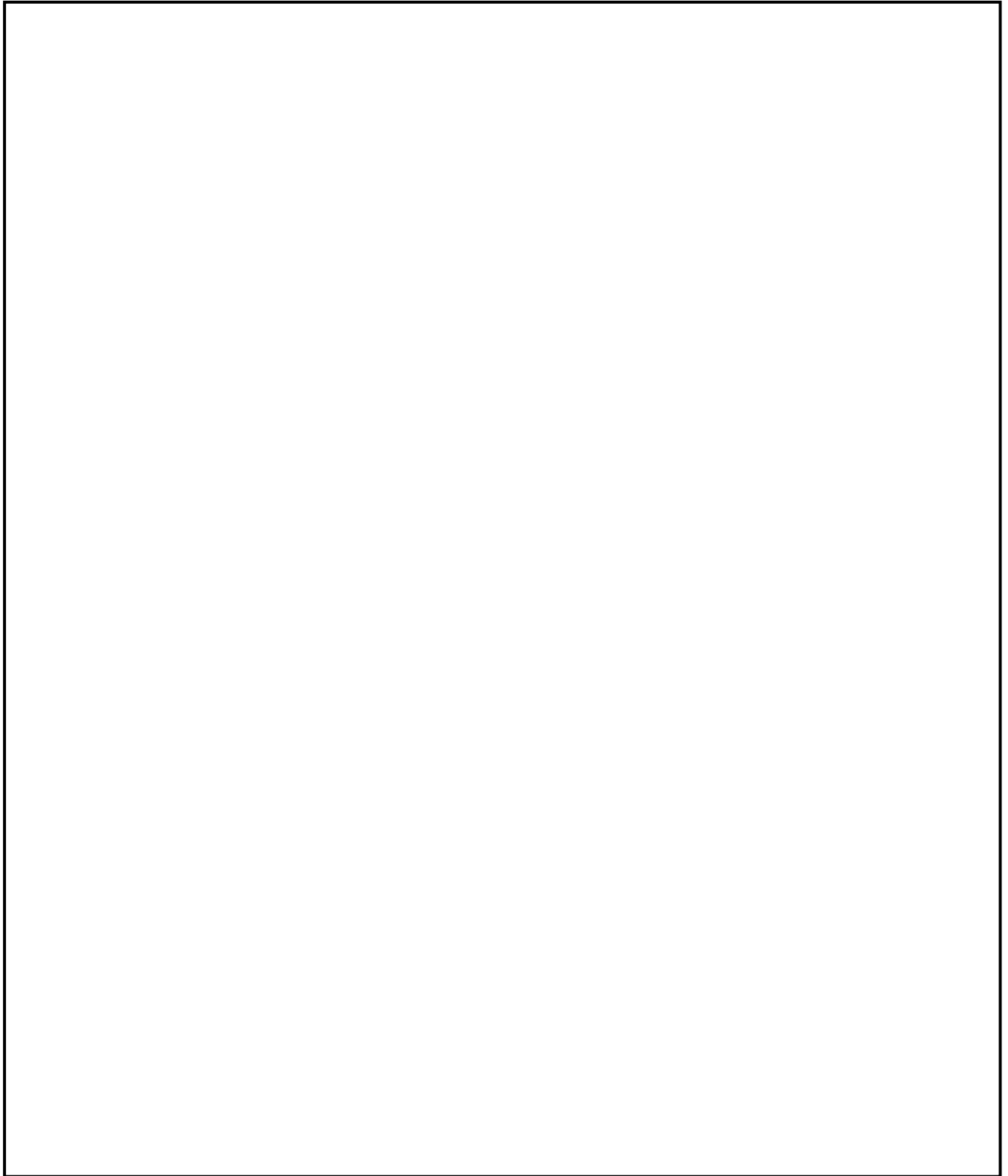


図 3-9 GOTHICコードによる水素濃度評価解析ノード図 (代表3ループプラント)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

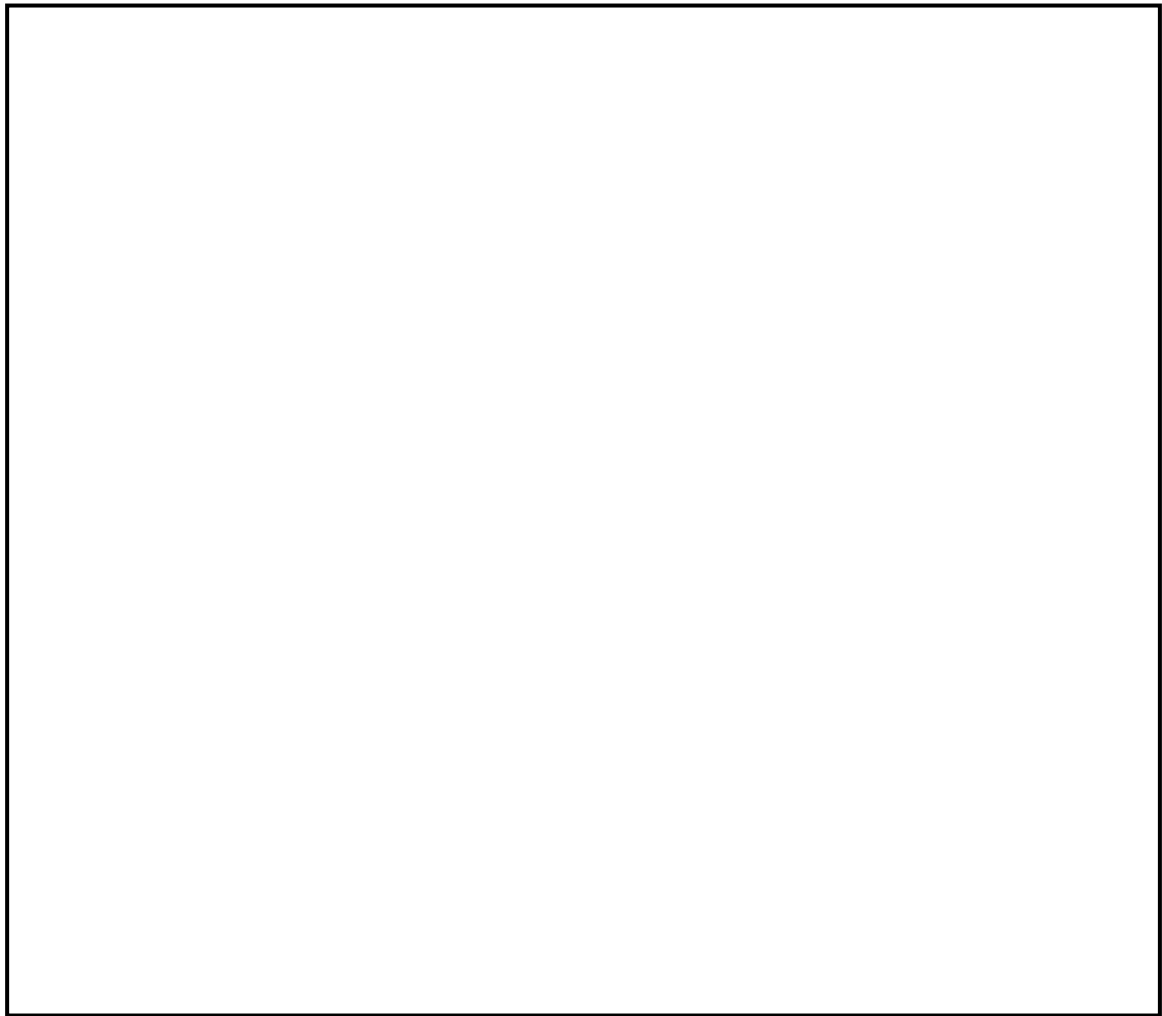


図 3-10 GOTHICコードによるドーム部ノーディング例（代表3ループプラント）

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

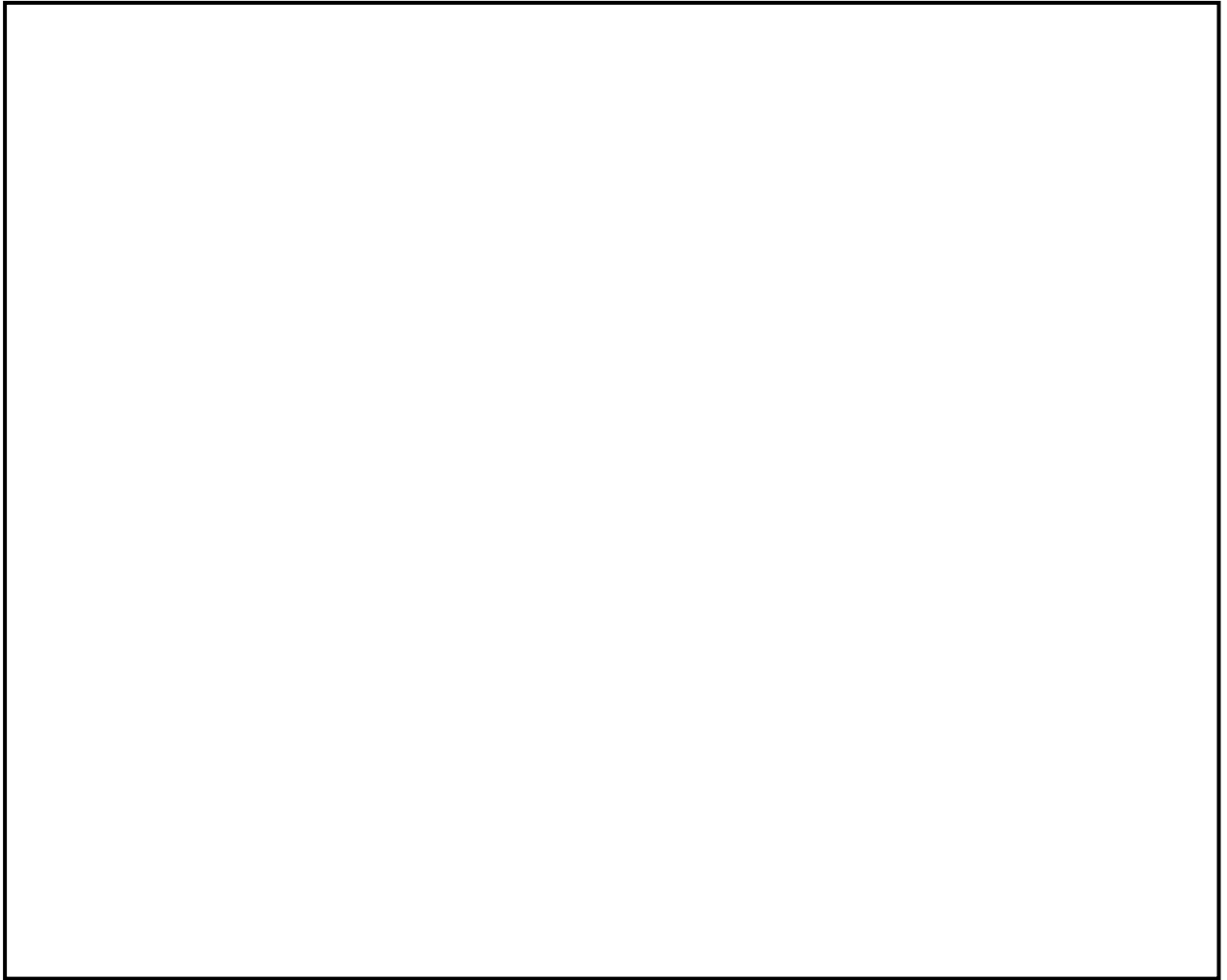


図 3-11 GOTHICコードによるドーム部ノーディング例（代表3ループプラント）付番詳細

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

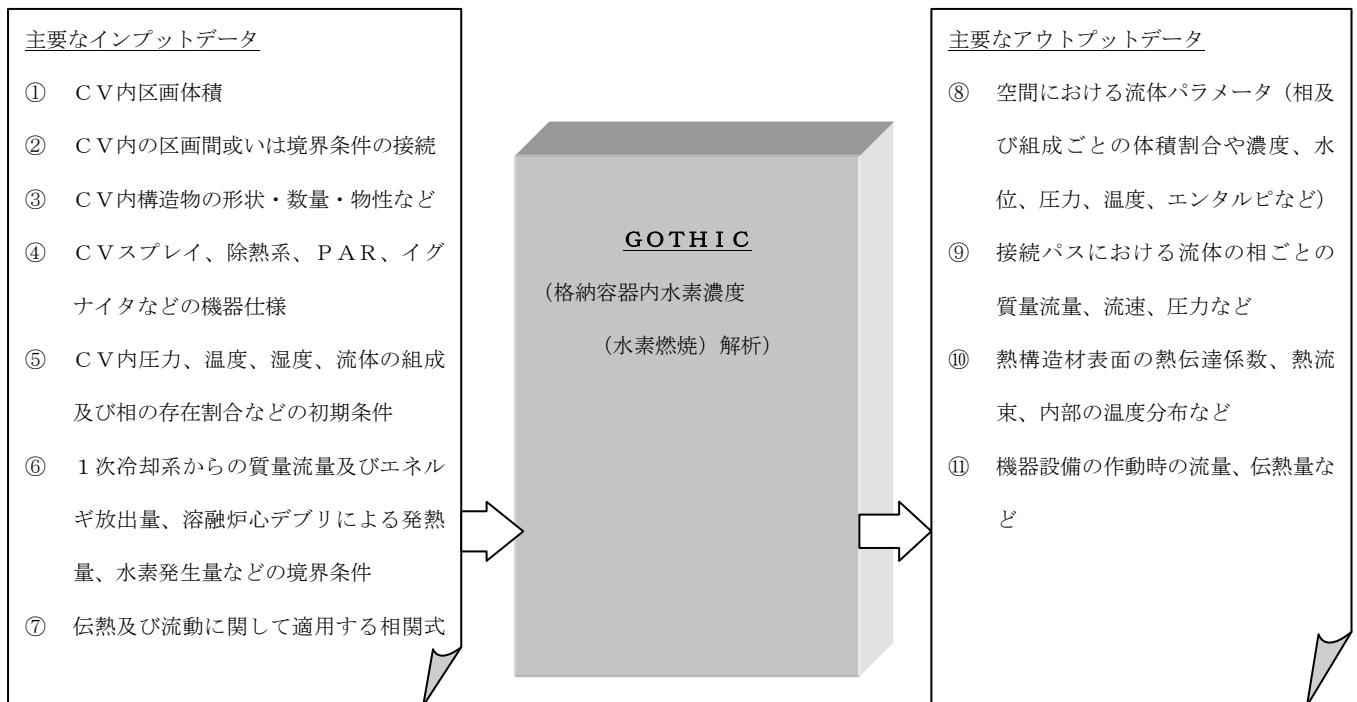
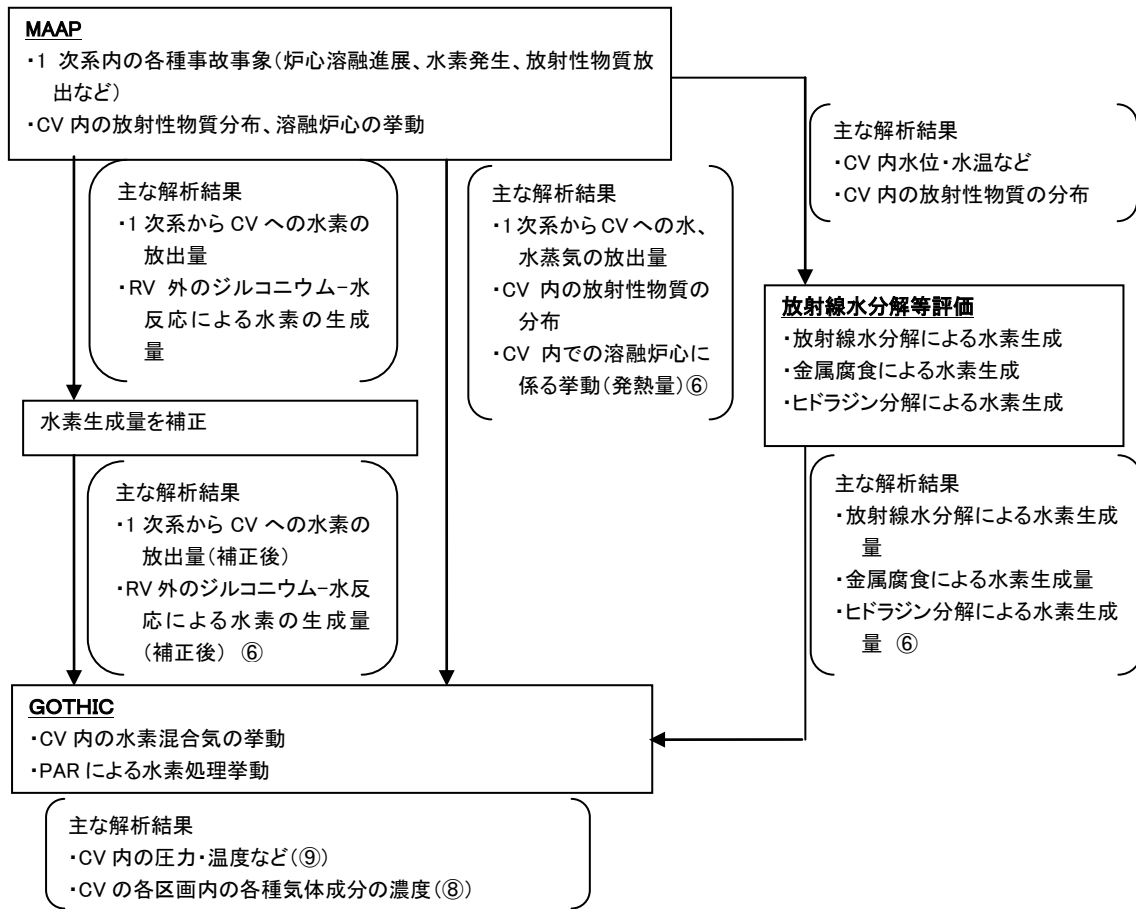


図 3-12 実機プラントにおける格納容器内水素濃度評価の概要

3.5. 入出力

GOTHICコードによる水素濃度評価の入出力を図 3-12に示す。また、主要なインプットデータは以下の通り構成される。インプットデータの元となる「原子炉格納容器関連データ」、「事象収束に重要な機器・操作」等を整理した解析条件を添付 1 に示す。

- ① CV内の区画体積及びそれに係る諸元（高さ、水力等価径など）
- ② CV内の区画間或いは境界条件の接続に係る諸元（断面積、水力等価径など）
- ③ CV内構造物の形状・数量・物性など
- ④ CVスプレイ、除熱系、PAR、イグナイタなどの機器仕様
- ⑤ CV内圧力、温度、湿度、流体の相及び組成の存在割合などの初期条件
- ⑥ 1次冷却系からの質量流量及びエネルギー放出量、溶融炉心デブリによる発熱量、水素発生量などの境界条件
- ⑦ 伝熱及び流動に関して適用する相関式及び流体場に対し有効とする項目の指定（熱伝達相関式、流動様式など）

上記をインプットデータとして過渡解析を実施し、以下のアウトプットデータを得る。

- ⑧ 空間における流体パラメータ（相及び組成ごとの体積割合や濃度、水位、圧力、温度、エンタルピなど）
- ⑨ 接続パスにおけるパラメータ（流体の相ごとの質量流量、流速、圧力など）
- ⑩ 熱構造材の熱的パラメータ（表面の熱伝達係数、熱流束、内部の温度分布など）
- ⑪ 機器設備の作動パラメータ（流量、伝熱量など機器の諸量に係るものと作動状況など）

4. 検証／妥当性確認

GOTHICコードの水素分布解析に対する適用性を以降に示す。

4.1. 重要現象に対する検証／妥当性確認方法

GOTHICコードの評価マトリックスを表 4-1に示す。表 4-1では、評価対象となる現象のうち「H」ランクとなるものを列挙している。各実験解析・実機解析の内容について要約を4.1.1章から4.1.5章に示す。なお、水素生成については、MAAPコードによる解析結果に基づいて、時系列の境界条件としてGOTHICコードに与えられることから、GOTHICコードの妥当性確認の対象外とする。

表 4-1 評価マトリックス

	NUPEC 試験解析 M-7-1	NUPEC 試験解析 M-4-3	熱伝達試験との比較※	熱伝導解析解との比較	PAR 特性検証	イグナイタによる 水素燃焼モデルの検証	関連モデル
区画間・区画内の流動	☒ 4-8 ～ ☒ 4-12	☒ 4-13 ～ ☒ 4-16	—	—	—	—	保存式モデル 流動を模擬する構成式及び相 関式 非凝縮性ガスの輸送モデル ノーディングスキーム(空間離 散化モデル)
構造材との熱伝達及び内 部熱伝導			☒ 4-29 ～ ☒ 4-30	☒ 4-31	—	—	多相流モデル 熱伝達モデル(自然/強制対流、 輻射、凝縮) 熱伝導モデル
スプレイ冷却		—	—	—	—	—	多相流モデル 界面積モデル 界面熱伝達モデル(凝縮では相 変化アナログを考慮)
水素処理		—	—	—	—	☒ 4-32 ☒ 4-33 ☒ 4-44 ☒ 4-45	表 4-7 PAR 特性モデル イグナイタによる水素燃焼モ デル

※ 複数の試験による凝縮熱伝達モデルの実験検証。

4.1.1. NUPEC試験解析

NUPEC試験は、実機プラントのシビアアクシデント時に発生する水素の代替としてヘリウムガスを用いた非凝縮性ガスの拡散・混合挙動に関する総合効果試験である。ここでは、水素燃焼評価に対する重要事故シーケンスとなる大破断LOCA+ECCS失敗を想定し、評価で重要となる区画間・区画内の流動、構造材との熱伝達及び内部熱伝導、スプレイに係るモデルを中心としたコードの水素濃度予測に係る性能について検証を行い、GOTHICコードが実機プラントの解析に適用できることを確認する（Test M-7-1）。また、NUPEC試験ではスプレイなし条件（Test M-4-3）でも実験がなされており、これらに対するコードの適用性についても確認し、スプレイ/蒸気放出が評価結果に与える影響を検討する。

4.1.2. 熱伝達試験との比較

構造材との熱伝達及び内部熱伝導に係るモデルのうち、実機プラント解析に用いられる構造材表面の熱伝達モデルについて、解析予測と各種試験データとの比較を行った。実機プラントの解析ではGido-Koestelモデルと内田モデルの最大値に保守性を考慮することで、ウェット条件に換算した水素濃度を保守的に見積もるアプローチを採用する。ここでは、広範に渡り適用される内田モデルの試験データに対するバラつきを確認する。

また、前述のNUPEC試験解析では、コードの流動に係る模擬性を適切に評価することから、より最適予測性の高いDiffusion Layer Model FM（DLM-FM）を適用している。各種試験に対する同モデルの予測性能についても確認する。

4.1.3. 熱伝導解析解との比較

構造材との熱伝達及び内部熱伝導に係るモデルのうち、内部熱伝導に係るモデルについて検証した。具体的には、コードによる数値計算が解析解を適切に再現することを確認し、同モデルがコード内に適切に組み込まれていることを検証する。

4.1.4. PAR特性検証

水素処理設備のうち、シビアアクシデント対策として設置される静的触媒式水素再結合装置（PAR）について、設備製造元が供給する水素処理性能評価式が、コードに適切に組み込まれていることを検証する。

PARの特性が適切にコードに組み込まれている点に対しては、理論値とコードの予測値を比較する。

また、実機プラント解析に際し、空間の分割手法などの点からPARの性能曲線の適用可否に対しては、THAI試験においてノード分割を変更した実験解析により検証を行う。

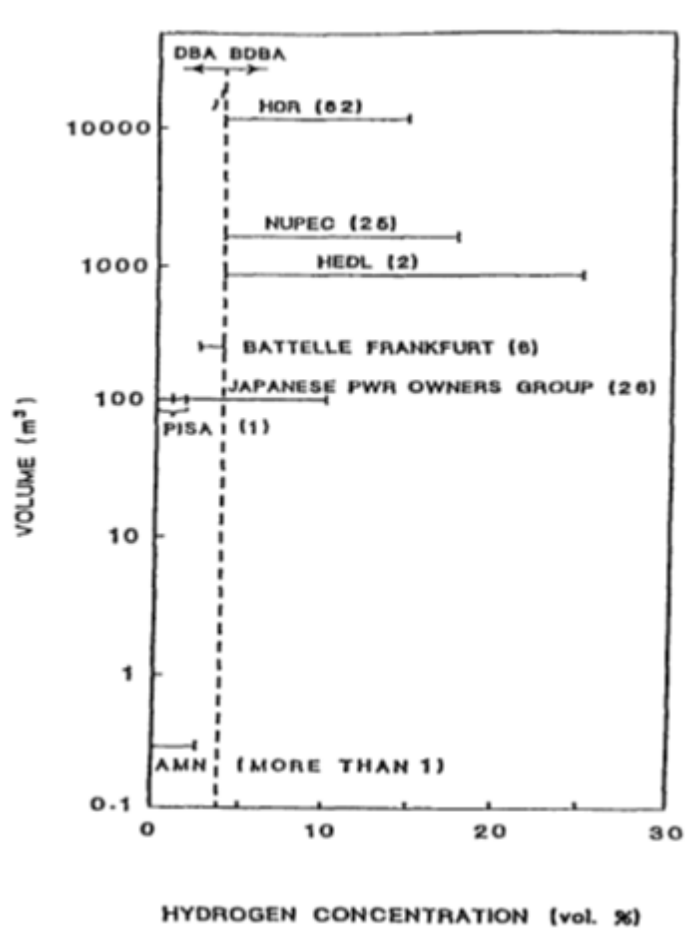
4.1.5. イグナイタによる水素燃焼モデルの検証

水素処理設備のうち、イグナイタによる水素燃焼モデルについて、コード内モデルの妥当性検証を示す。

4.2. NUPEC試験解析

NUPECで実施された格納容器挙動試験（参考文献 20、21、22）では、格納容器内で形成される非凝縮性ガスと空気の密度差による自然循環試験、放出水蒸気及び格納容器スプレイによる可燃性ガス濃度分布・混合挙動試験などの35試験が実施された。実機で想定される非凝縮性ガスは水素となるが、本試験では代替ガスとしてヘリウムを用いている。NUPEC試験と他機関で実施された試験との比較を図4-1に示す。

ここでは、重要事故シーケンスとなるLOCA時のECCS失敗を想定したTest M-7-1を選択する。Test M-7-1はOECD/NEAのISP35に採用されており、海外10か国、15機関にて確認解析が実施されている。また、スプレイを仮定しないシーケンスとなるTest M-4-3についても解析を実施し、スプレイ有無がコード予測性に与える影響について確認する。



出典：OECD試験レポート

図 4-1 濃度分布・混合挙動試験の規模と水素濃度範囲

4.2.1. NUPEC試験設備

NUPEC試験設備の概要図を図 4-2及び図 4-3に示す。また、格納容器スケール設備、ガス放出設備等の主要な試験設備を以下に示す。

(1) 格納容器

格納容器はドライ型4ループPWRの1/4規模であり、4ループ相当の区画が模擬されている。自由体積は1300m³である。

(2) ガス放出設備

試験は安全性の観点から水素ガスの代わりにヘリウムガスが使用されている。

(3) 格納容器スプレイ

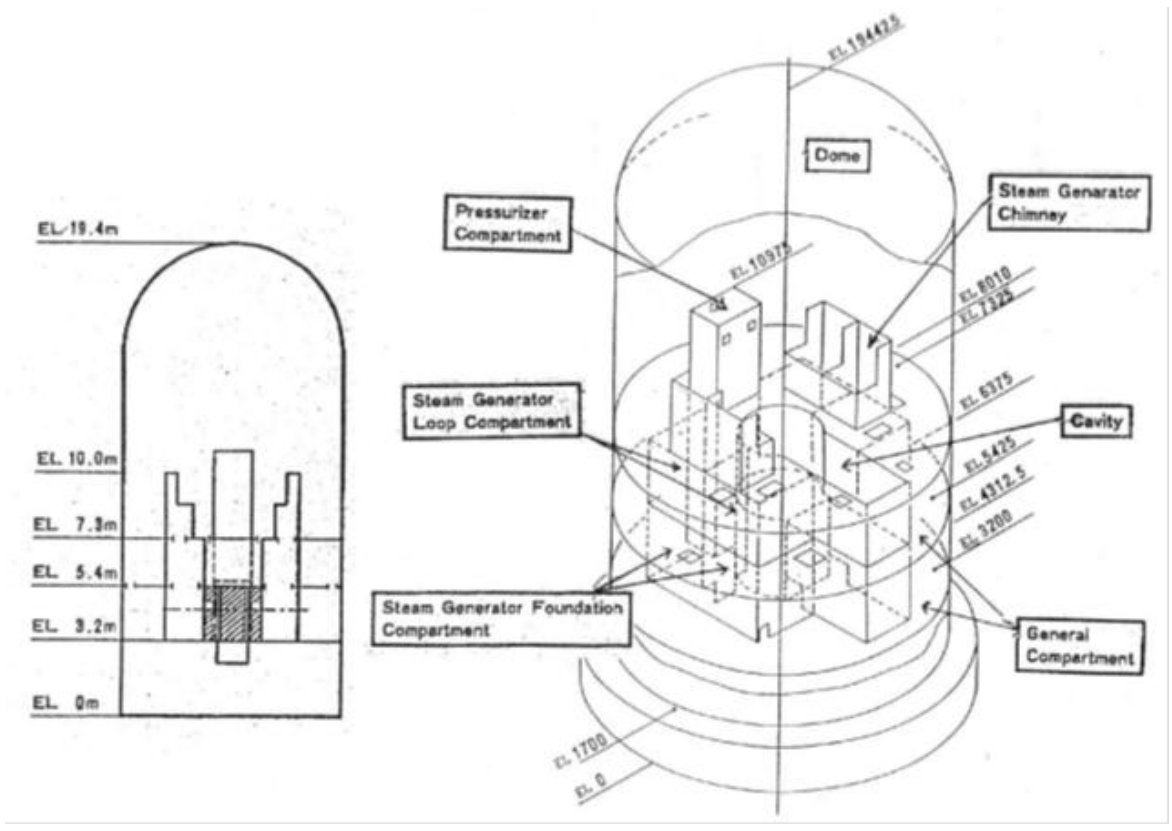
格納容器全体をカバーするため合計21個のスプレイノズルが設置されている。スプレイ液滴径は約0.75mmである。

(4) 蒸気供給設備

配管破断時の放出蒸気を模擬するため蒸気供給設備を設けている。

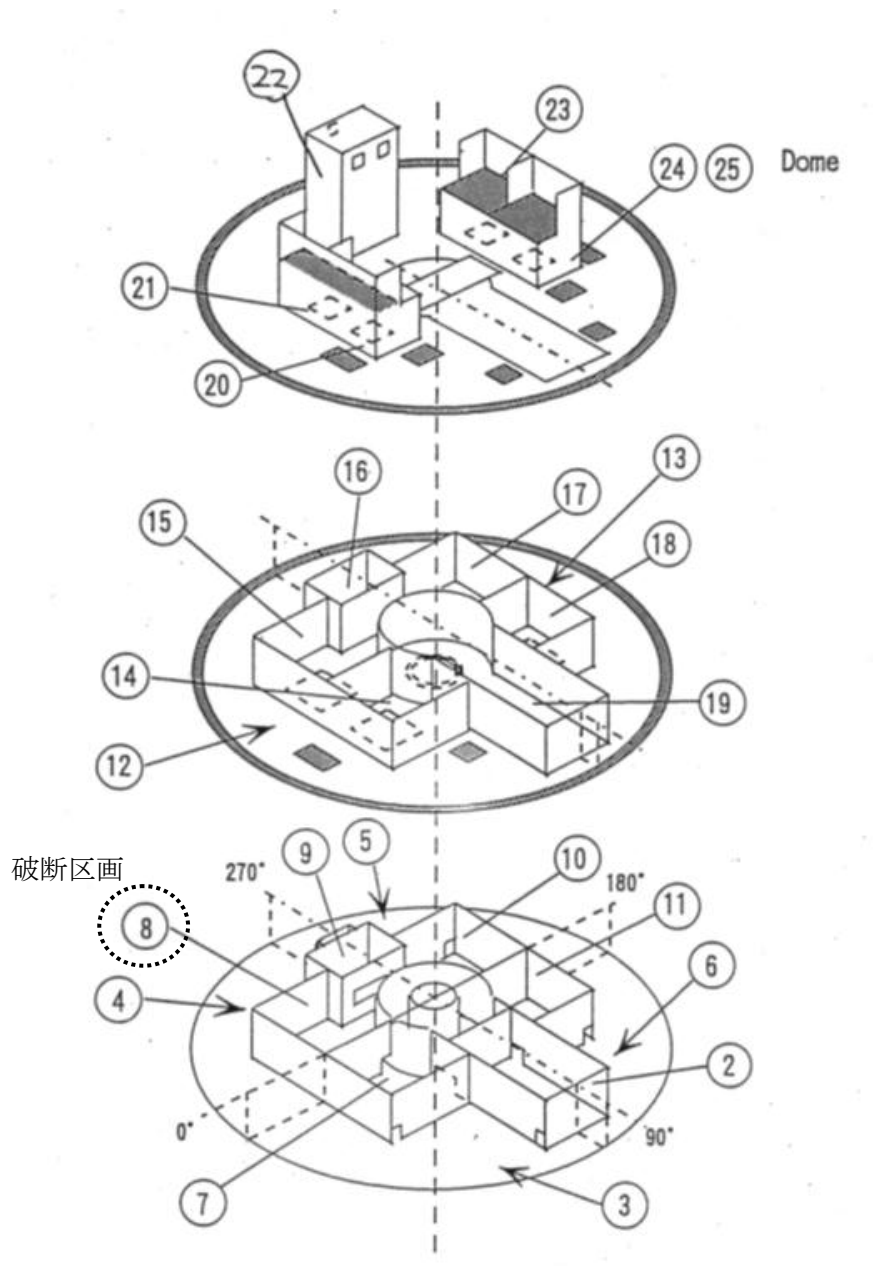
(5) 計測設備

ヘリウム濃度、雰囲気温度、圧力、格納容器壁面温度、区画壁面温度が計測されている。ヘリウム濃度は、図 4-4に示すとおり、格納容器内の5か所(ドーム頂部(赤線、EL.19.4m)及びドーム上部4か所(青線、EL.16.7m))に設置されたサンプリングチューブにより計測される。圧力は区画間圧力損失が微少であることからドーム部の圧力を代表して測定している。区画壁面温度及び空間温度は熱電対により計測している。



出典：EPRI Product 1013072, GOthic Qualification Report, Figure 16-1

図 4-2 NUPEC試験設備の概要図



出典：EPRI Product 1013072, GOTHIC Qualification Report, Figure 16-2

図 4-3 NUPEC試験設備内部区画の概要図

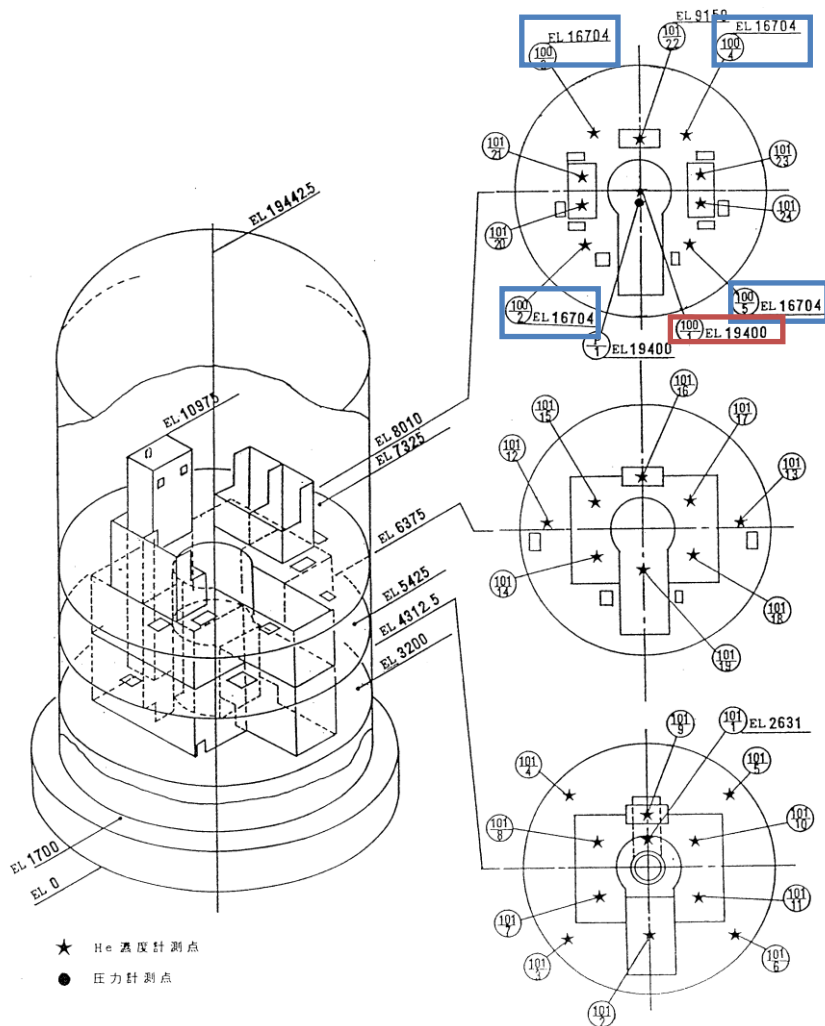
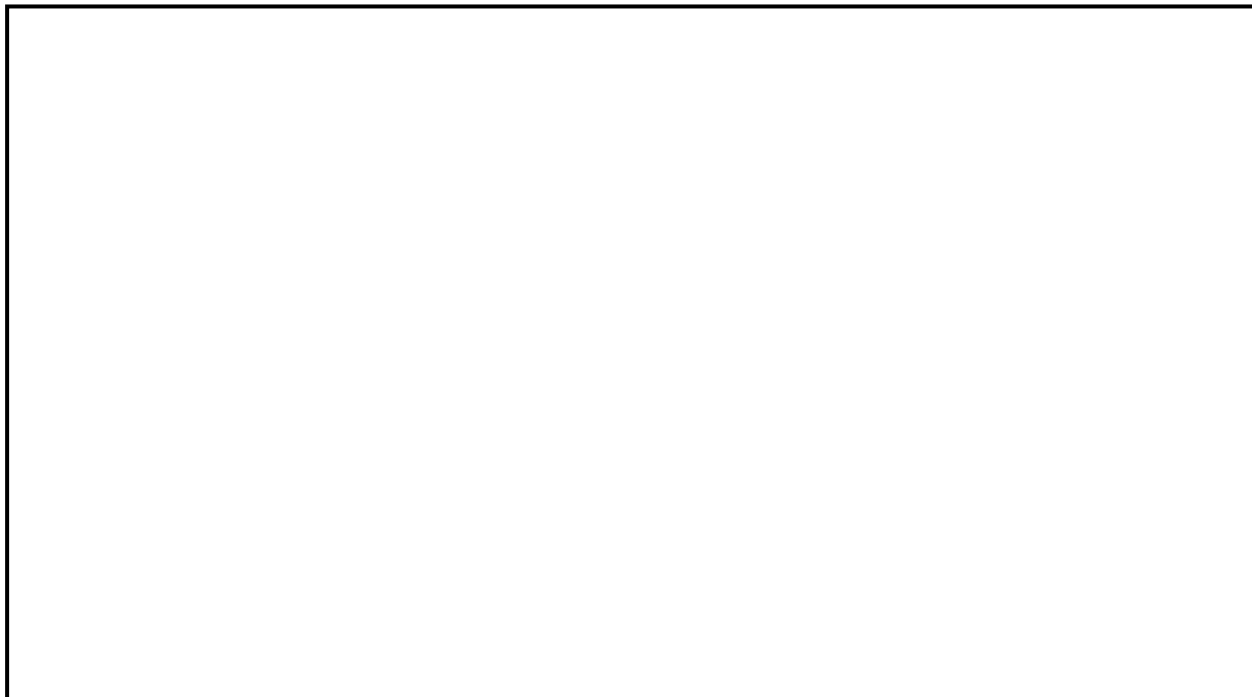


図 4-4 ヘリウム計測位置

4.2.2. 解析モデル



GOTHICコードによるNUPEC試験施設のノード分割モデルを図 4-5に、ドーム部の分割を図 4-6に示す。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

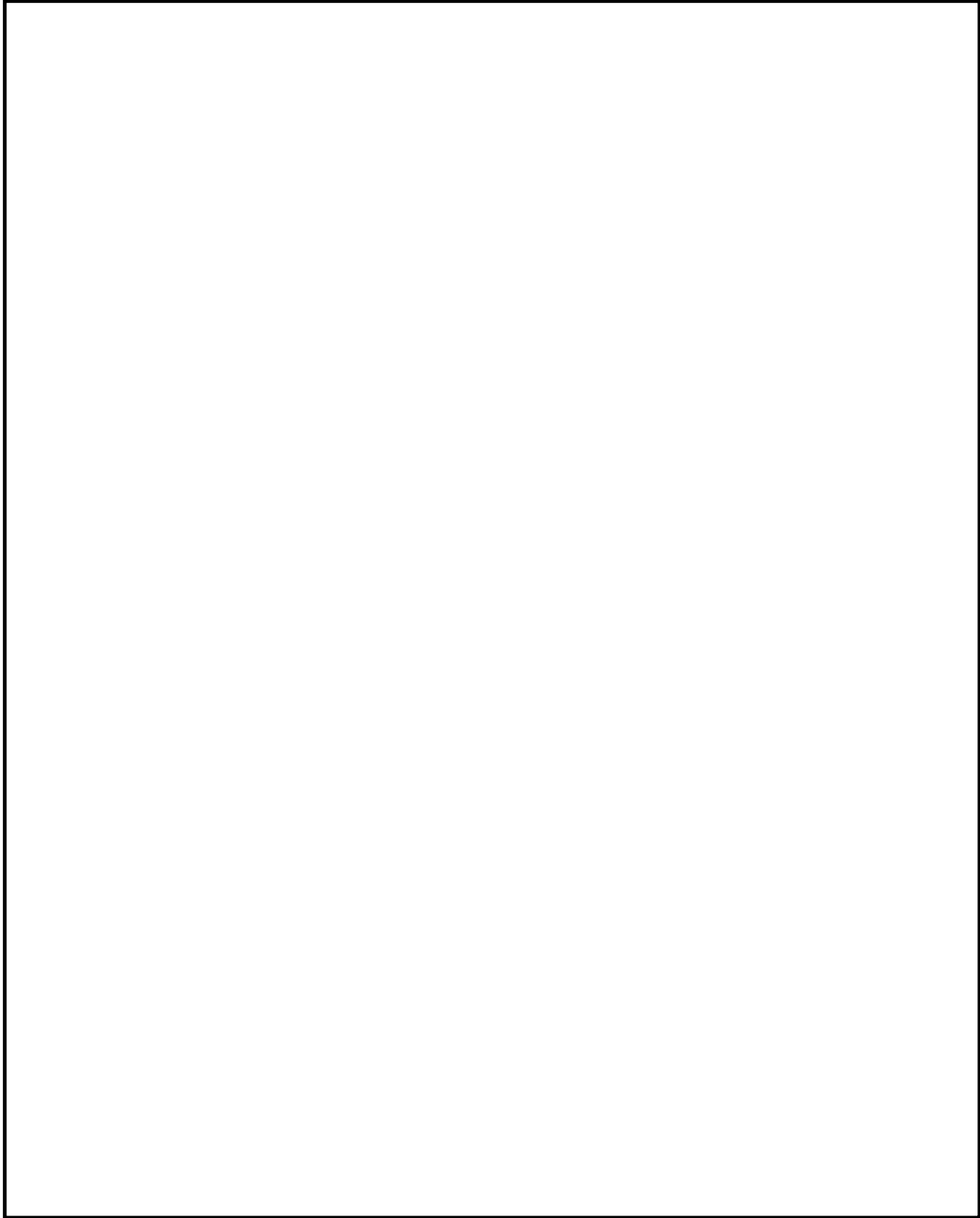


図 4-5 NUPEC試験(Test M-7-1) のGOTHICコードによるノード分割モデル

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。



図 4-6 格納容器ドーム部のヘリウム濃度測定位置と実験解析におけるノード分割

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

4.2.3. 解析結果

NUPEC試験の実験解析結果を示す。

4.2.3.1. Test M-7-1 (スプレイ/蒸気放出あり)

(a) 試験条件

Test M-7-1 の試験条件を表 4-2に示す。試験は蒸気発生器下部での配管破断を想定し、格納容器下部から水蒸気とヘリウムを放出すると同時に、格納容器スプレイを作動させる。初期温度設定のため蒸気放出による事前加熱を行った後、ヘリウム及び蒸気の放出、格納容器スプレイの作動を同時に行っている。ヘリウム及び蒸気の放出、格納容器スプレイの運転は30分間行われ、ヘリウムの放出は試験開始から15分間で0.03kg/sまで放出量を増加させたのち、以降の15分間で0.0kg/sまで放出量を減少させている。蒸気の放出は試験開始から30分間で0.08kg/sから0.03kg/sまで放出量を減少させている。格納容器スプレイは30分間19.4kg/s一定の放出である(図4-7参照)。

(b) 解析結果

(1) 格納容器圧力

GOTHICコードによる格納容器圧力の評価結果を図4-8に試験データと比較する。格納容器圧力は試験開始から10分後に約125kPaまで低下したのち、緩やかに上昇する。これは、格納容器スプレイの蒸気凝縮による圧力低下と、ヘリウム放出により非凝縮性流体が増加して熱伝達率が低下することによる圧力低下抑制効果の複合的な結果、及びヘリウム、蒸気放出による圧力上昇効果によるものであると考えられる。解析結果もこれら複合的な挙動をよく予測しており、試験とよく一致している。

(2) 格納容器雰囲気温度

格納容器ドーム部の雰囲気温度比較を図4-9に示す。試験結果としては、ドーム部頂部(EL.19.4m)とドーム上部4か所(EL.16.7m)で最も温度の低い結果を示しており、その温度差は最大で5℃程度に留まる。解析結果として、ドーム部頂部付近のノードとドーム上部近傍ノードでの雰囲気温度を同図に比較するが、試験データ程の温度差は現れない。即ち、解析結果は試験データに対して5℃程度の不確かさが残る。しかし、解析結果はドーム部の雰囲気温度の時間変化を良好に予測しており、コードは事象進展を適切に模擬していることが確認できる。

(3) 格納容器内のヘリウム混合(水素混合挙動)

配管からの放出位置上部(図4-3におけるノード21)及びドーム部(図4-3における

ノード 25) におけるヘリウム濃度の時間変化の比較を、各々、図 4-10及び図 4-11に示す。また、各 SG室及び外周部下部のヘリウム濃度に対して図 4-12に示す。

ヘリウムは破断流と同じく、放出位置(ノード 8) から上方に放出され、その上部領域(ノード 21) を抜けてドーム部(ノード 25) に到達する。この過程において、想定破断区画の上部から別ループの SG室(ノード 17) に横流れが生じ、そこから上方の SG煙突部(ノード 23) に至りドームに部放出される。

ドーム部においてはヒートシンク及びスプレイによる冷却により、他の 2 つの SG室上部及び外周部を経由し下降流が生じる。SG室上部(ノード 20 及び 24) からループ室(ノード 11 及び 7) に達した流れは、蒸気及びヘリウムによる上昇流に巻き込まれる形で想定破断区画(ノード 8) に再び集約される。ドームから外周部上部に向かう下降流はその下部区画(ノード 3~6) に達したのち、ループ室(ノード 7、8、10、11) に流れ込み、再び放出流量とともにノード 8 から上昇する。このように、破断口からの蒸気放出とスプレイによる循環流が形成され、ドーム部での水素濃度の成層化、また、格納容器の上部と下部の有意な水素濃度差は発生していない。

解析では、図 4-10に見られるように、放出位置上部(ノード 21) のヘリウム濃度が試験に比べ、900 秒以降一時的に低めに推移している。900 秒時点においては、放出されるヘリウム流量が減少に転じており、ヘリウム濃度の変曲点として現れる主因と考えられる。この時、試験ではノード 21 の濃度の変曲は顕著ではなく、解析結果は測定値と比較してヘリウム濃度を過小評価する傾向にある。解析においては、破断区画から上部区画へ向かう上昇流におけるヘリウムのプルームが崩れたような挙動が得られているものと考えられる。このため破断 SG 区画内でヘリウムが拡散し、破断区画及びその上部に位置する区画(いずれも区画 21 の下部に位置)において、隣接する Aループ SG等の隣接区画へのヘリウムの分散が多めに評価され、即ち、解析が破断区画から上方のみならず周辺へのヘリウムの移流を試験より大きく評価していることを示唆している。

図 4-11にドーム部の 5 か所に設置されたヘリウム濃度の計測結果(図 4-4参照) と、当該位置での GOTHICコードによる評価結果を示す。格納容器スプレイによる拡散効果があり、ドーム部ではヘリウム混合が促進され、試験終了時にはほぼ完全な混合状態となる。図 4-12のヘリウムの濃度の応答から分かるように、破断区画に放出されたヘリウムは、蒸気発生器室を経由してドーム部に流入し、ここでスプレイ及びヒートシンクによる凝縮により、流体は破断区画と分離された蒸気発生器室及び外周区画を下降する。このように、破断口からの蒸気放出とドーム部での蒸気凝縮が駆動力となり、格納容器内を循環する流れが形成され、ヘリウムは格納容器内で均一に混合される。

GOTHICコードは格納容器内の各区画全体に渡り、過渡から平衡に至るまでのヘリウム濃度の時間変化を良好に予測しており、格納容器内の流動ならびにヘリウム拡散を良好に再現していることが分かる。なお、破断区画であるノード 8 におけるヘリウム濃度は、

解析結果と測定結果において差異が生じている。この原因として破断区画で放出される蒸気が検出器へ与える影響が考えられる。

表 4-2 NUPEC試験条件 (Test M-7-1)

試験ケース	Test M-7-1
<u>初期条件</u>	
ドーム部圧力	139.7 kPa
ドーム部温度	66.4 °C
ドーム部湿度	100 %
外気温度	11 °C
<u>気相 (ヘリウム/蒸気) 放出</u>	
ヘリウム放出流量	0.0-0.03-0.0 kg/s
蒸気放出流量	0.08-0.03 kg/s
放出ヘリウム温度	14 °C
放出蒸気温度	165 °C
放出期間	30 min
放出位置	Dループ SG基礎区画
<u>スプレー</u>	
スプレー流量	19.4 kg/s (70 m ³ /h)
スプレー水温	40 °C
放出期間	30 min
スプレー液滴径 (平均液滴径)	0.75 mm
スプレーノズル個	21 個
放出位置	ドーム部

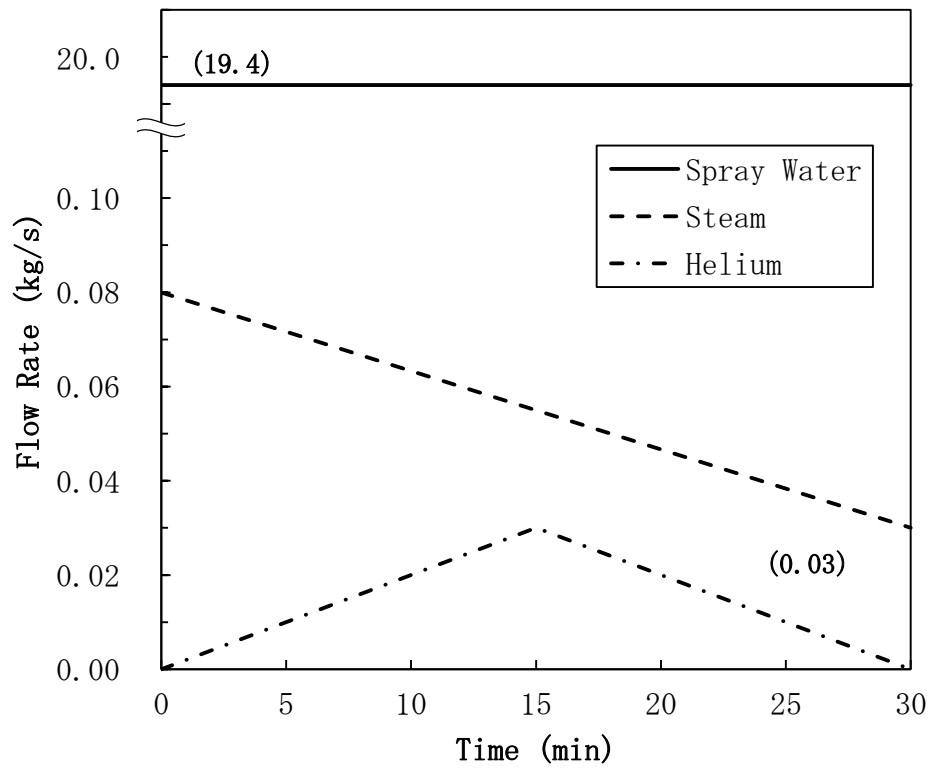


図 4-7 供給流体の流量条件 (Test M-7-1)

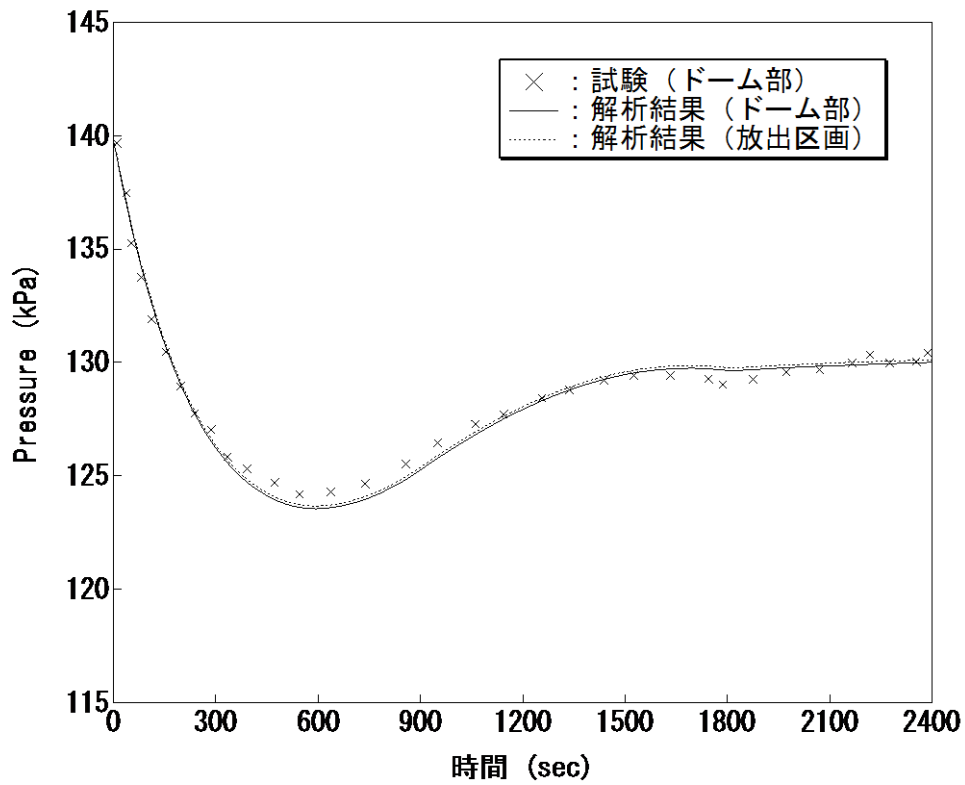


図 4-8 格納容器圧力 (Test M-7-1) (ノード 25)

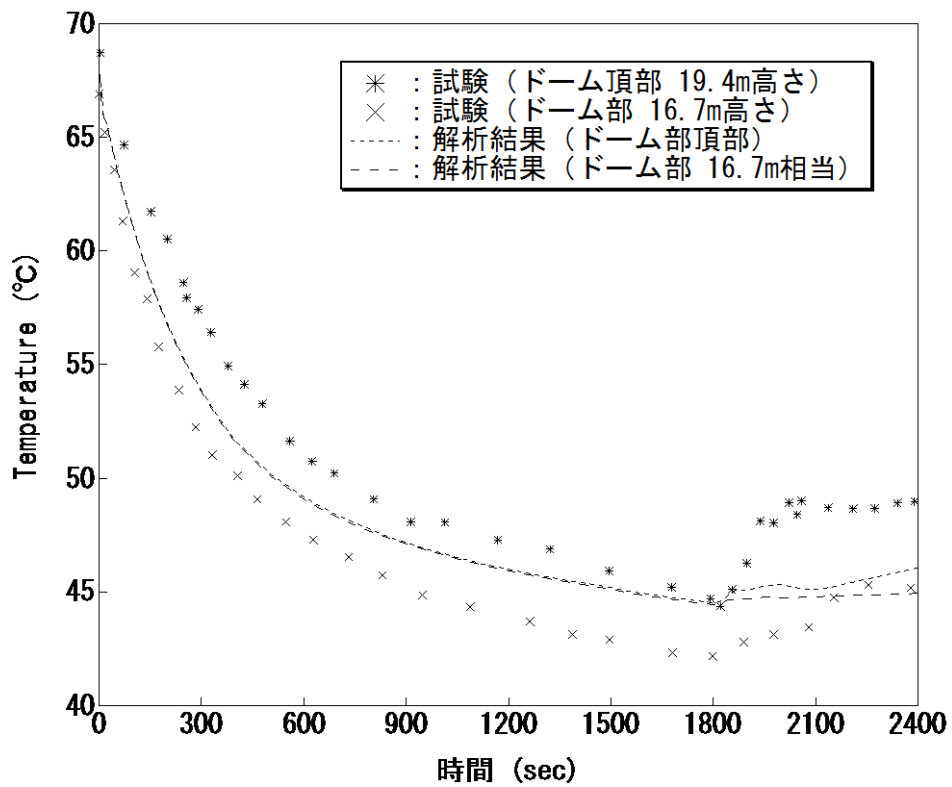


図 4-9 ドーム部雰囲気温度 (Test M-7-1) (ノード 25)

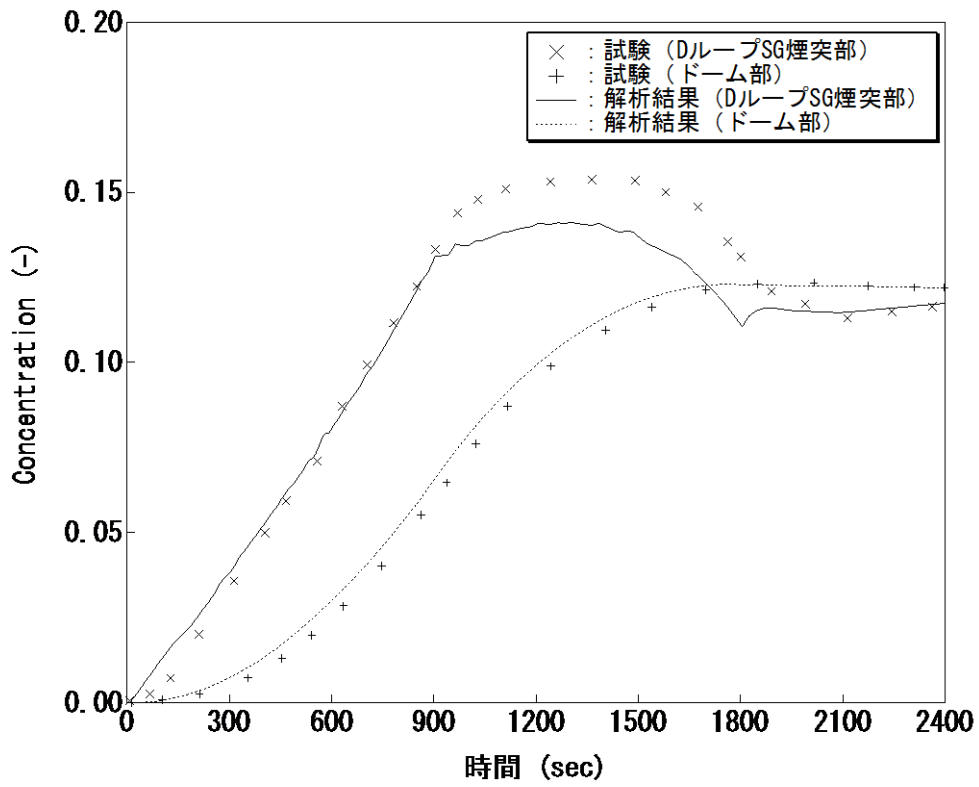
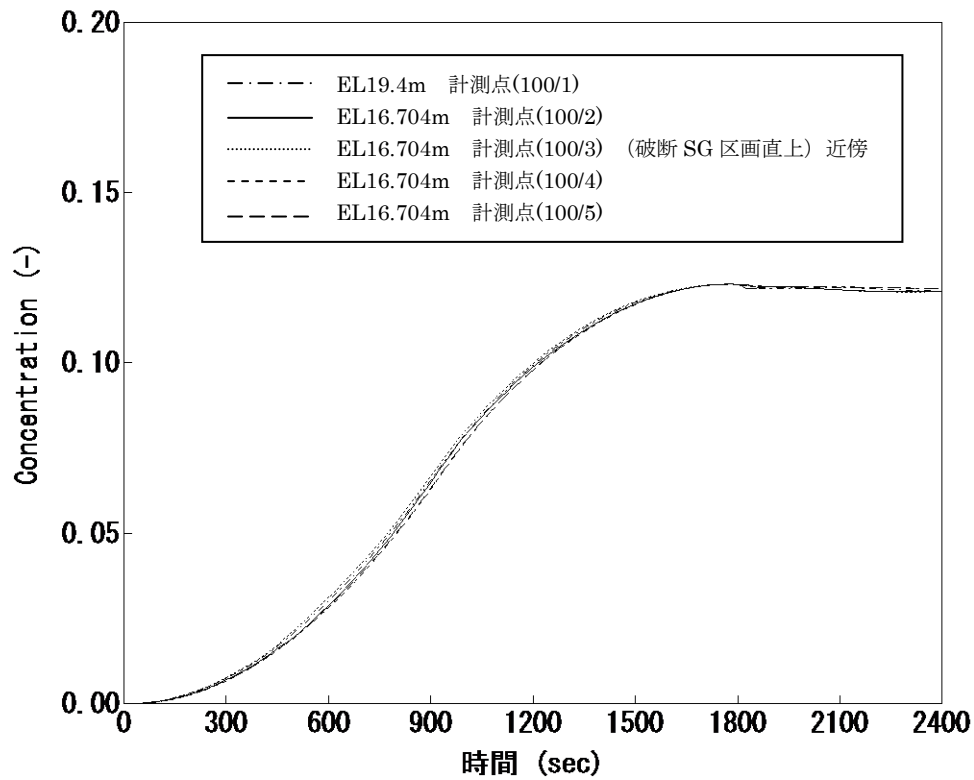
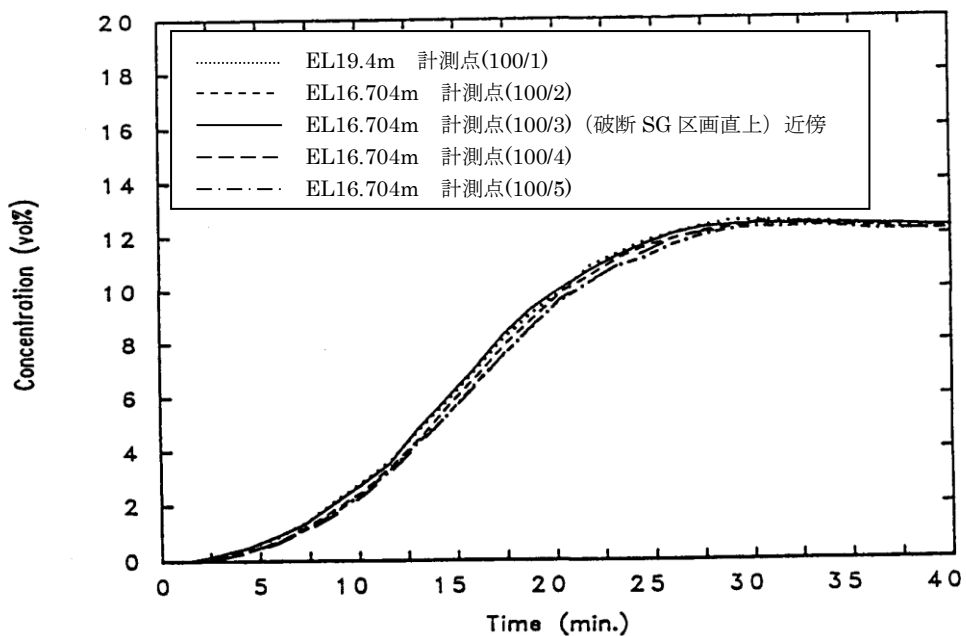


図 4-10 ノード 21、ノード 25 ヘリウム濃度 (Test M-7-1)



(a) 解析結果



(b) 試験データ

出典：NUPEC, “Final Comparison Report on ISP-35: NUPEC Hydrogen Mixing and Distribution Test (Test M-7-1)”

図 4-11 ドーム部ヘリウム濃度 (Test M-7-1) (ノード 25)

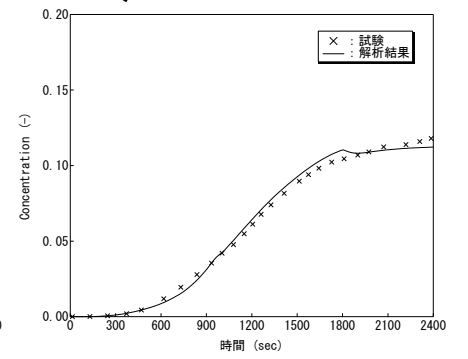
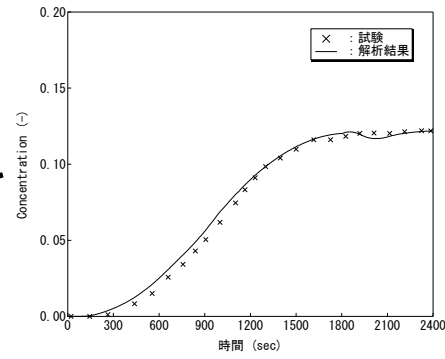
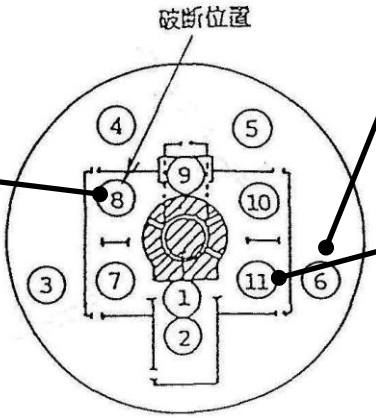
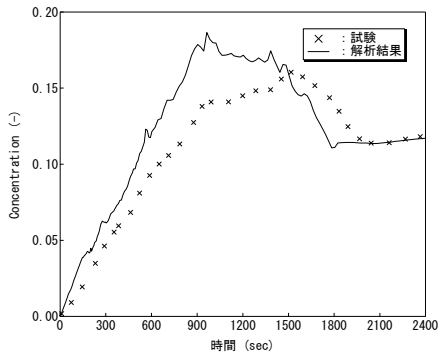
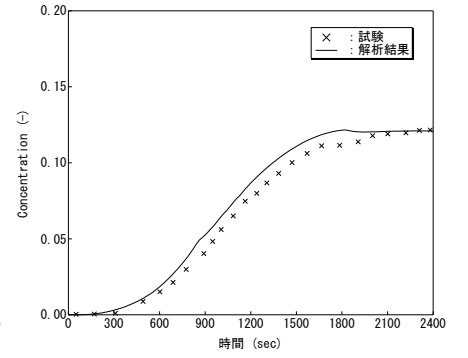
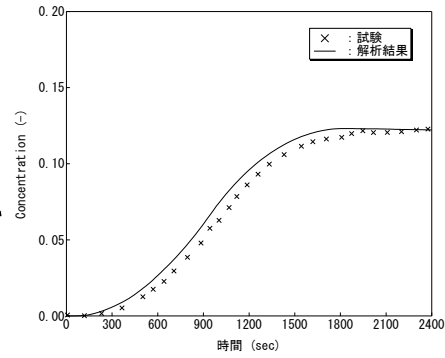
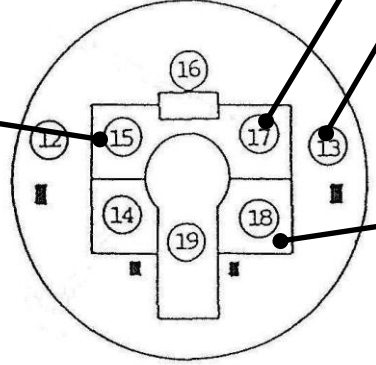
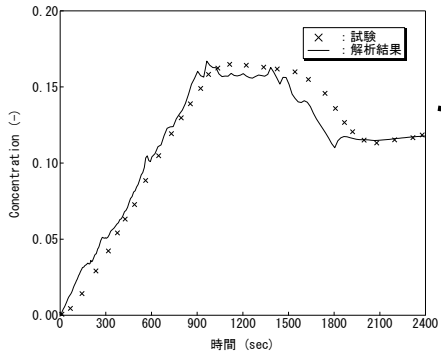
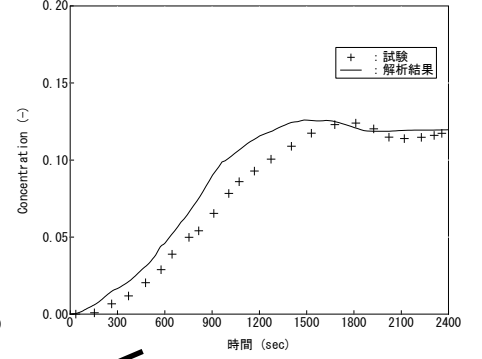
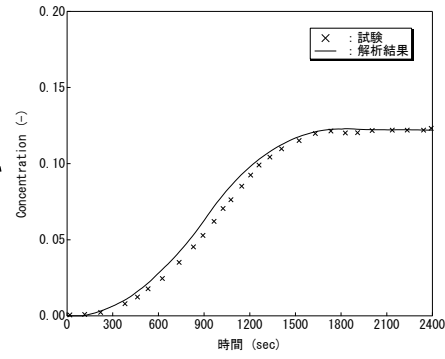
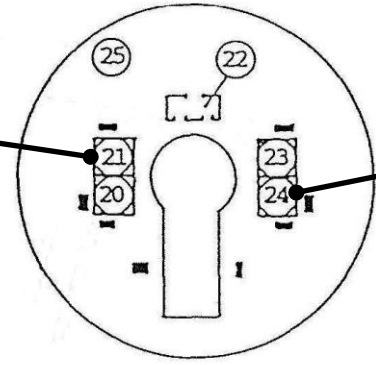
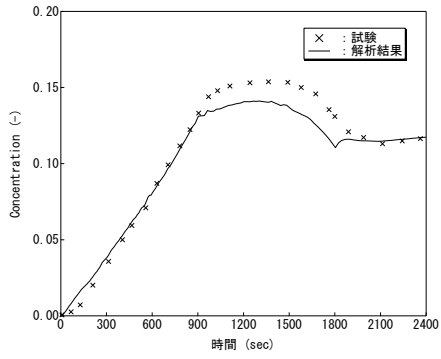
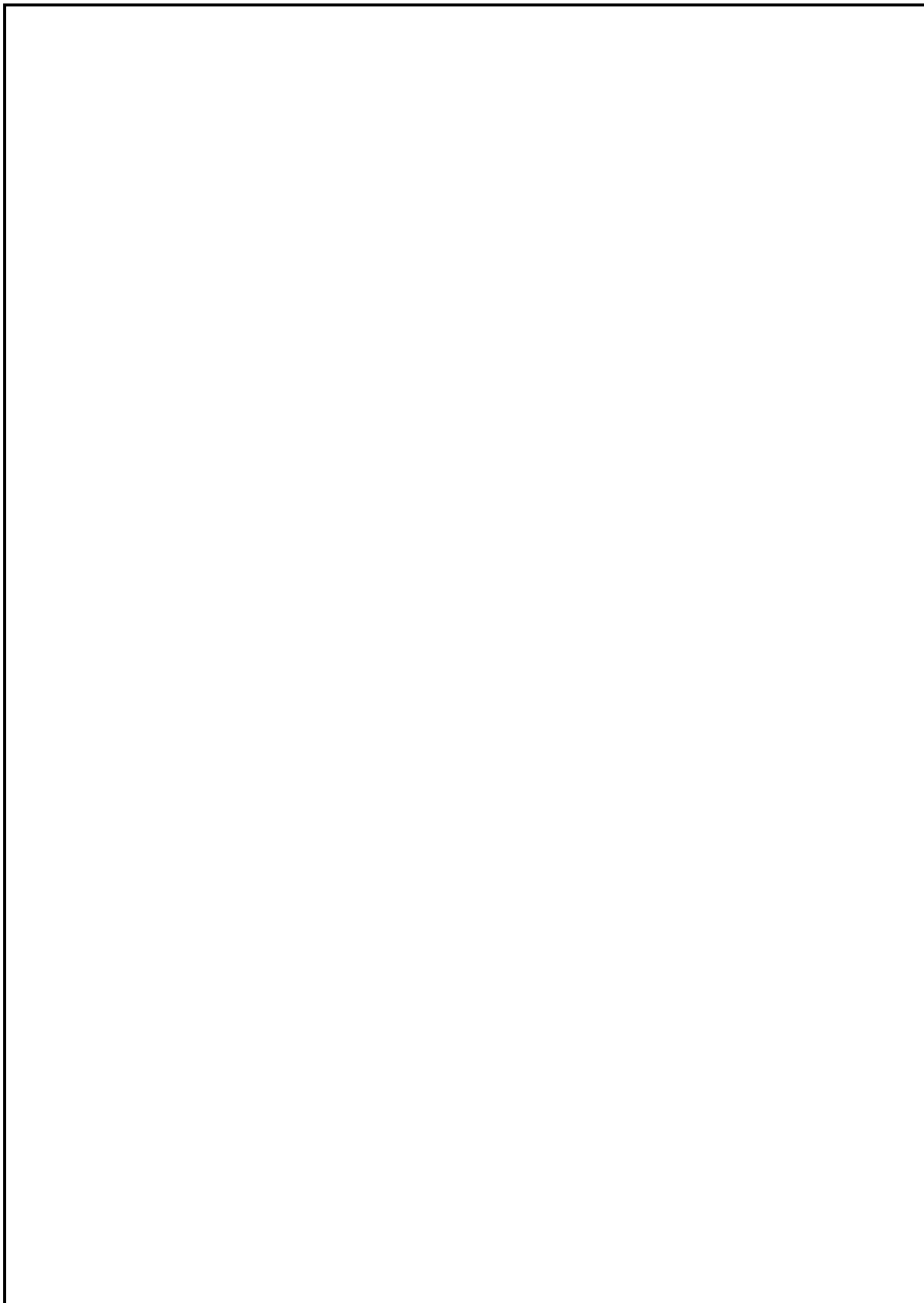


図 4-12 格納容器内各部のヘリウム濃度 (Test M-7-1)

4.2.3.2. Test M-4-3 (スプレーなし/蒸気放出あり)





枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 4-3 NUPEC試験条件 (Test M-4-3)

試験ケース	Test M-4-3
<u>初期条件</u>	
ドーム部圧力	101kPa (大気圧)
ドーム部温度	28°C
ドーム部湿度	—
外気温度	—
<u>気相 (ヘリウム/蒸気) 放出</u>	
ヘリウム放出流量	0.027 kg/s
蒸気放出流量	0.33 kg/s
放出ヘリウム、蒸気温度	115 °C
放出期間	30 min
放出位置	Dループ SG基礎区画
<u>スプレー</u>	
スプレー流量	—
スプレー水温	—
放出期間	—
スプレー液滴径 (平均液滴径)	—
スプレーノズル個	—
放出位置	—



図 4-13 格納容器圧力 (Test M-4-3) (ノード 25)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので
公開できません。

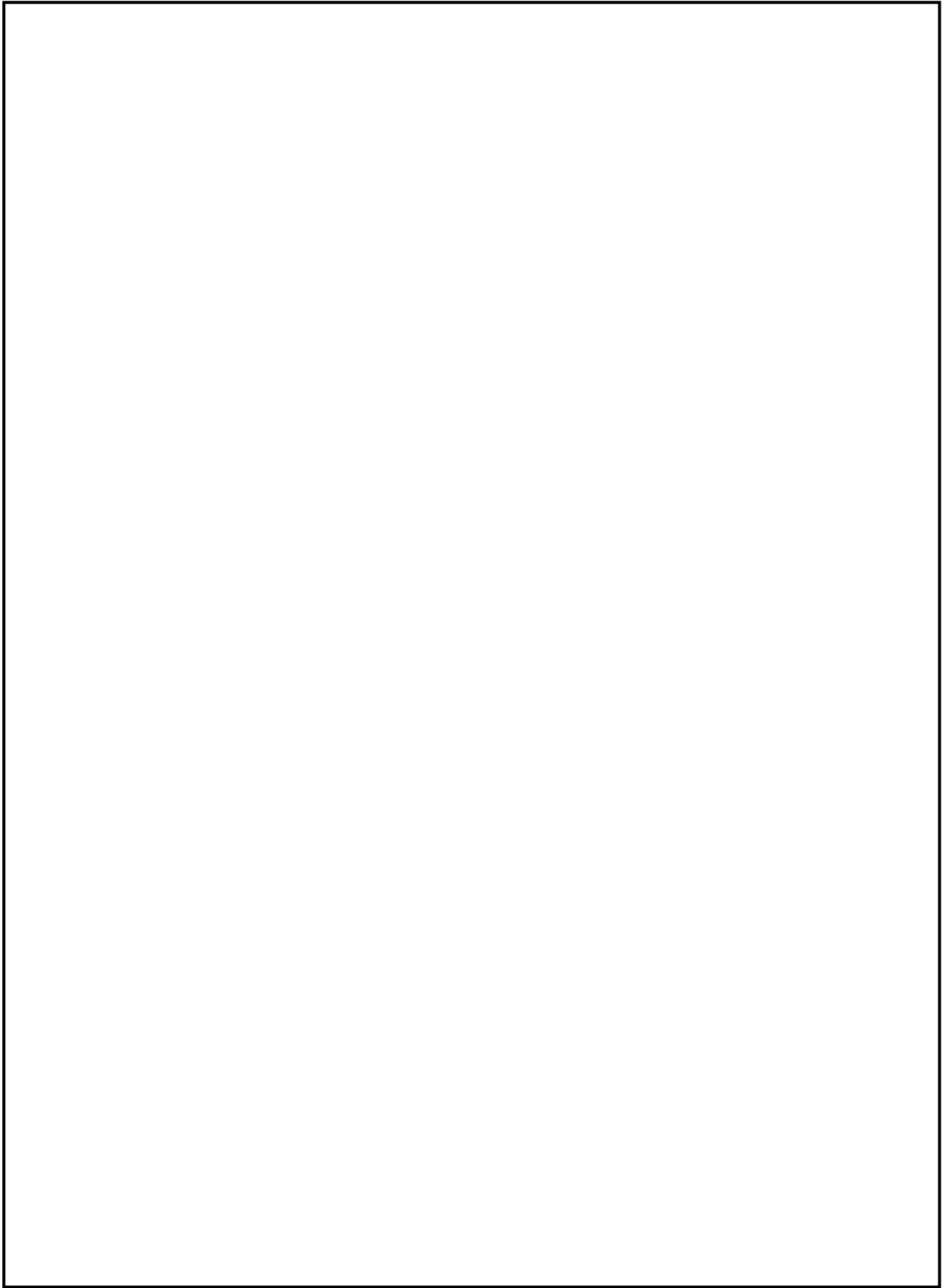


図 4-14 ドーム部雰囲気温度 (Test M-4-3)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので
公開できません。

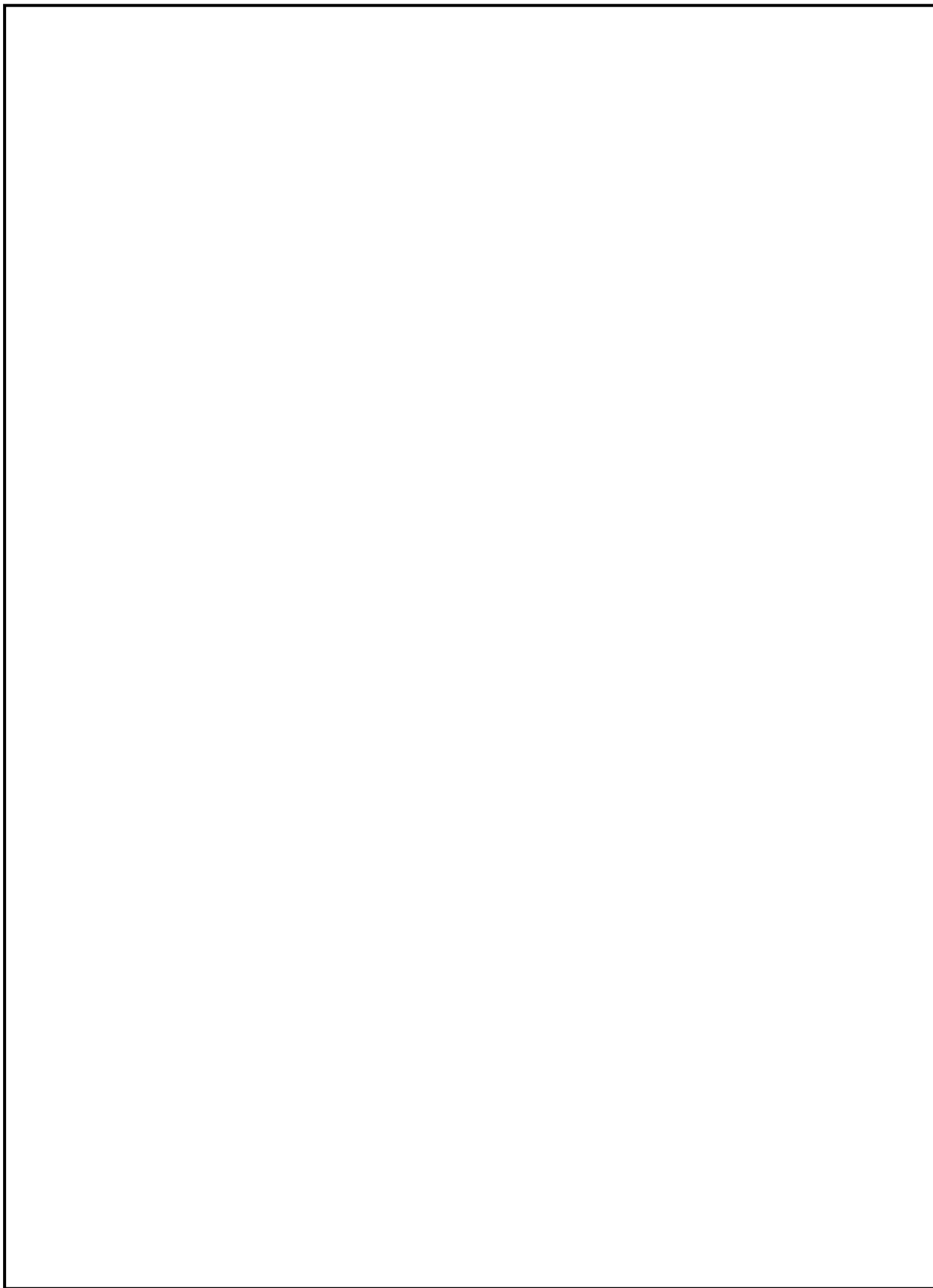


図 4-15 ドーム部ヘリウム濃度 (Test M-4-3)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので
公開できません。



図 4-16 格納容器内各部のヘリウム濃度 (Test M-4-3)

4.2.4. NUPEC試験におけるヘリウム濃度の検討

NUPEC試験におけるヘリウム濃度の測定は、熱伝導度検出器を使用したガスクロマトグラフィーにより測定されている。サンプリングは、区画の中央部でスプレイ水等の影響を受けにくい測定方法が取られている。計測誤差については表 4-4の通りであり、ヘリウム濃度計測値に大きな誤差はない。

ただし、蒸気及びヘリウムを下部区画から放出するという点において同様に実施された Test M-4-3 (Test M-9-2) と Test M-7-1 の破断区画及び破断区画上部の区画におけるヘリウム濃度の比較において、ヘリウム濃度の挙動に有意な差が見られた。したがって、計測誤差以外にもヘリウム濃度の測定に影響を及ぼす要因があると考えられる。

表 4-4 ヘリウム濃度計測誤差について

Quantity	location	σ value	Unit
Temperature	Each compartment and walls	0.2	°C
Pressure	Dome top	1079 (0.011)	Pa (kg/cm ²)
	Helium, steam primary circuit	2648 (0.027)	Pa (kg/cm ²)
	Differential pressure of He,steam	132 (13.5)	Pa (mmH ₂ O)
He concentration	Each compartment	0.01x[Vol%]+0.002	Vol%

4.2.4.1. Test M-7-1 における区画 8 のヘリウム濃度の差異について

NUPEC 試験 Test M-7-1 において破断区画及び破断区画上部のヘリウム濃度の挙動のうち、破断区画（区画 8）のヘリウム濃度と破断区画上部（区画 15 等）のヘリウム濃度を比較すると、破断区画の方が破断区画上部に比べて高い濃度、もしくは同程度の濃度となっている。しかしながら、Test M-7-1 では図 4-17に示す試験結果とおり、試験開始後 10 分（600 秒）以降から破断区画（区画 8）のヘリウム濃度よりも破断区画上部（区画 15）のヘリウム濃度が高くなっている。Test M-7-1 では 600 秒以降においても破断区画でヘリウム及び蒸気を放出しており（図 4-18）、破断区画よりも破断区画上部のヘリウム濃度が高くなるというのは考えにくい。Test M-7-1 における破断区画の測定値が異なる挙動を示す理由として以下が推察される。

- a) 破断区画（区画 8）のヘリウム計測位置は、ヘリウム及び蒸気放出位置に近い。Test M-7-1 では蒸気放出を含む試験となるため、破断区画においてはサンプリングの際に蒸気凝縮による液相を採取してしまい、成分分離が不完全または、熱伝導度を計測する際の測定に影響が出ている可能性がある。

上記の通り、Test M-7-1 の破断区画のヘリウム濃度については、破断区画のヘリウム計測の不確かさに起因して測定値に差異が生じている可能性がある。ここで、図 4-19に破断区画（区画 8）と解析結果の比較図に破断区画上部（区画 15）の試験結果を追加した図を示す。解析結果は破断区画上部（区画 15）に比べてもヘリウム濃度を高めに予測しているが、試験結果においても試験開始後 5 分までは破断点のヘリウム濃度の方が高い。この傾向から、破断区画（区画 8）が破断区画上部（区画 15）よりヘリウム濃度が高い、或いは同程度であると仮定すると、解析結果とほぼ同程度のヘリウム濃度となると考えられる。

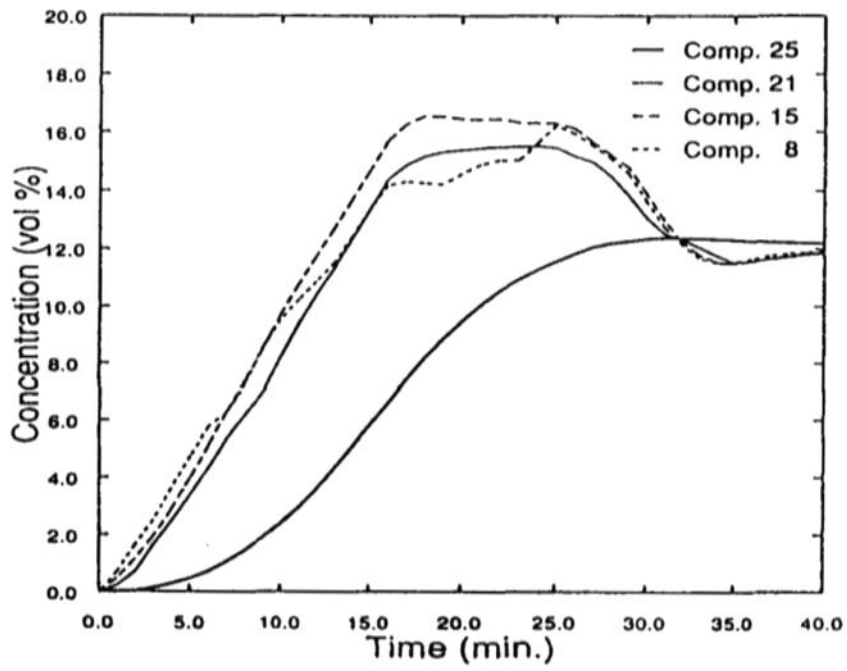


図 4-17 ヘリウム濃度 (Test M-7-1)

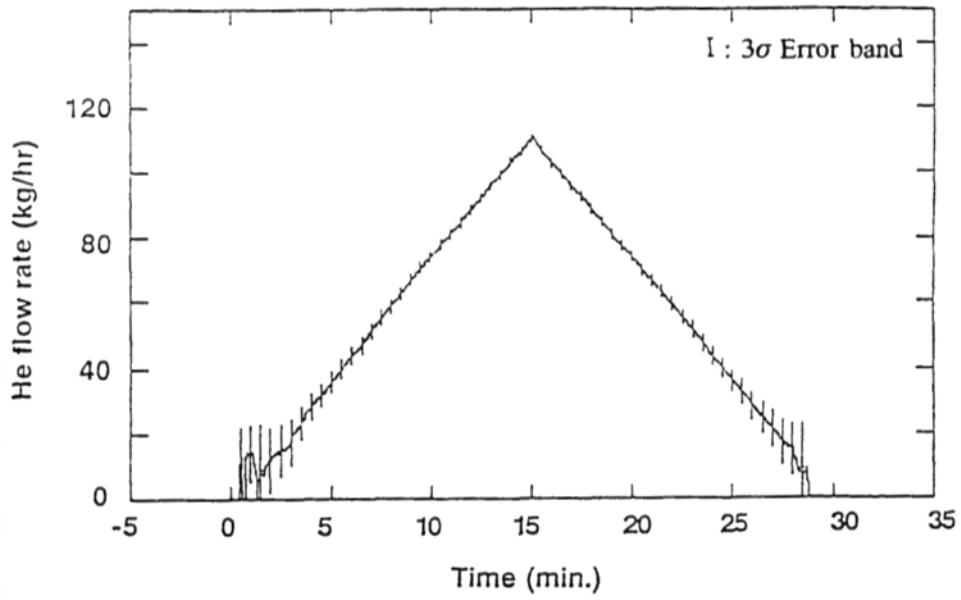


図 4-18 ヘリウム放出量 (Test M-7-1)

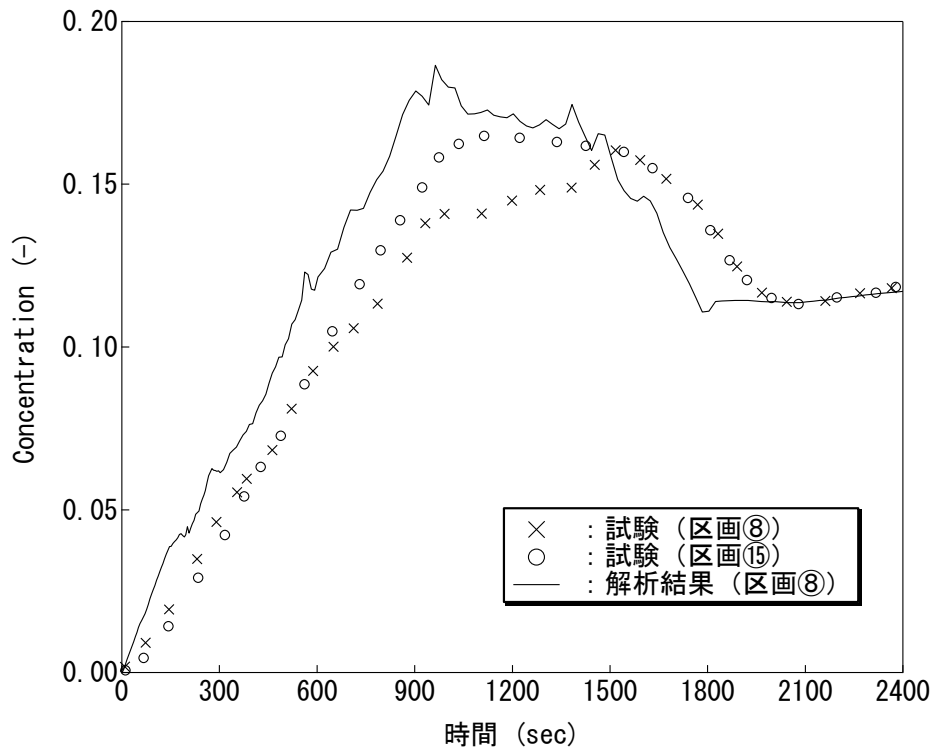


図 4-19 ヘリウム濃度比較 (Test M-7-1)

4.2.4.2. Test M-4-3 の下部区画のヘリウム濃度について

NUPEC 試験 Test M-4-3 においては解析結果のヘリウム濃度に比べ、試験結果のヘリウム濃度が全体的に高い傾向である。図 4-20 に計測グラフからの読み取り流量 (約 0.32kg/s) と試験レポートの蒸気放出量記載値 (0.33kg/s) を示す。解析では試験レポートの蒸気放出量記載値 (0.33kg/s) を使用している。このために、破断流における蒸気量を相対的に多く仮定している GOTHIC では、ヘリウム濃度を試験より低く評価していると思われる。

Test M-4-3 に対する計測点の代表性確認試験として、ヘリウム放出、蒸気放出量、及び放出区画が同条件となる試験 Test M-9-2 が行われている。図 4-21 に、全体的な挙動に対し支配的であるドーム部のヘリウム濃度を比較すると、Test M-4-3 のヘリウム濃度が全体的に高くなっている。Test M-9-2 で実測の蒸気放出量は 0.33kg/s であり、Test M-4-3 に対し実施した GOTHIC の解析と同じ破断蒸気流量である。また、Test M-9-2 は Test M-4-3 と初期温度が異なるが、初期温度はヘリウム濃度に対し有意な影響がないことから、破断蒸気流量の整合性の観点を重視し、Test M-4-3 として実施した GOTHIC の解析と Test M-9-2 の試験結果を以降に比較する。

解析結果破断区画 (区画 8)、破断区画上部 (区画 15)、及びドーム部において試験結果 (Test M-4-3, Test M-9-2) との比較を図 4-22~図 4-24 に示す。解析結果はヘリウム濃度を全体的に低めに予測しているが、Test M-9-2 と一致する傾向となり、また、過渡から平衡に至るまでのヘリウム濃度の時間変化を良好に予測している。次に、下部区画のヘリウム濃度に対し Test M-9-2 との比較を図 4-25 に示す。破断区画及び破断 SG 区画において GOTHIC コードによる予測がやや過小評価となっているが、隣接する外周部では良好な一致或いは僅かに過大傾向である。したがって、GOTHIC コードは再現試験となる Test M-9-2 に対し格納容器内のヘリウム分布を適切に予測しているものと判断できる。

以上により、Test M-4-3 の解析では、試験計測値に不確かさが残るものの、解析結果が Test M-9-2 と一致する傾向であり、過渡から平衡に至るまでのヘリウム濃度の時間変化を良好に予測していることから、GOTHIC コードは区画間の熱的挙動及びヘリウム拡散挙動を適切に評価できているといえる。

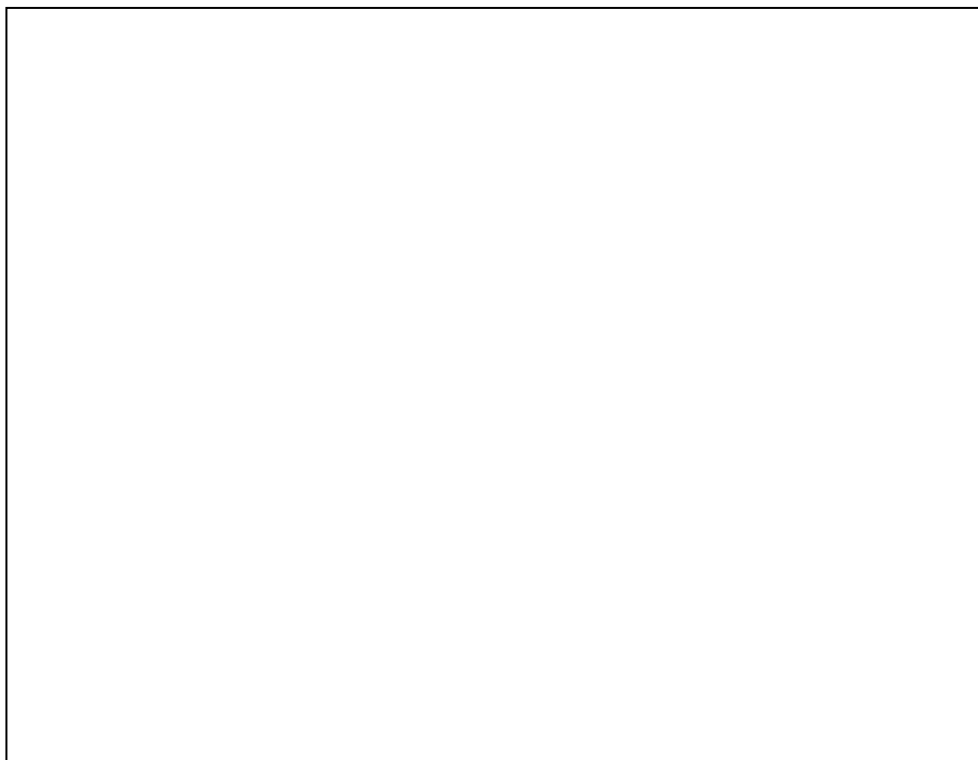


図 4-20 NUPEC Test M-4-3 の放出蒸気流量

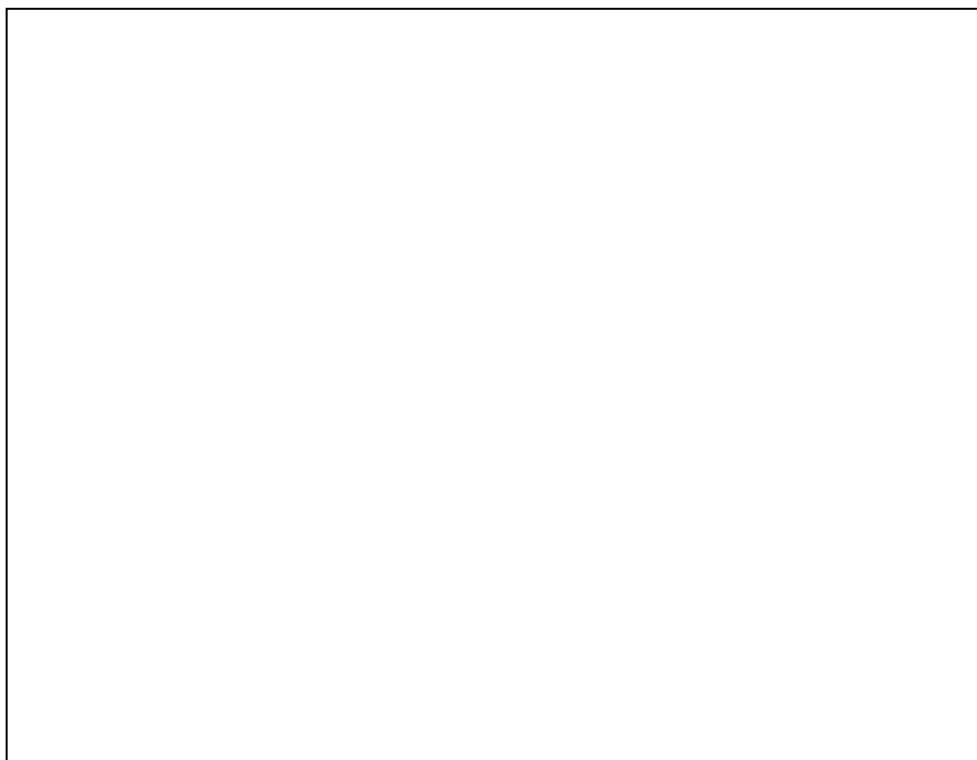


図 4-21 ヘリウム濃度比較 (Test M-4-3, Test M-9-2)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

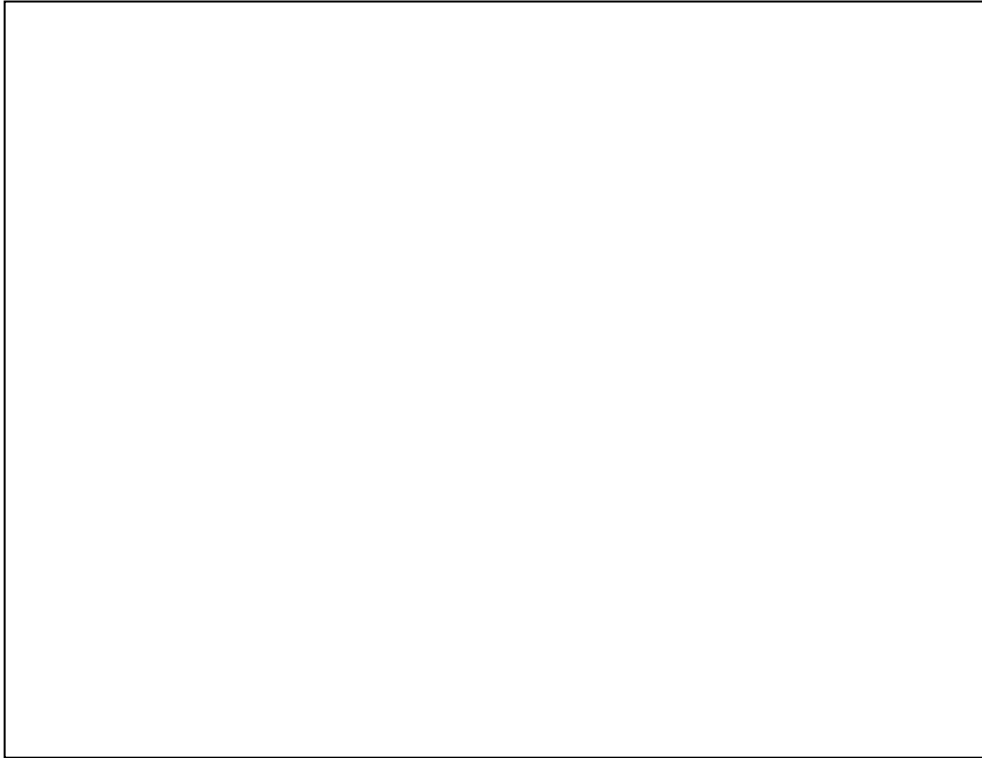


図 4-22 破断区画（区画⑧）へリウム濃度

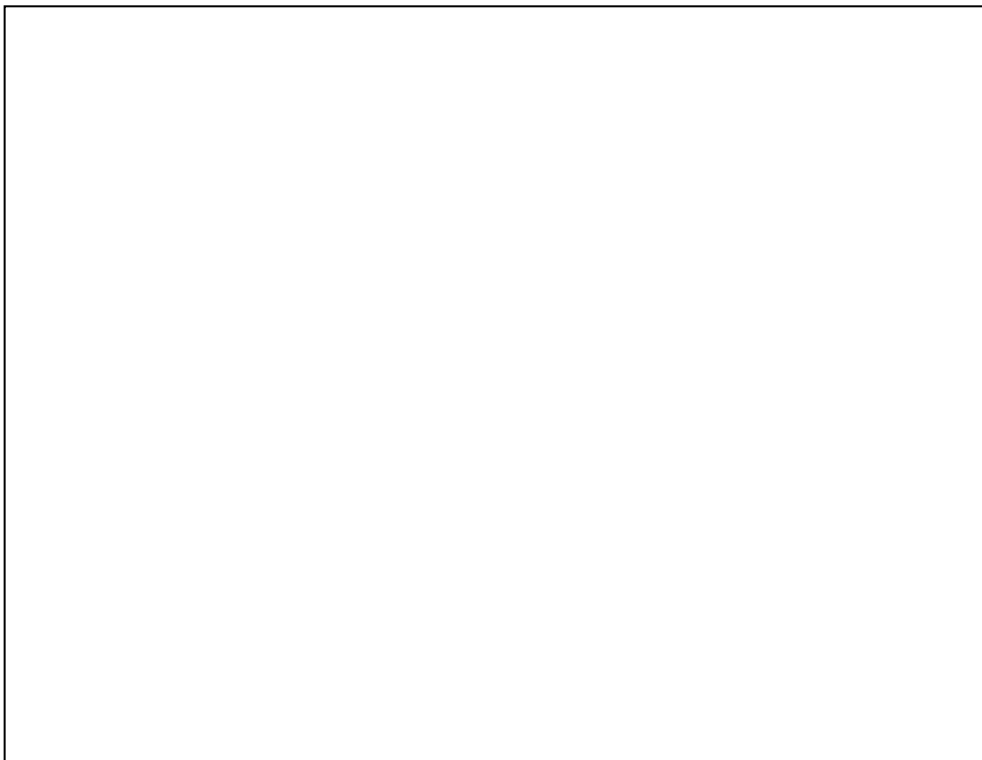


図 4-23 破断区画上部（区画⑮）へリウム濃度

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

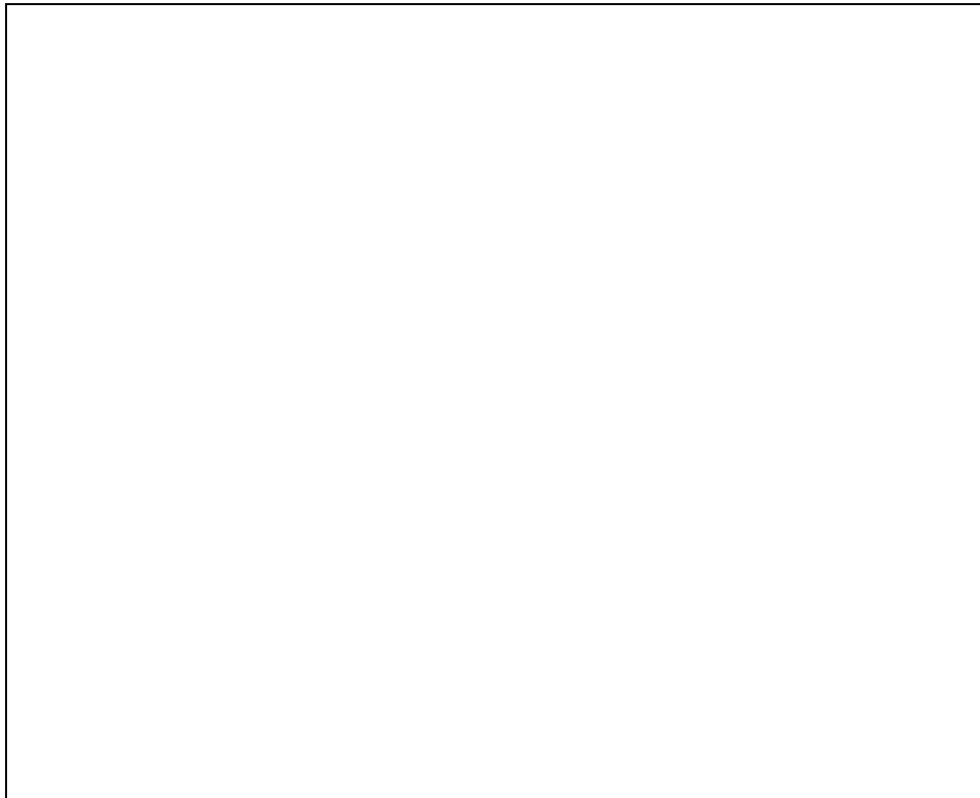


図 4-24 ドーム部ヘリウム濃度

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

図 4-25 格納容器内各部のヘリウム濃度 (解析：M-4-3、試験結果：M-9-2)



枠囲いの内容は、商業機密に属しますので
公開できません。

4.3 構造材凝縮熱伝達モデルの感度検討

4.3.1 NUPEC 試験解析における構造材凝縮熱伝達モデルの感度解析について

NUPEC 試験解析では主として格納容器内の流動、非凝縮性ガスの拡散・混合挙動のコード予測性を検討するため、構造材への熱伝達についてはより最適評価性の高い DLM-FM モデルを適用する。一方、実機プラントの解析では、格納容器内での構造材ヒートシンク効果による蒸気凝縮を大きめに見積り、ウェット換算水素濃度を高めに予測するためにより保守的な構造材熱伝達モデル（Gido-Koestel モデルと内田モデルの最大値に保守ファクタとして \square を乗じる）を適用する。ここでは、NUPEC 試験のうち代表ケースとなる Test M-7-1 を対象に、適用する構造材熱伝達を実機プラントモデルとした場合の感度影響について確認する。なお、これら凝縮熱伝達モデルについては 3.3.2 章にて説明する。

格納容器ドーム部の圧力、雰囲気温度及びヘリウム濃度について、ベースケース（DLM-FM モデル）と感度ケース（Gido-Koestel モデルと内田モデルの最大値に保守ファクタとして \square を乗じる）を、図 4-26 ～ 図 4-28 に比較する。感度ケースでは構造材への凝縮熱伝達が大きくなることから圧力が低下する傾向になるが、その低下量は僅かである。これは、格納容器雰囲気の除熱にはスプレイ冷却と構造材ヒートシンクが寄与するが、前者がより支配的となることから構造材の凝縮熱伝達モデルの影響が相対的に軽微となるためである。同様に、ドーム部の雰囲気温度及びヘリウム濃度についてもモデル間の差異は小さい。

以上より、NUPEC 試験解析では、実機プラント解析で用いる構造材の凝縮熱伝達モデルについて、より最適評価性の高い DLM-FM モデルを用いているが、水素燃焼の重要事故シナリオとして選択される「大破断 LOCA+ECCS 失敗（スプレイ成功）」に対してはその影響が軽微であるものと判断される。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

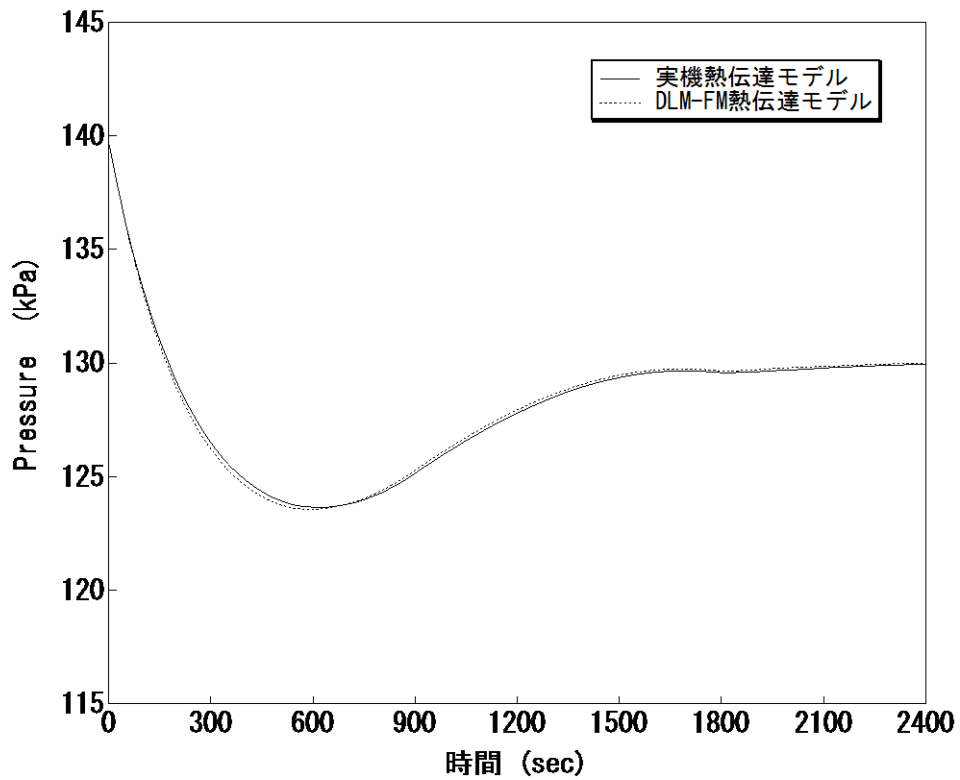


図 4-26 格納容器圧力 (Test M-7-1、構造材熱伝達モデル感度ケース)

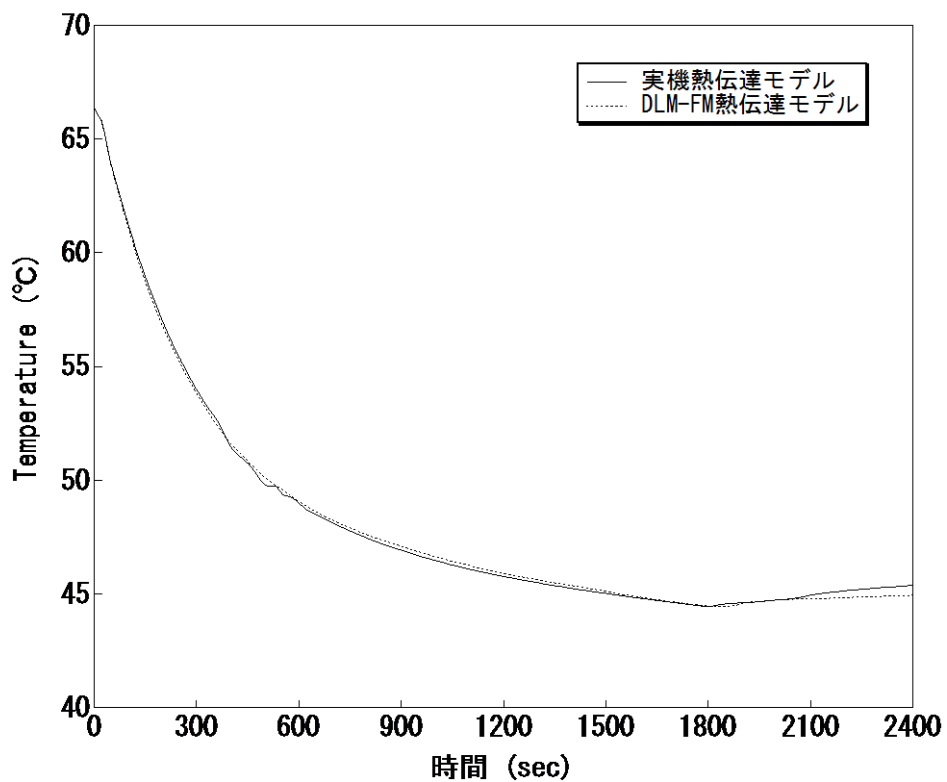


図 4-27 ドーム部雰囲気温度 (Test M-7-1、構造材熱伝達モデル感度ケース)

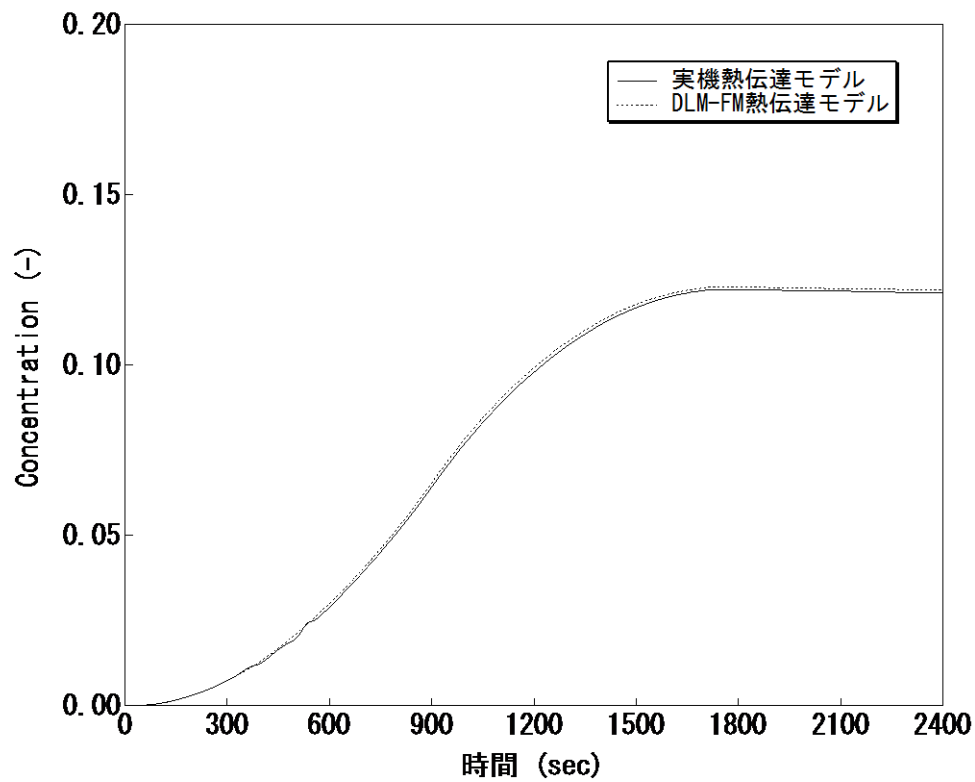


図 4-28 ドーム部ヘリウム濃度 (Test M-7-1、構造材熱伝達モデル感度ケース)

4.4 熱伝達試験との比較

実機プラントにおけるシビアアクシデント対策の有効性評価では Gido-Koestel (参考文献 7) と内田 (参考文献 5) の最大値に保守性を考慮した凝縮熱伝達係数を適用している。これは、当該モデルの安全解析等への使用実績が多く、また保守的に凝縮係数を大きくすることで蒸気凝縮を促進させ、ウェット水素濃度を保守的に評価するためである。

Gido-Koestel モデルは、対流による熱・物質伝達のアナログに基づく凝縮に加え、構造材表面液膜の流れによる伝熱促進効果を考慮している。このため、非凝縮性ガスの存在下、かつ飽和・過熱環境においても適用可能である。スプレー起動により格納容器内の雰囲気は飽和に近づき、当該条件下で使用実績の高い内田による凝縮熱伝達が適用される。実機プラントの解析では、特に空間体積の大きなドーム部でスプレーが継続することから、内田による飽和凝縮モードが支配的となる。内田モデルによる予測と実験データとの比較を図 4-29 に示す。このうち、実機解析において見られるオーダーは $10^1 \sim 10^3 (\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$ のオーダーであり、過熱状態などにより極端な逸脱を含む試験を除けば、誤差はおおむね $\pm 40\%$ 程度に収まる。

実機プラントの解析では、上記モデルによる凝縮熱伝達係数に を乗じることで凝縮を過大に仮定し、ウェット水素濃度を高めに評価することを指向している。これは格納容器内の雰囲気と構造材に温度差が生じる期間に有効となる。ただし、有効性評価のシナリオではスプレーが継続してこれによる凝縮が支配的となること、また、長時間の評価となり、特にドーム部については雰囲気と構造材が熱平衡に漸近することからその影響は限定的である。

一方、凝縮熱伝達モデルとして最適評価性の高い Diffusion Layer Model FM (DLM-FM) が GOTHIC コード内に内蔵されている (参考文献 8)。同モデルは、構造材表面の液膜の擾乱及び構造材表面近傍の気相部におけるミストの存在を考慮することで予測精度を向上させている。図 4-30 に、各種の実験におけるヒートシンク表面の凝縮レートの測定値対 DLM-FM の予測値を示す。凝縮レートの予測は、測定値に対し高い精度で合致しており、95%以上が $\pm 20\%$ の予想精度に含まれていることから、その最適評価性は十分に高い。

なお、NUPEC 試験検証においては、構造材表面の凝縮熱伝達係数として DLM-FM モデルを適用している。これは、同試験ではスプレー冷却が支配的となるが、ヒートシンクとなる構造材との熱授受が気相の対流挙動に与える影響は無視できるものではないため、最適評価性の高い DLM-FM モデルを適用してヒートシンク伝熱に係る不確かさを小さくすることで、流動に係るコードモデルの適用性を評価するためである。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

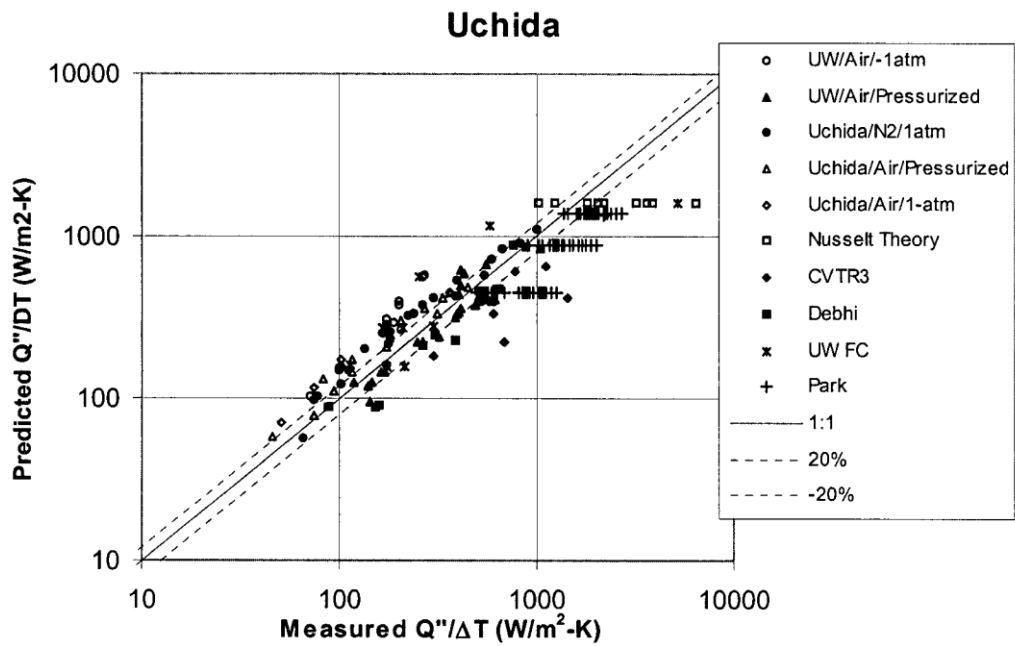


図 4-29 内田凝縮相関式の実験予測特性

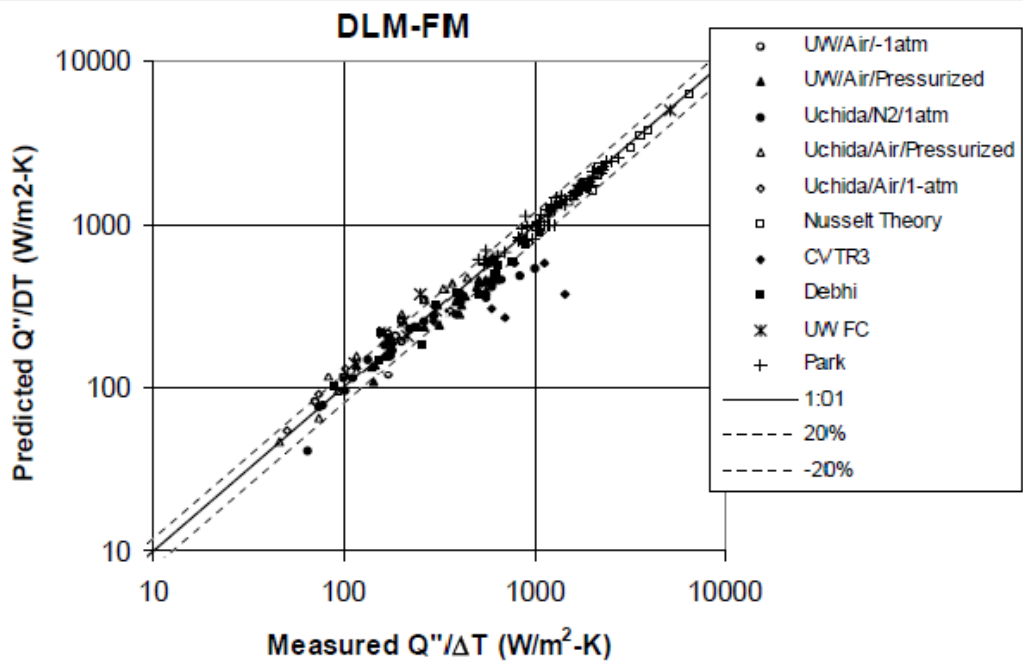


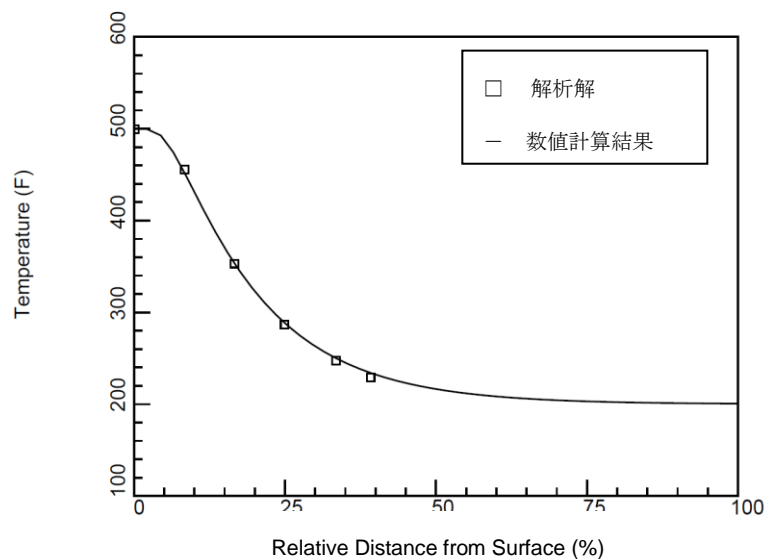
図 4-30 DLM-FM の実験予測特性

4.5 熱伝導解析解との比較

コード開発元により、1次元熱伝導に対する解析解とGOTHICによる複数の形状（平板、円柱、円筒）による熱構造材の温度変化の予測に対し比較が行われている（参考文献8）。これは、熱構造材の片面に一定の熱流束を与え、もう片面を温度一定とするものである。この仮定により、定常状態の温度プロファイルが解析解として得られる。図4-31に、評価条件及び解析解と数値計算結果の比較を示す。数値計算結果は良好に解析解と一致している。

これより、GOTHICコードに組み込まれる伝熱モデルが適切に構造材内部の熱伝導を解くことが検証された。

- ・ 熱伝導率 = $k = 12. \text{ Btu/hr-ft-R}$
- ・ 比熱 = $c_p = 0.1 \text{ Btu/lbm-R}$
- ・ 密度 = $\rho = 400. \text{ lbm/ft}^3$
- ・ 円筒直径 = 2. in ※円筒の場合。
- ・ 初期温度 = 500. F
- ・ 流体温度 = 200. F



出典：EPRI Product 1013072, GOTHIC Qualification Report, Figure 4-8 (Labels were modified)

図 4-31 1次元熱伝導モデルと解析解の比較

4.6 P A R 特性検証

4.6.1 P A Rによる水素処理性能評価式の組み込み

水素処理設備となる静的触媒式水素再結合装置（P A R）について、製造元が供給する水素処理に係る性能評価式がG O T H I Cコードに適切に組み込まれていることを以下に検証する。

P A Rの水素処理に関する性能評価式は3.3.5節にて説明した通りである。同性能評価式をG O T H I Cコードに組み込み、コードが計算する水素の再結合率（ここでは水素処理速度と同義とする）を、想定される事故時環境の範囲で理論値と比較し、その誤差が十分に小さいことを検証している。解析では一定の区画を定義し、その雰囲気における酸素及び水素の体積比と圧力を定義する。同区画の水素濃度（体積比）を連続的に増加させ、コードで計算される水素処理速度と性能評価式で得られる値とを比較する。圧力条件 1.5bar 及び 4.0bar において、G O T H I Cコードによる組み込み計算結果と性能曲線による値の比較を図 4-32及び図 4-33に示す。結果を統計処理した理論値対予測を比較した結果、G O T H I Cコードに組み込まれる性能評価式は理論値に対し、誤差 0.3%以内という結果により良好に再現していることが確認でき、P A Rの水素処理に関する特性式はG O T H I Cコードに適切に組み込まれていることが検証された。

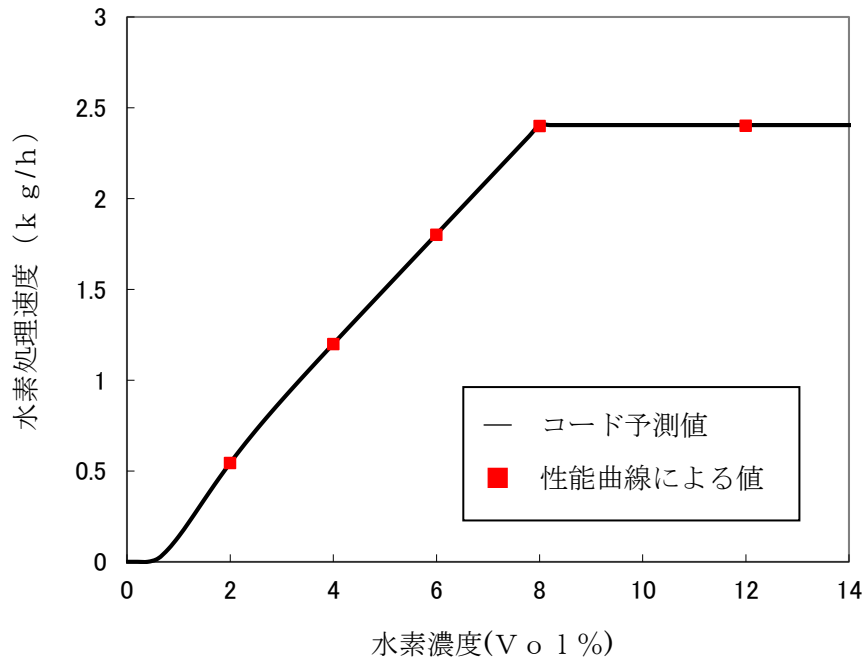


図 4-32 1.5bar における P A R 性能曲線組み込み結果

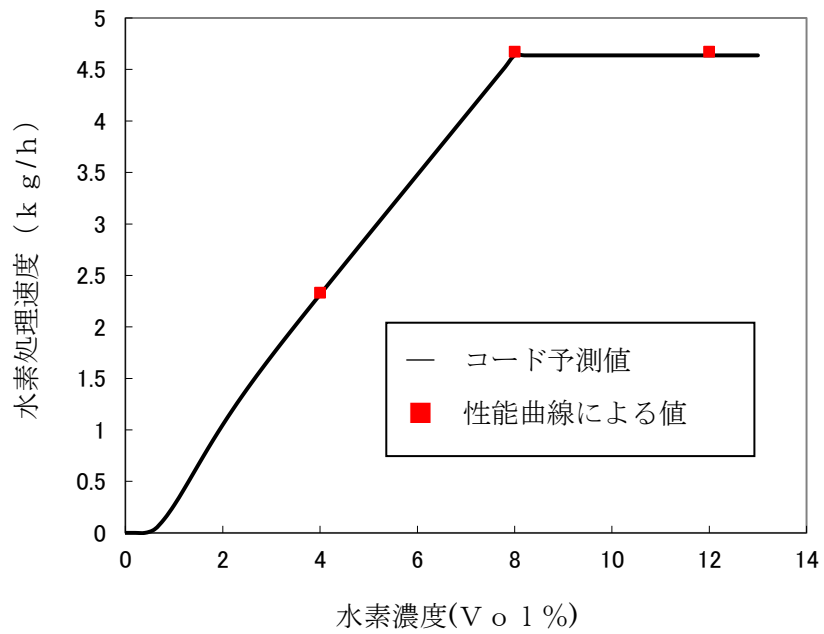


図 4-33 4.0bar における P A R 性能曲線組み込み結果

4.6.2 THAI 試験

有効性評価に使用する PAR の性能評価式は THAI 試験 (参考文献 2 3) において検証されている。THAI 試験のうち、HR 試験はドイツ連邦経済技術省の後援により、ドイツ・エッシュボルンの Becker Technologies GmbH (ドイツの委託研究工学・プラント製造会社) により THAI 格納容器試験設備で行われた。うち、容器内に PAR のみを設置し、水素を流入させることで PAR による水素処理性能及び容器内の流体状況を計測した HR-3 試験に対し、GOTHIC コードにより実験解析を行う。これにより、有効性評価における PAR 模擬及び空間分割手法の妥当性を示す。

4.6.2.1 THAI 試験条件及び設備

THAI 試験のうち、HR-3 試験の試験条件を表 4-5 に示す。試験は、水素放出時における PAR による水素処理能力及び水素放出を停止し自然循環による処理能力を確認している。試験で使用した圧力容器、水素処理設備・各種計測設備、水素放出条件を以下に示す。また、THAI 試験と実機プラントとの条件比較を表 4-6 に示す。

(1) 圧力容器

HR 試験シリーズで使用した圧力容器を図 4-34 及び図 4-35 に示す。これは総体積 60m³、高さ 9.2m、直径 3.2m のステンレス鋼製容器である。最高許容圧力は 180℃において 14bar である。

(2) 水素処理設備及び計測設備

HR-3 試験では、圧力容器内部に AREVA 社の商用 PAR が取り付けられている。また、水素濃度及び温度の計測位置を図 4-36 に示す。

(3) 水素放出

表 4-5 に示すように、HR-3 試験では 4 つの時間帯により水素の放出状況が異なる。PAR が作動開始するまでは試験容器に低流量の水素を放出する。PAR 作動後は水素注入量を試験条件に切り替え、水素濃度及び水素再結合割合が増加する様子を測定する (Phase 1)。PAR 入口の水素濃度がおよそ 5.8vol% に到達したことを確認すると水素注入を一度中断して、PAR の処理による水素濃度の減少を測定する (Phase 2)。水素処理により、PAR 入口の水素濃度がおよそ 0.75% に到達後、再び水素注入を開始し、自然発火に至るまで水素濃度を上昇させたのち (Phase 3)、水素放出を停止する (Phase 4)。水素注入流量の変化を図 4-37 に示す。

4.6.2.2 実験結果と PAR 性能評価式との比較

試験容器内部に温度計及び水素体積比計を配置し、試験容器内の温度や水素体積比の分布を確認している。PAR の入口及び出口に設置した水素体積比計、PAR 入口部の流速計等の測定パラメ

ータより試験時のPAR単体の水素除去割合 (g/s) を求め、試験時の試験容器内の計測圧力を入れたPAR性能評価式による水素除去割合 (g/s, kg/h) との比較を行った結果、図 4-38のとおりよく一致する結果が得られた。

4.6.2.3 GOTHICコードによる解析結果と試験との比較

(1) 解析モデル

THAI試験の実験解析を、実機における水素燃焼解析において適用しているGOTHICコードにより実施した。

GOTHICコードによるTHAI試験設備のモデル化は、試験容器を1区画の集中定数系ノードにより模擬する1区画評価と(図 4-39)、多区画分割による多区画評価を実施した(図 4-40)。

なお、いずれの評価においても構造材への熱伝達については、最適評価性の高いDLM-FMモデルを適用する。PARモデルは、試験装置の再現として適切な高さに配置し、水素の再結合率はAREVA社より提供された相関式を入力条件として与える。境界条件は容器下部の水素放出位置に設定し、試験条件に設定されたデータを与える。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

(2) 解析結果

A. 1区画模擬による解析結果

① 圧力

容器圧力の解析結果と試験データとの比較を図 4-41に示す。解析結果は試験の挙動を概ね良好に予測していると考えられる。しかし、試験では開始 92 分後に水素の燃焼による急激な圧力上昇が、また、92 分後以降においては試験データと比較して解析結果の圧力が高めに推移する傾向となっている。この原因として、試験においては Phase 3 でPARの自然発火が生じているのに対し、解析においては水素の燃焼を模擬しないことから、解析では急激な圧力上昇は見られないこと、また容器内に存在する非凝縮性気体が多く残ることから圧力が下がらないものと考えられる。

② 温度

容器内の各高さ位置における雰囲気温度の解析結果と試験データとの比較を図 4-42に示す。解

析ではP A Rの排気がP A R設置区画内に一様に拡散するよう模擬し、影響は軽微であるが区画における水素濃度を過小評価することで、水素処理量及び処理に伴う発熱を過小評価する傾向にある。また、燃焼を模擬しないことから容器内の発生熱量は少なく評価されるものの、結果は試験の挙動を概ね良好に予測していると考ええる。

試験においては開始 92 分後（Phase 3）に水素の燃焼により、容器上部で急激な温度上昇が見られるが、解析では水素の燃焼を模擬していないことからこの挙動は見られない。

解析は容器を 1 区画で模擬していることから、解析結果はおよそ試験結果の平均温度を再現することとなるが、試験では容器下部は水素処理による発熱の影響を受けにくいことから解析結果に比べて低い傾向を示している。

③ 水素濃度

容器内の各高さ位置における水素濃度の解析結果と試験データの比較を図 4-43に示す。解析結果は試験の挙動を概ね良好に予測していると考ええる。

試験においては開始 92 分後（Phase 3）に水素の燃焼により水素濃度が減少するのに対し、解析では水素の燃焼を模擬していないことから、開始 92 分以降においては水素濃度が解析結果の方が試験データに比べて高く推移することとなる。また、その傾向については図 4-44からも確認でき、解析結果は試験結果と比較して、P A Rによる水素処理量の積分値が少なく、一方容器内に残留している水素量を多く予測する。

B. 多区画模擬による評価

① 圧力

容器圧力の解析結果と試験データとの比較を図 4-45に示す。解析結果は試験の挙動を概ね良好に予測しており、解析結果と試験データの差異の原因については 1 区画模擬での議論と同様である。

② 温度

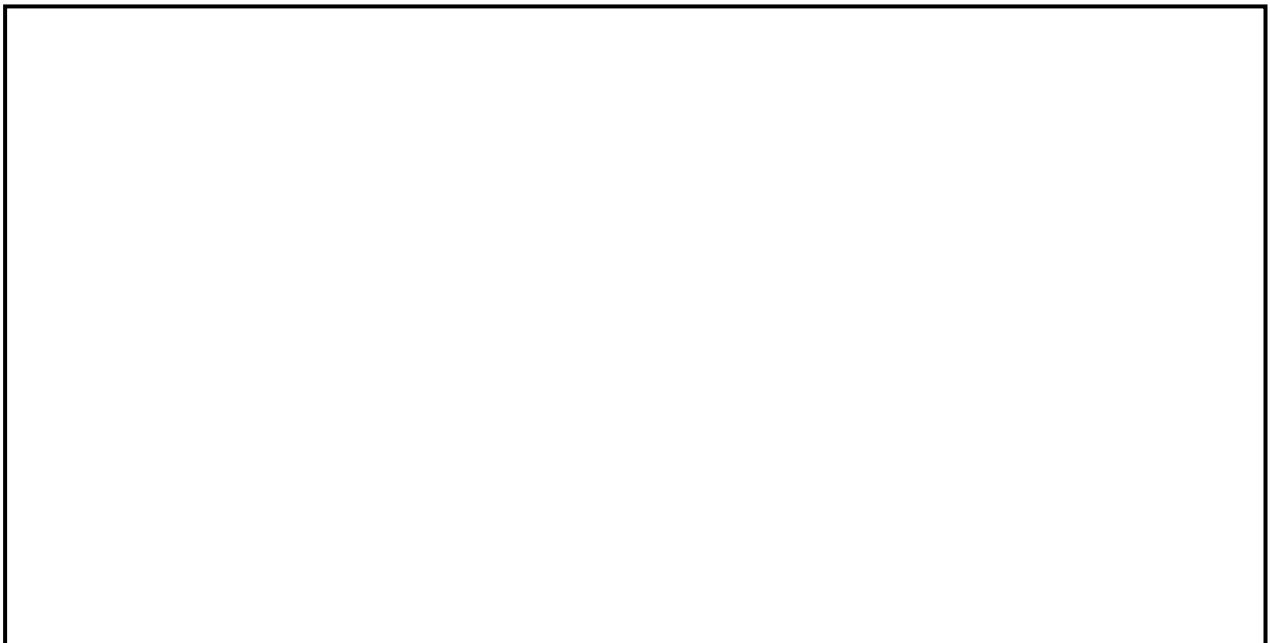
容器内の各高さ位置における雰囲気温度の解析結果と試験データとの比較を図 4-46に示す。下部サンプル区画と水素放出区画を除いて解析結果は試験データに比べ全体的に低い温度傾向となっている。その原因としては、解析ではP A Rの排気がP A R設置区画に一様に拡散するよう模擬し、影響は軽微であるが区画における水素濃度を過小評価することで、P A Rによる水素処理量及び処理に伴う発熱を過小評価する傾向にある。また、Phase 3以降で見られる水素の燃焼を模擬していないことから発生熱量を少なく予測する。さらに、区画分割を実施したことにより、各所の対流熱伝達に基づくヒートシンクによる除熱が過大に評価されることによるものと考えられる。これは1区画模擬による結果と比較することでも推測が可能である。なお、1区画模擬での議論と同様、試

験では開始 92 分後 (Phase 3) に水素の燃焼により、容器上部で急激な温度上昇が見られるが、解析では水素の燃焼を模擬していないことからこの挙動は見られない。

③ 水素濃度

容器内の各高さ位置における水素濃度の解析結果と試験データの比較を図 4-47に示す。解析結果は試験の挙動を概ね良好に予測していると考ええる。

試験では水素注入を停止する期間 (Phase 2 及び Phase 4) において、水素供給領域及び内部シリンダに水素が滞留している。これは、下部水素供給領域からの水素供給及び P A R により発生する上昇流れと、上部領域の下降流れとが拮抗することで、下部の水素供給領域を介さずに中間領域の外周部のみで循環流れが発生してしまうためであると考えられる。



水素濃度の過渡変化としては 1 区画模擬での議論と同様、試験においては開始 92 分後 (Phase 3) に水素の燃焼により水素濃度が減少するのに対し、解析では水素の燃焼を模擬していないことから、開始 92 分以降においては水素濃度が解析結果の方が試験データに比べて高く推移することとなる。その傾向は図 4-48からも確認でき、解析結果は試験結果と比較して、P A R による水素処理量の積分値が少なく、一方容器内に残留している水素量を多く予測する。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 4-5 HR-3 の試験条件

--

表 4-6 THAI 試験条件と実機プラント条件の比較

体系	THAI 試験条件 (HR-3)	3 ループプラント	コメント
P A R		実機向け P A R	
P A R 設置位置		S G 煙突部 (ドーム部)、 外周部	
P A R 台数		5 台	
再結合率		約 1.2kg/h/台	
容器 (体積)		約 67400m ³ (格納容器 体積)	
圧力		0.4MPa[gage]未満	
温度		50~約 140℃	
水素濃度		平均 13%未満	
蒸気濃度		0~100%	
スプレイ		10.6g/s/m ³ (NaOH 含 む)	
水素放出量		770kg	

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

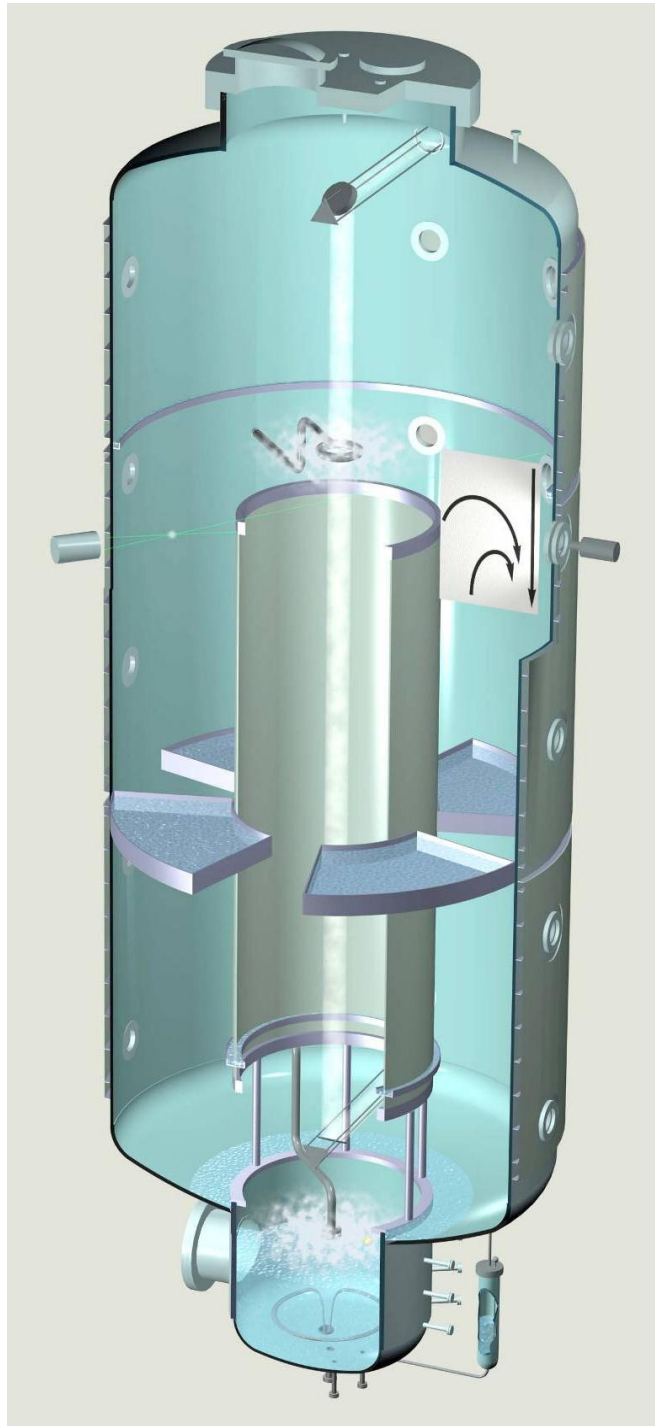


図 4-34 HR試験設備概要

注：内部の円筒の上半分及び付随する水平版は、HR-3試験では取り外されている。

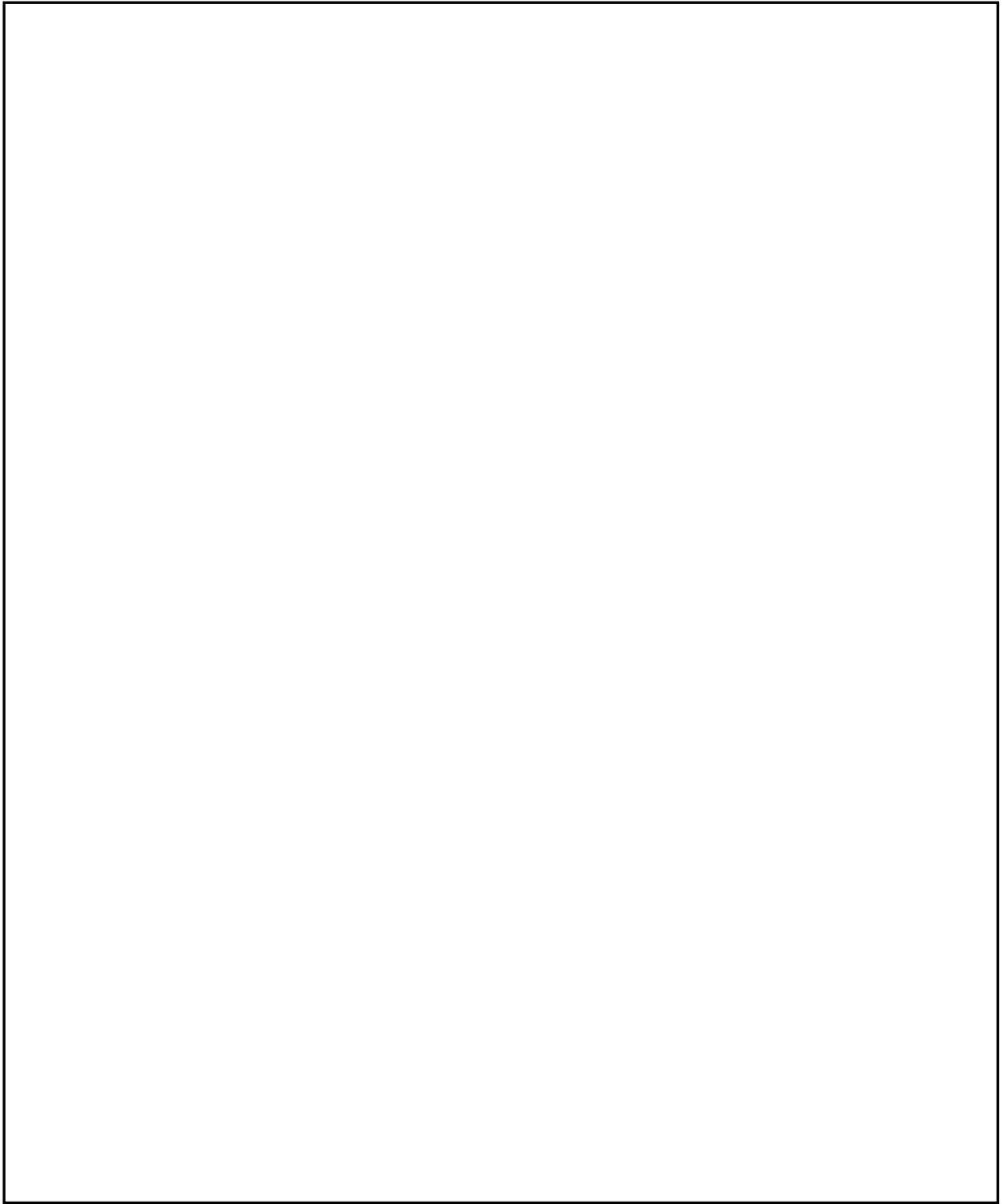


図 4-35 HR試験設備寸法

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

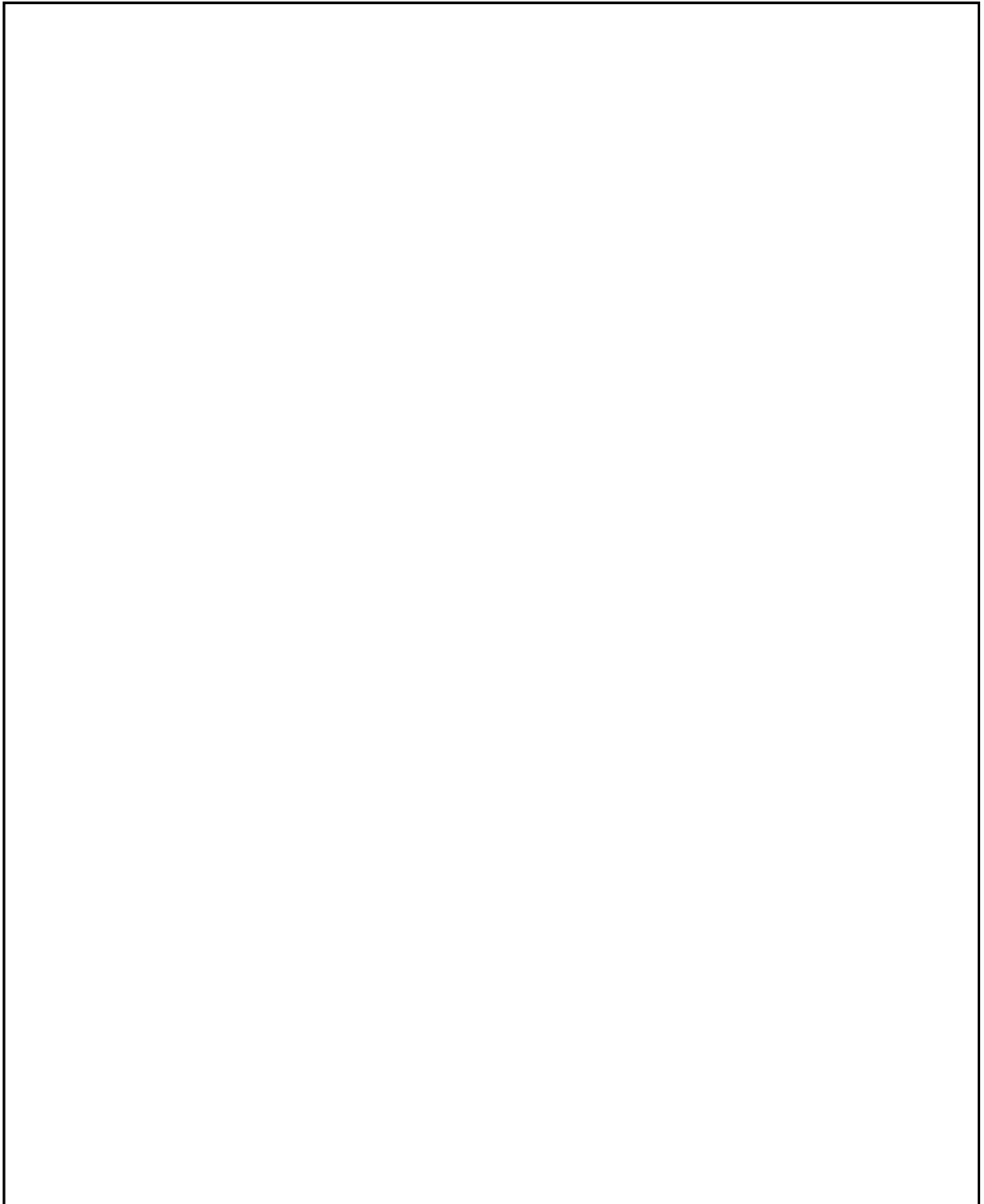


図 4-36 THAI 試験装置及び水素濃度計及び温度計の設置場所

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

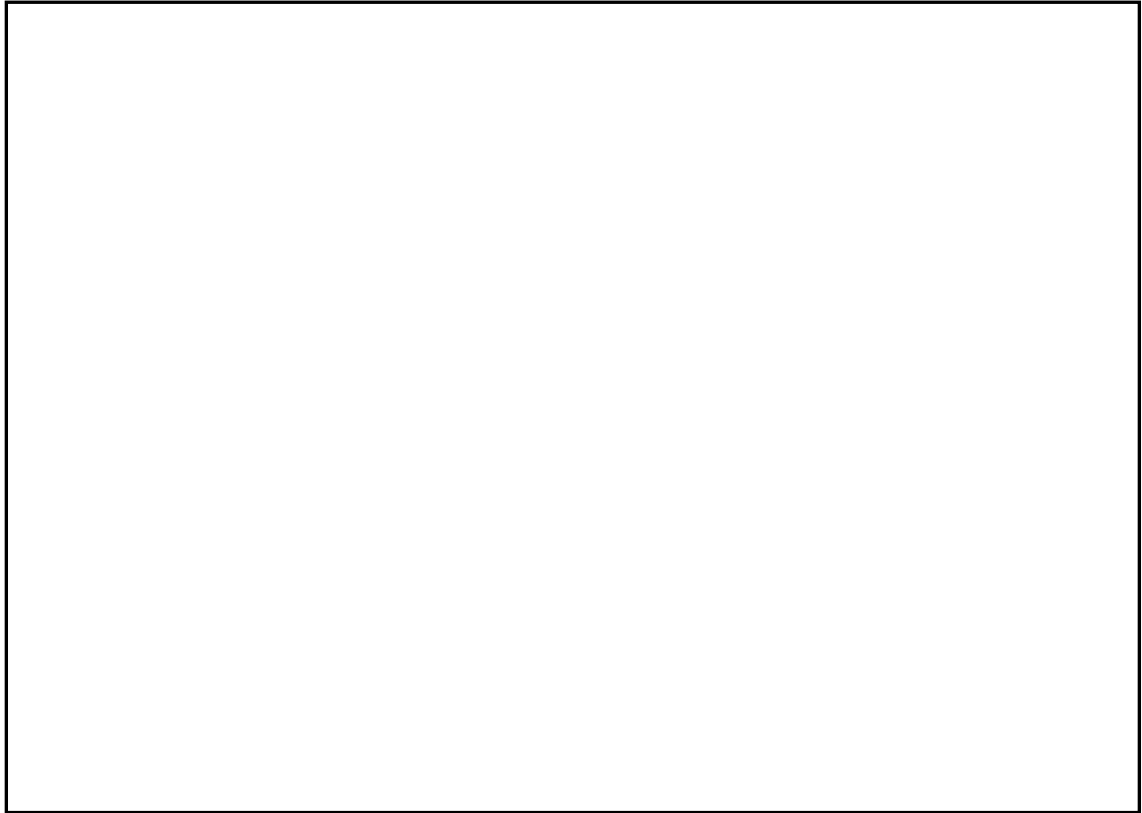


図 4-37 HR-3 試験水素注入流量

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

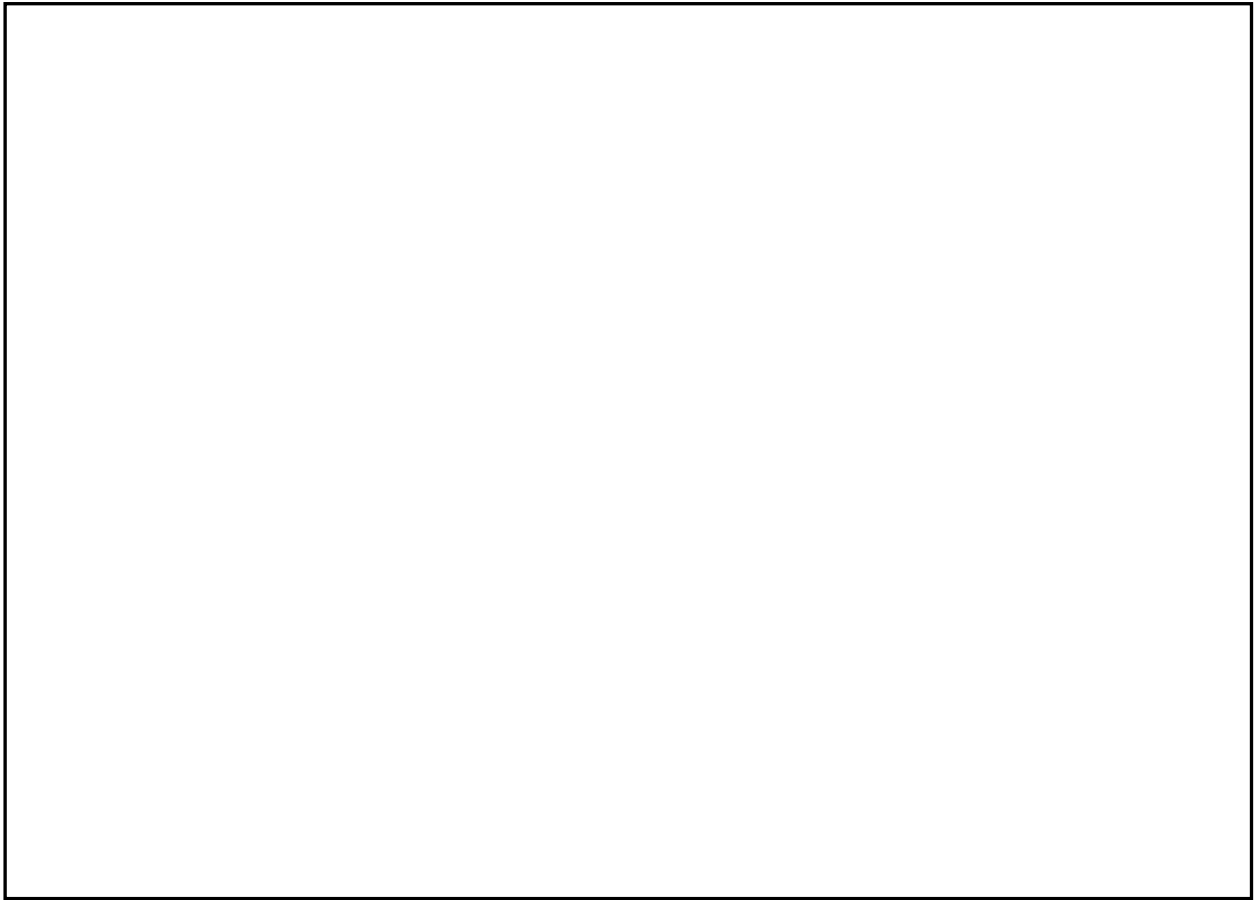


図 4-38 水素除去率の評価式と試験の比較

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

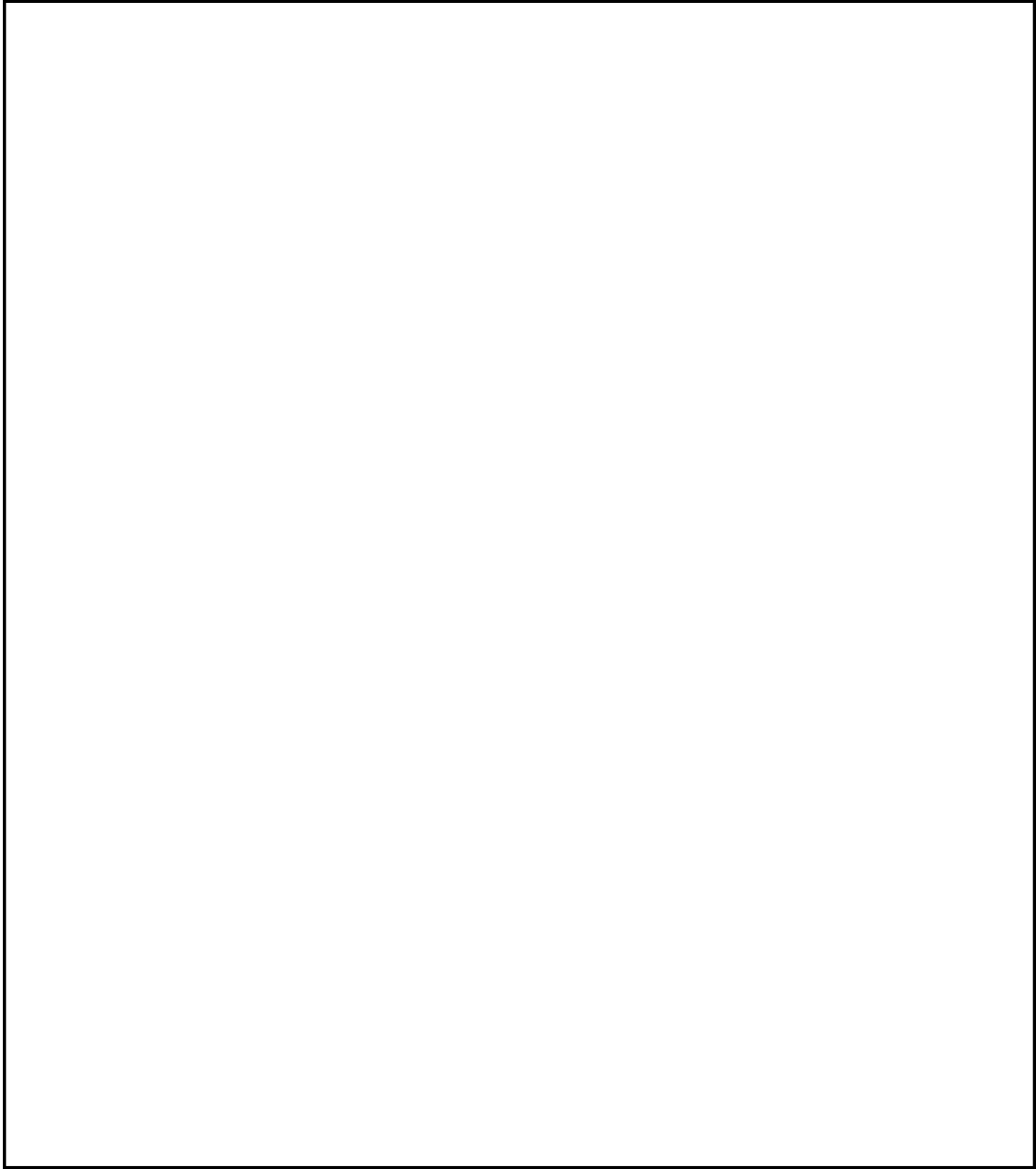


図 4-39 THAI 試験 (HR-3) のGOTHICコードによるノーディング (1 区画模擬)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

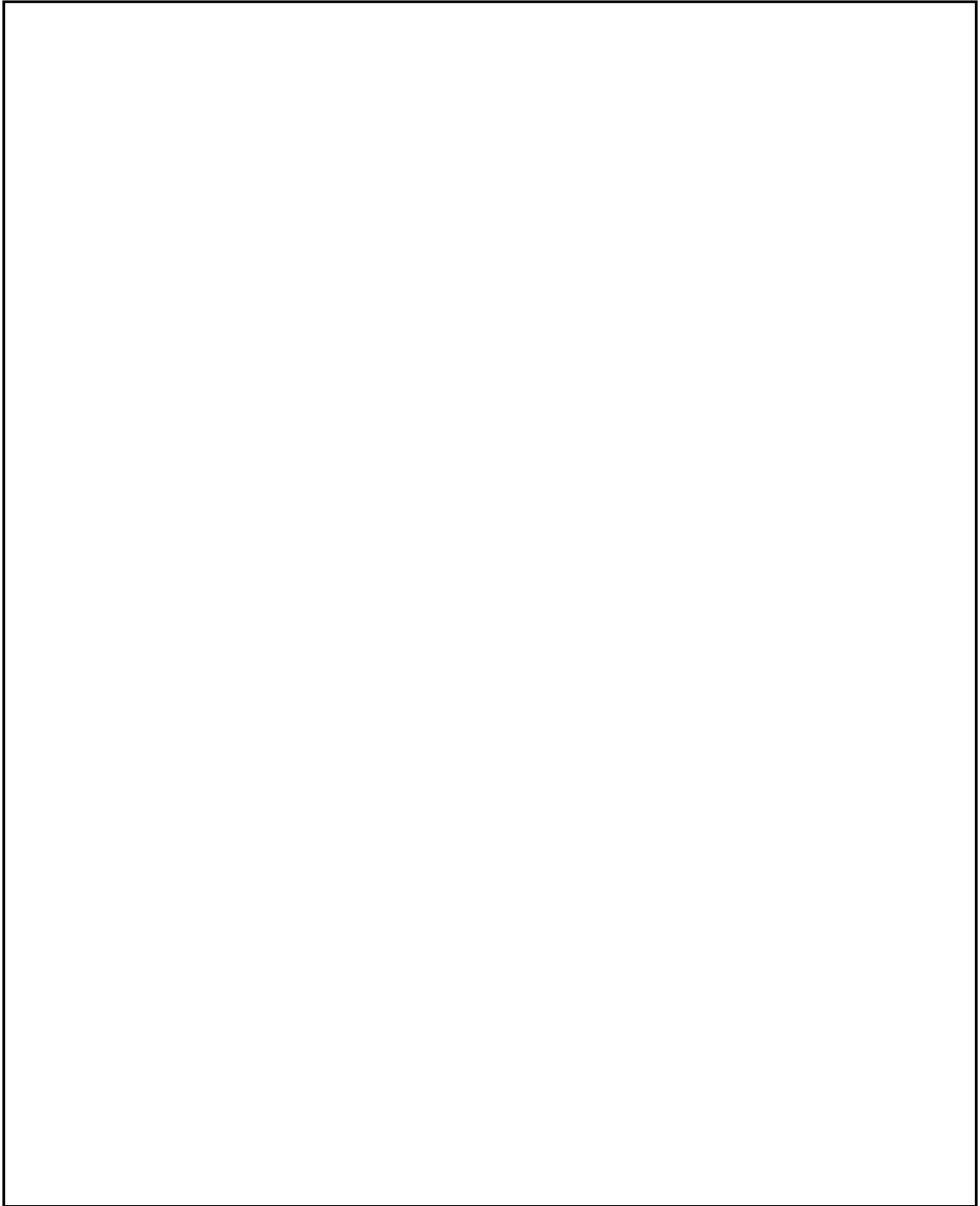


図 4-40 THAI 試験 (HR-3) のGOTHICコードによるノーディング (多区画模擬)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

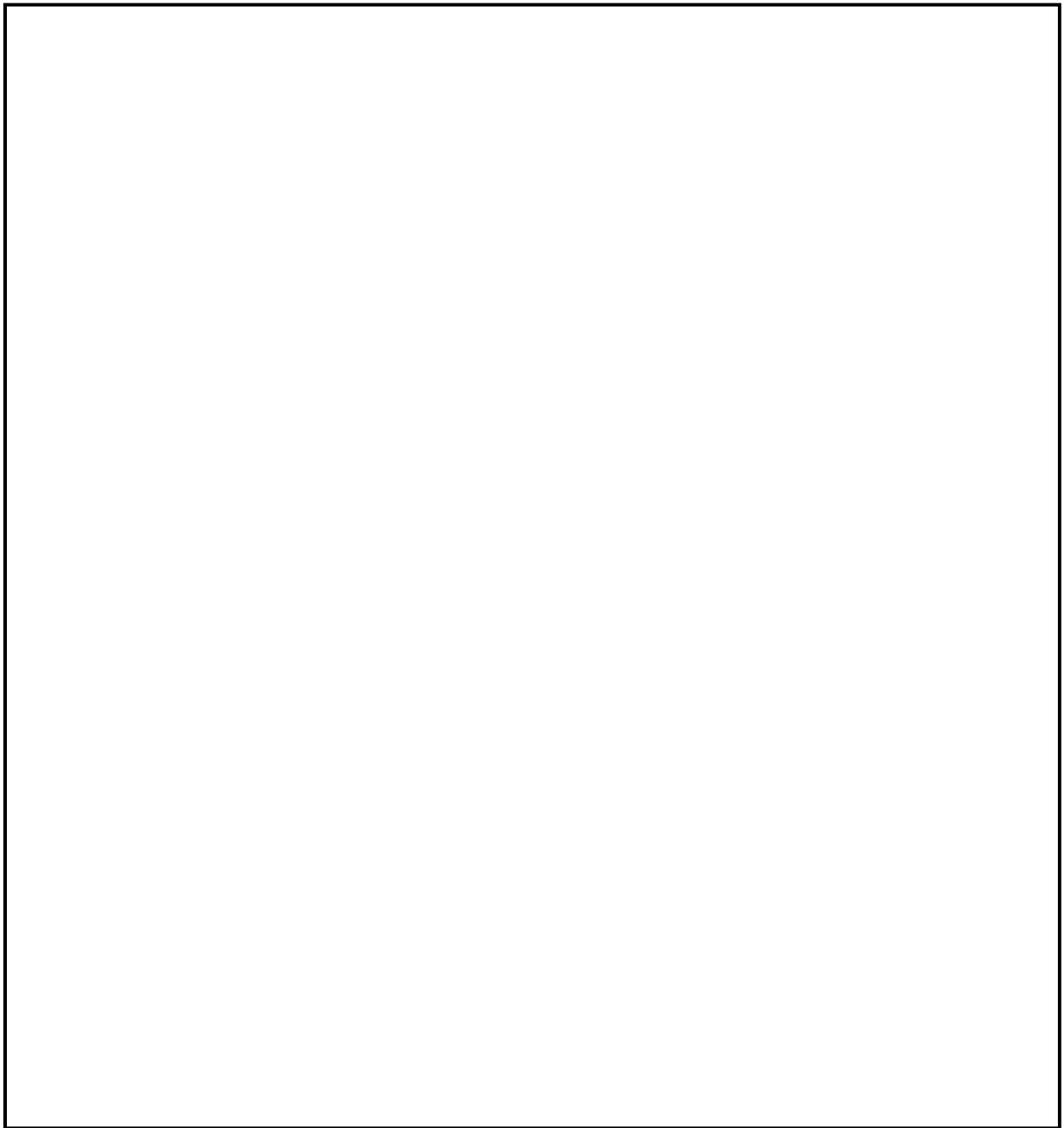


図 4-41 容器内圧力比較 (1 区画模擬)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

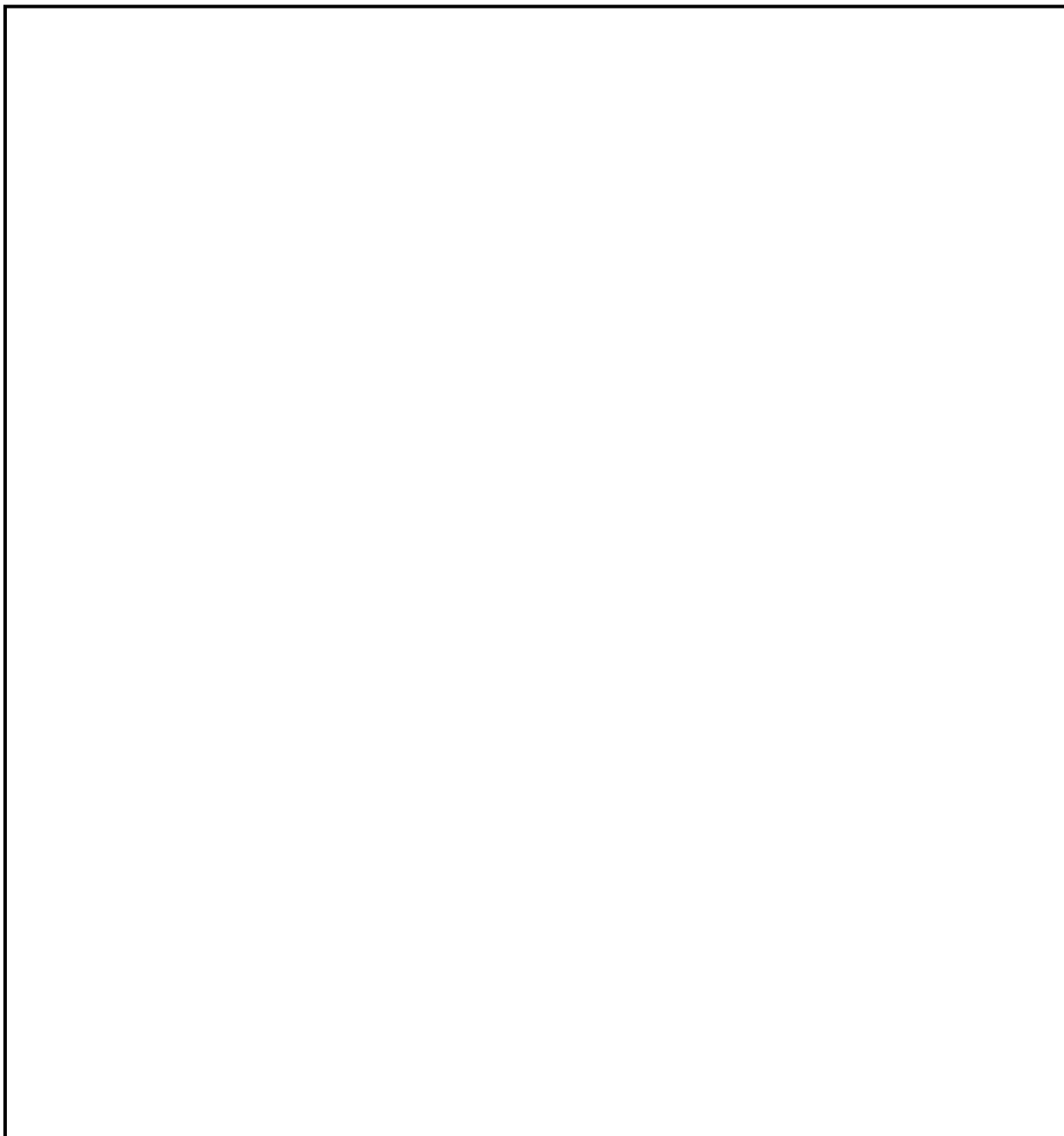


図 4-42 容器内温度分布比較 (1 区画模擬)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

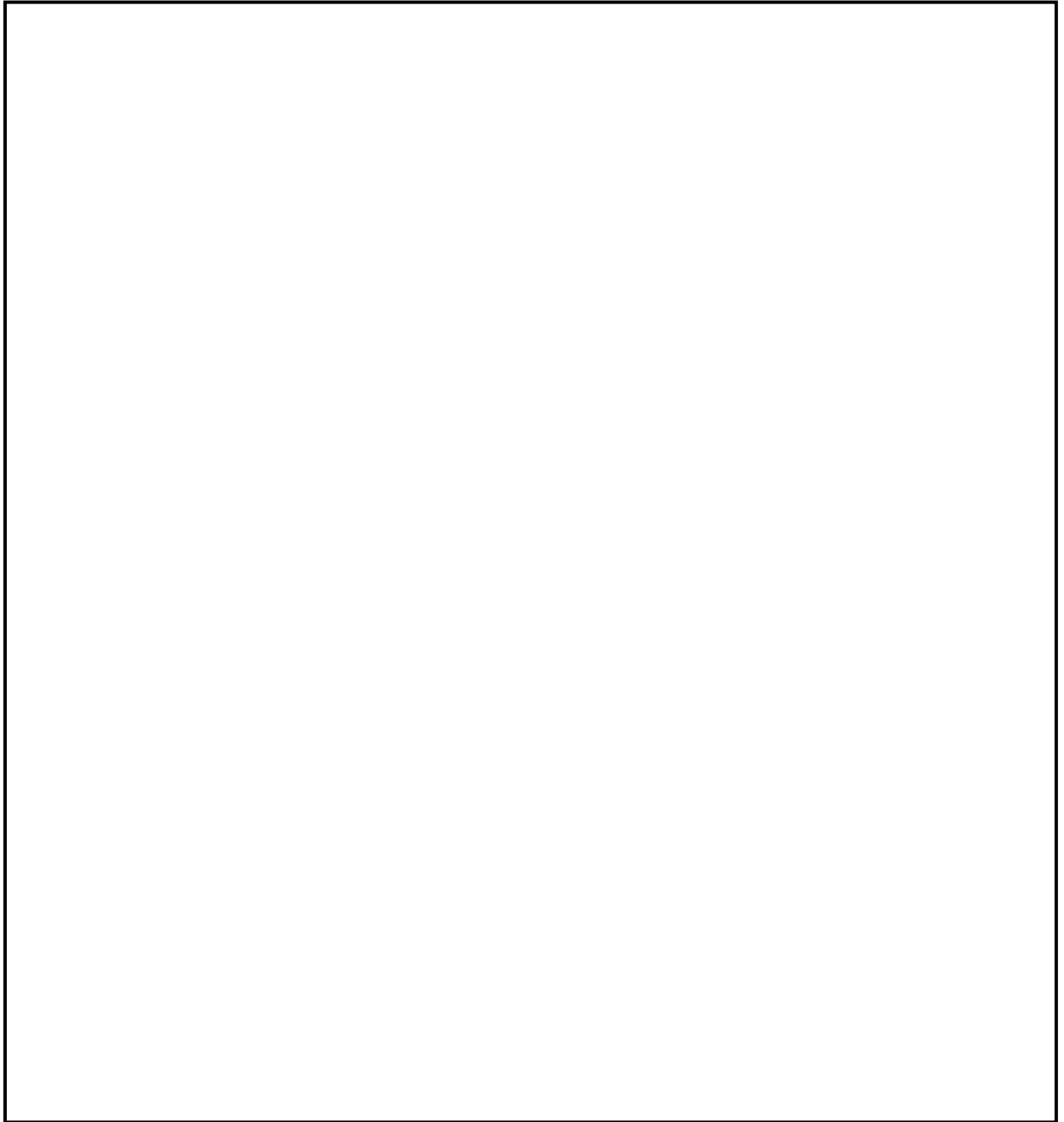


図 4-43 容器内水素濃度分布比較 (1 区画模擬)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

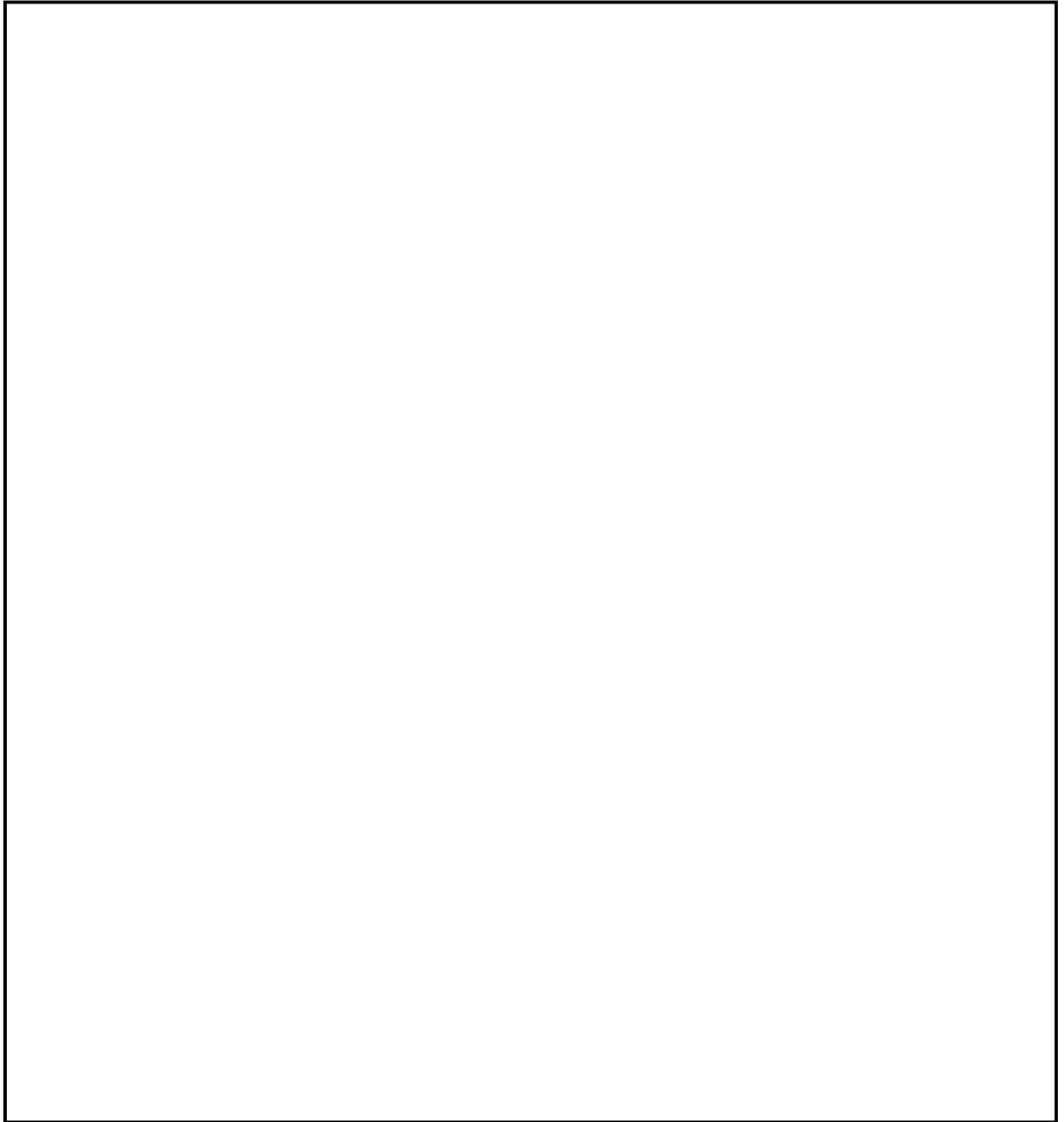


図 4-44 水素処理量の比較 (1 区画模擬)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

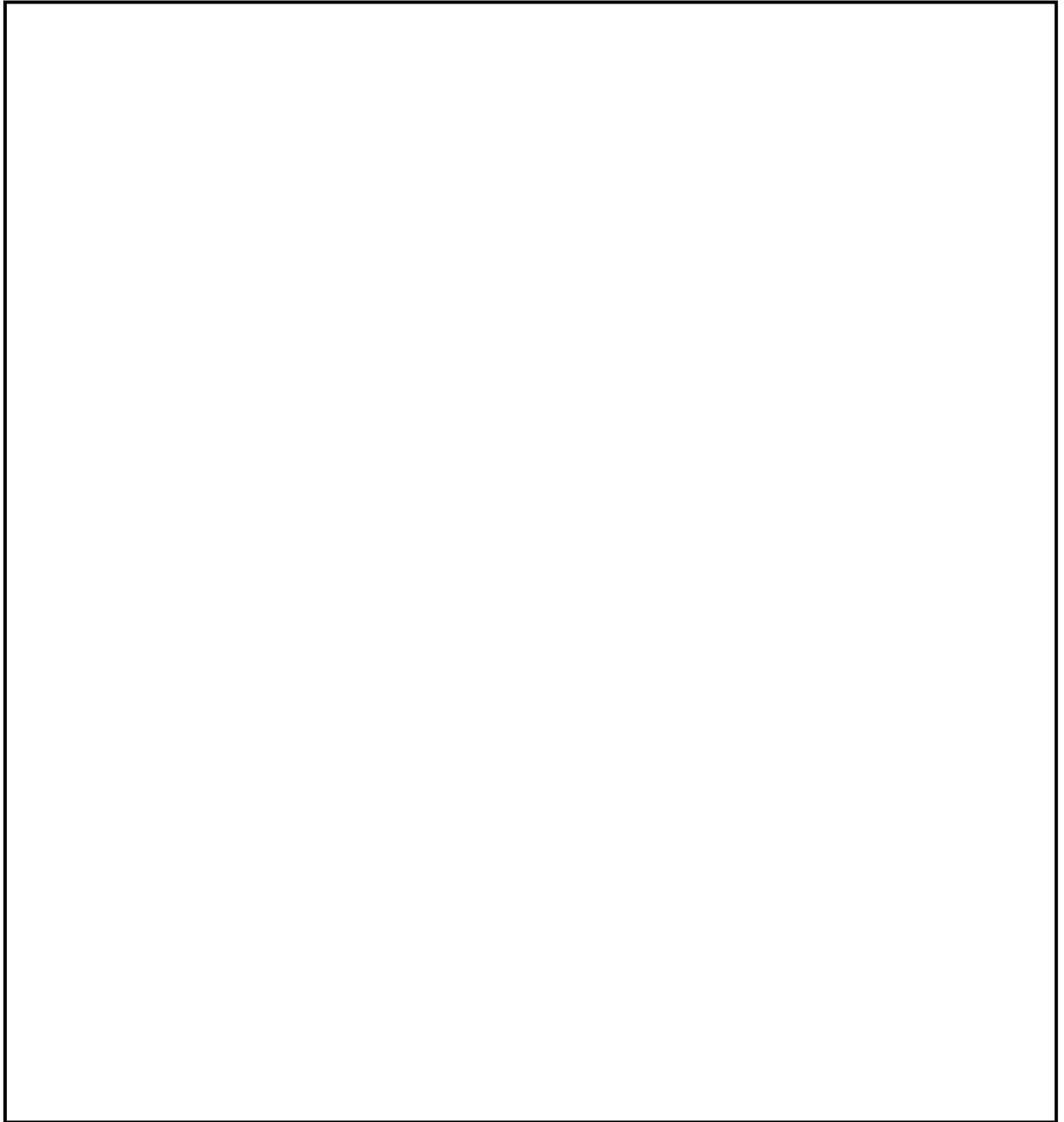


図 4-45 容器内圧力比較（多区画模擬）

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

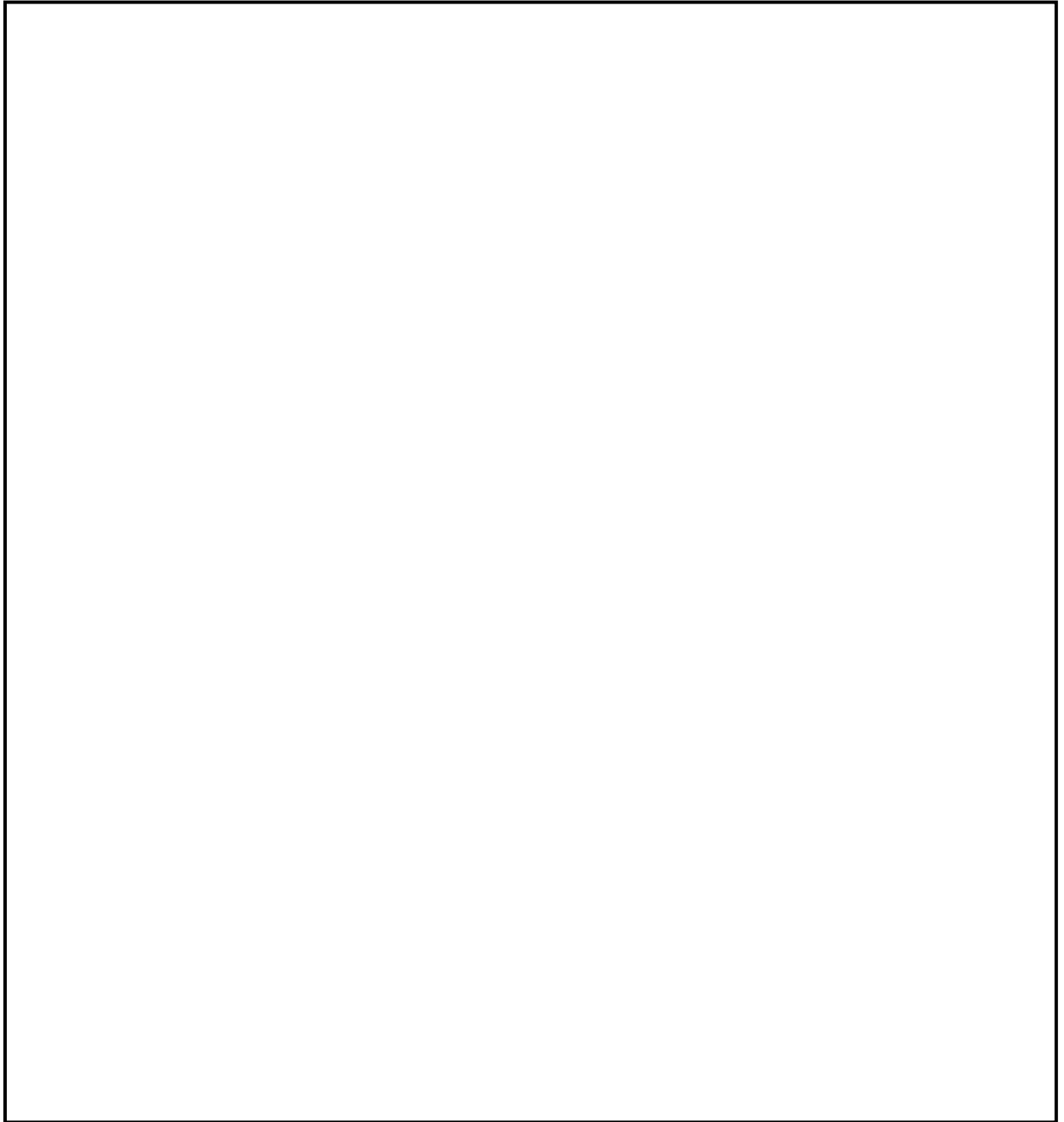


図 4-46 容器内温度分布比較 (多区画模擬)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

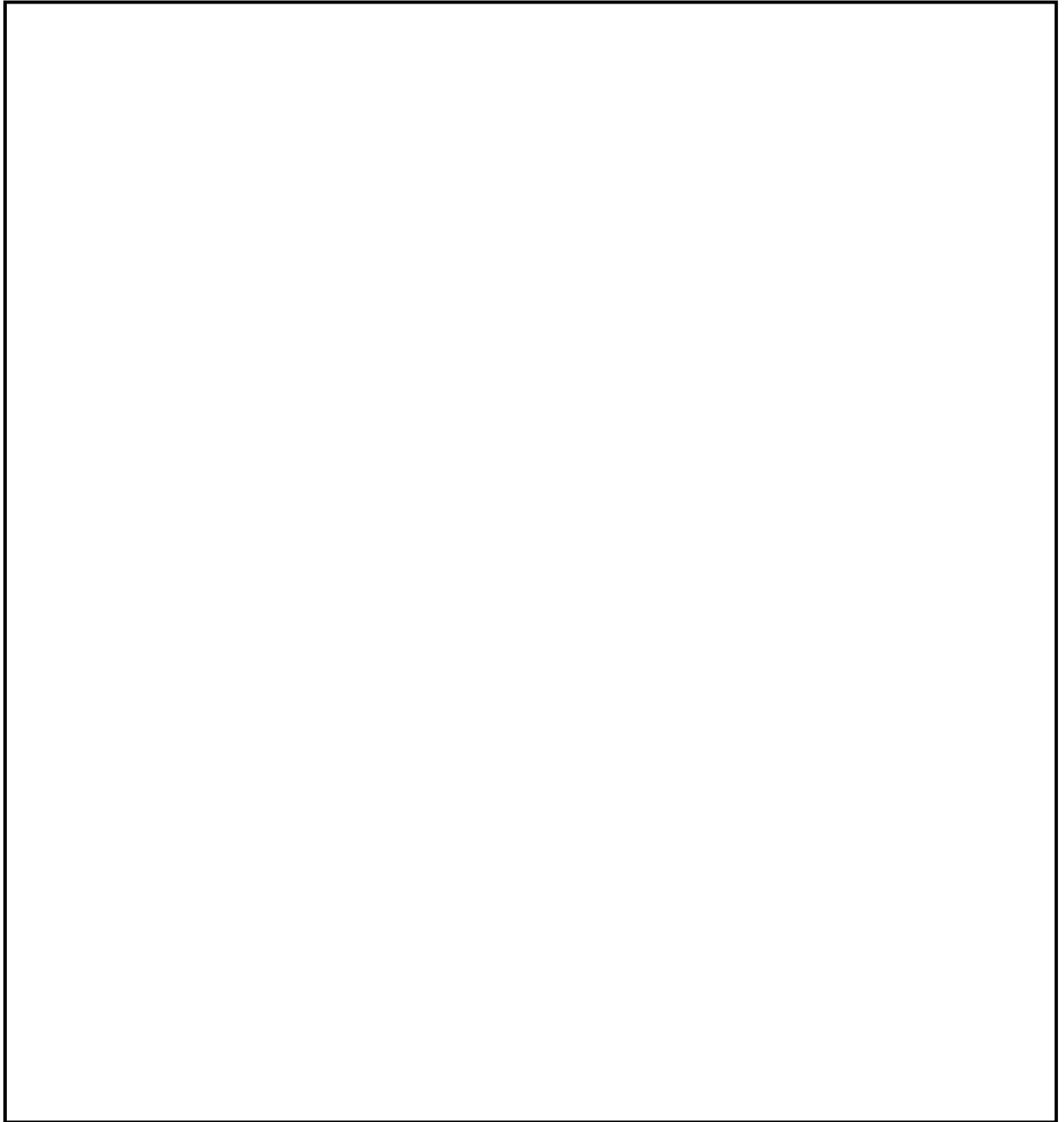


図 4-47 容器内水素濃度分布比較 (多区画模擬)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

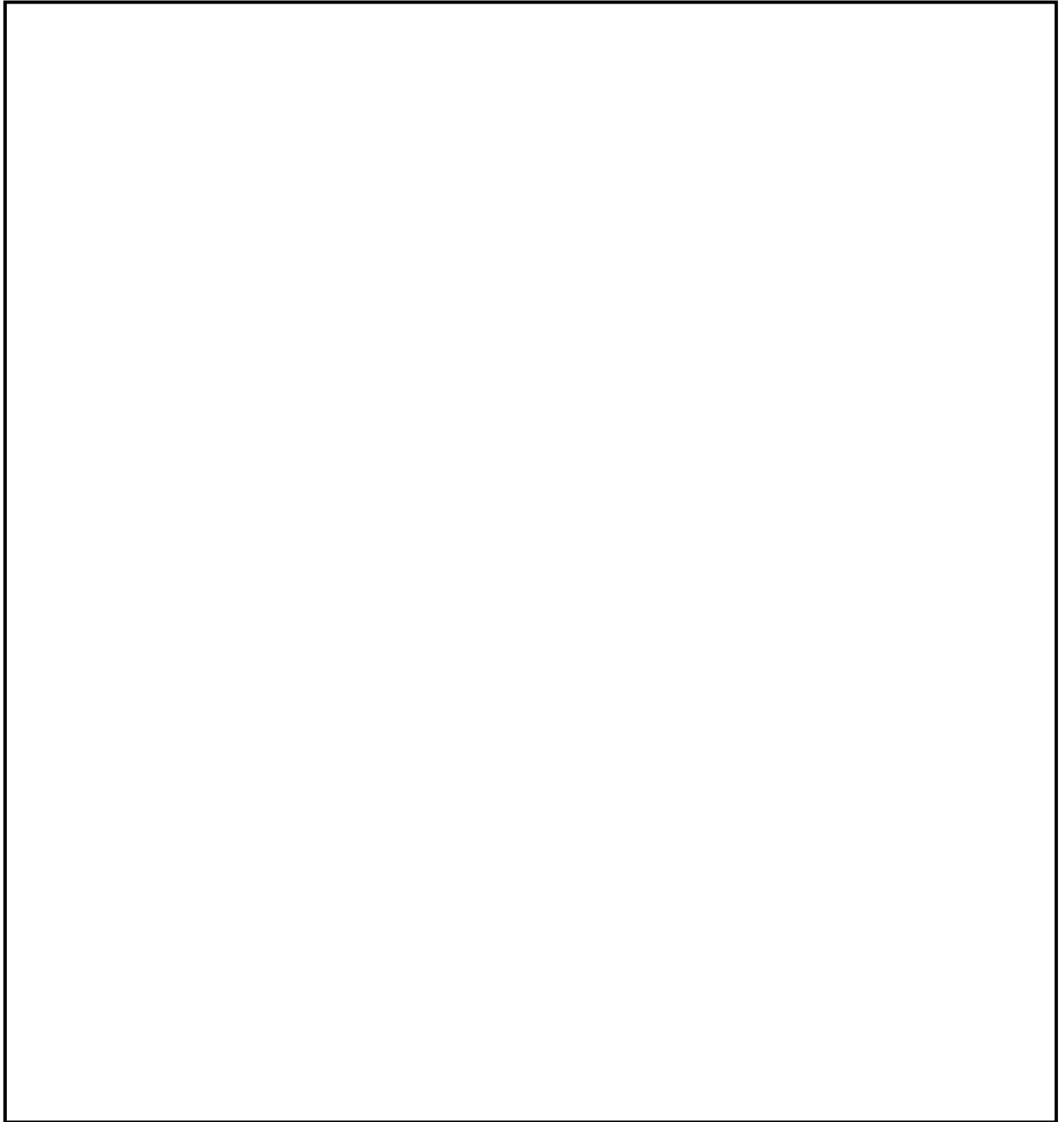


図 4-48 水素処理量の比較（多区画模擬）

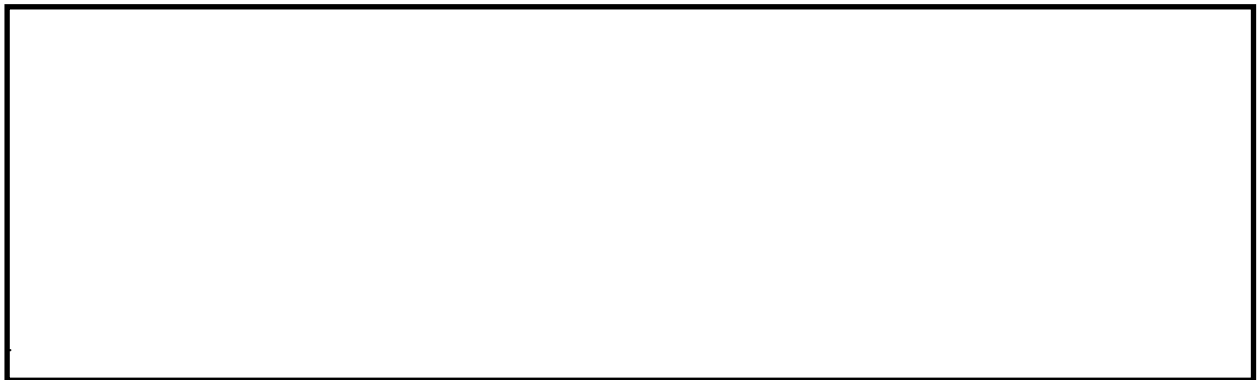
枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

4.7 イグナイタによる水素燃焼モデルの検証

水素処理設備となるイグナイタについて、コード開発元が供給する水素処理に係る燃焼モデルが適切に組み込まれていることを以下に検証する。

GOTHICコードに具備されている燃焼モデルは、コード開発元となるNAIにより水素燃焼に関して熱バランス考慮することで得られる解析解と比較することで検証されている。表 4-7に解析解とコードの予測の結果を比較して示す。GOTHICコードに組み込まれている 3 つの燃焼モデルは、解析解と比べ温度に対し最大約 1%、圧力に対し最大約 0.5%の差であり適切にモデル化されていることが分かる。

表 4-7 解析解とGOTHICコード予測の結果比較



枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

4.8 実機解析への適用性

妥当性確認の結果より、実機解析にてモデル化が必要となる現象に対するGOTHICコードの適用性を検討する。

4.8.1 区画内・区画間の流動

(1) 実験解析による実機適用性検討

格納容器内の、破断区画に放出される1次冷却材及び水素の流動と、各区間及びドーム部内での水素の拡散及び混合挙動は、流体挙動を模擬するための質量、エネルギー及び運動量の保存式に加え、各種の構成式・相関式、非凝縮性ガスの輸送モデルが支配要素となる。これら関連するモデルの総合的な実機プラント解析への適用性について、NUPEC試験 Test M-7-1 データを用いて検証した。同試験の試験条件は、重要事故シーケンスとして選択されるLOCA時のECCS注入失敗／格納容器スプレイ成功に相当し、GOTHICコードは格納容器圧力の時間変化、雰囲気温度及びヘリウム（水素）濃度の時間・空間変化を良好に再現している。これにより、GOTHICコードは水素を含む流体の格納容器内の混合挙動を適切に模擬できるものと判断できる。

また、スプレイ有無の影響についても Test M-4-3 試験を用いたコード適用性の検討を実施した。スプレイがないことによりドーム部での蒸気凝縮、蒸気及びヘリウムの均一拡散・混合の影響が弱まる。しかし、Test M-7-1 と同様に、試験ではドーム部内での水素濃度の成層化、また、上下区画間の有意な水素濃度差は生じず、格納容器全体に渡りヘリウムは均一に混合していることが確認された。また、GOTHICコードは、スプレイの有無にかかわらず、格納容器圧力、ドーム部の雰囲気温度及びヘリウム濃度、また、格納容器内の各区画の水素濃度を良好に予測する。即ち、スプレイの有無にかかわらず、コードは格納容器内の流動を適切に模擬できるものと判断できる。

なお、NUPEC試験 Test M-7-1 では、破断口の直上に存在する蒸気発生器室出口部のヘリウム濃度に対し、GOTHICコードが過小評価する傾向が確認された。これは、試験では区画内で蒸気/ヘリウムを上方に放出していることから解析でも同様の境界条件を設定しているが、区画内での流体の異方性に対する模擬が、隣接する区画に対し多めの流量を与えることでやや損なわれているものと考えられる。

しかし、水素燃焼の重要事故シーケンスとして選定される事象では、配管の両端破断を想定しており、破断口からの蒸気/水素が区画内に満たされるように放出を仮定するのが適切であると考えられる。これは、破断口となるループ室に隣接する比較的狭いキャビティ区画や外周区画への水素の流入を増やす傾向となり、過渡的にこれら局所の水素濃度を高めることとなる。また、同試験解析では実機プラント解析で重要となるドーム部の雰囲気温度・ヘリウム濃度を良好に模擬している。これは、破断区画からの流れの異方性について実験と解析では差異が見られるものの、格納容器内の構造上、結果として複数の経路を経てドーム部に流入する全体の流れをコードが適切に模擬してい

る。従って、NUPEC試験 Test M-7-1に見られた蒸気発生器室解析予測の誤差が実機プラント解析に与える影響はないものと判断できる。

また、ループ数が異なるプラントにおいても、破断口から流出する冷却材や水素は格納容器内の各区画を通過し、液相は床面に、蒸気及び水素は上部区画に流入する基本的な流動は共通である。ループ数が異なることにより、冷却材や水素の移流の駆動力、凝縮等の熱的变化の度合いが異なるが、GOTHICコードはNUPEC試験の Test M-7-1 及び Test M-4-3 という異なる事象進展に対して適切な予測を与えている。これは、コードの能力と模擬手法が適切であることを示しており、ループ数が異なることによる格納容器内の流動の差は、コードにより十分に模擬されるものと判断できる。

(2) 格納容器ドーム部のノード分割の妥当性

実機プラントの解析への適用に係る不確かさの一つとして、解析におけるノーディングが挙げられる。PWRプラントとNUPEC試験装置規模及びノーディングの比較を表 4-8及び表 4-9に示す。

NUPEC試験解析では格納容器を、により一つのボリュームを 分割している。NUPEC試験 Test M-7-1について、ノーディングの分割数による解析結果への影響評価を実施するため、格納容器ドーム部を1区画とした集中定数系による解析を実施した。

NUPEC試験 Test M-7-1における格納容器ドーム部の温度分布の試験測定値及び、Test M-7-1を対象とし、格納容器ドームを による 分割したGOTHICコードによる実験解析結果を図 4-9に示す。試験結果と試験測定値を比較すると、GOTHICコードの予測は試験に対し最大5°C程度の誤差が見られるものの、格納容器内の温度挙動を適切に再現している。また、ヘリウム濃度に対する試験測定値とGOTHICコードの予測結果の比較を図 4-11に示す。格納容器内のヘリウム濃度の挙動についても、良好に一致している。

次に、Test M-7-1の実験解析について、格納容器ドーム部の分割を1区画とした集中定数系による解析を実施した。ドーム部の温度の比較を図 4-49に、ドーム部のヘリウム濃度の比較を図 4-50に示すが、試験測定値及び上記の 分割した解析結果と比較しても大きな差異が見られていない。この理由としては、格納容器ドーム部において比較的溫度分布が小さく、局所温度による熱構造材の除熱効果の影響が小さいためであると考えられる。

Test M-7-1のように格納容器ドーム部の温度分布が比較的小さい場合においては、上記のドーム部の温度及びヘリウム濃度等の結果から、格納容器ドーム部の空間の分割により定義される各セルのバルク温度の変化による解析結果への影響は小さいと考えられる。

実機プラントの有効性評価で想定するシーケンスは、大破断LOCA+ECCS失敗であり、NUPEC試験 Test M-7-1の結果を踏まえても、破断流による流れの形成及び格納容器スプレイ、水素処理設備の作動等によって、格納容器ドーム部における混合が良好であることが予想される。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

したがって、上記のNUPEC試験 Test M-7-1 のドーム部分割を変えた場合の評価結果を踏まえれば、格納容器ドームの分割を [] による [] 分割とした場合において、構造材との凝縮計算に使用する格納容器ドーム部各セルのバルク温度を使用しても、有効性評価結果に与える影響は小さいと考える。

なお、壁面との熱伝達を有限体積における数値計算モデルで評価する際は、その壁面が存在する有限体積の代表温度を定め、壁面の表面温度との温度差により伝熱量を定義する。従って、セルのサイズを詳細にすると局所的な温度分布が再現され、場所ごとの伝熱量が異なる場合がある。しかし、評価対象とする空間全体の温度分布を適切に模擬できる程度のセルサイズが選択されていれば、壁面近傍において温度勾配が生じた場合も、伝熱量の増加により温度差が縮小すること、境界層に対して主流からの流れ込みが発生することにより補償的な作用が生じる。このため、結果的に局所的な温度分布があっても壁面に対する総量としての伝熱量は保存され、評価結果に与える影響は小さくなる。なお、GOTHICコードにおいて使用可能な熱伝達モデルは、一般的に壁面近傍において見られる温度勾配の影響外にある主流の温度計測結果から導かれており、極端に詳細なセルサイズを要求するものではない。

また、NUPEC試験においては表 4-10に示すように破断箇所・流量及び破断流組成・スプレイの有無を変えた様々な条件により、水素の代替気体であるヘリウムの分布挙動が測定されている。

表 4-10に示すように、SG基礎部及び加圧器逃がシタンクといった格納容器下部区画からの放出時においては流量及び破断流組成、スプレイの有無に関わらず濃度成層化現象は確認されず、格納容器内は概ね一様に混合している。また、加圧器気相部破断のように破断位置が格納容器内の上部に位置し、さらに格納容器スプレイ等の循環流がないケースで試験が行われた Test M-8-1 では、破断位置より上方に熱成層化が生じ、これによりドーム部の高さ方向及び下部区画との間で濃度差が生じるという濃度成層化現象が確認されたものの、Test M-8-1 と破断箇所・流量及び破断流組成について概ね同様の条件であり、スプレイがある場合の試験として Test M-8-2 では、格納容器ドーム部においては Test M-8-1 と異なり濃度成層化現象は確認されなかった。

上記の破断箇所・流量及び破断流組成・スプレイの有無を変えた様々な条件で実施しているNUPEC試験の知見から、以下のとおり推測される。

- ・格納容器下部区画からの放出においては、放出量・スプレイの有無に関わらず格納容器ドーム部において濃度成層化現象は観察されない。
- ・格納容器上部区画からの放出においては、スプレイがない場合において濃度成層化現象が観察されたが、スプレイがある場合においてはスプレイによる格納容器内の攪拌効果により濃度成層化現象は観察されなかった。これはスプレイに伴う水素の拡散・混合が促進されるためと考えられる。実機プラントにおいては、本設の格納容器スプレイポンプよりも流量の少ない代替ポンプによる格納容器スプレイを実施することがあるが、代替ポンプによる格納容器スプレイ

が、事故時の格納容器冷却に必要な液滴径は確保されており、また格納容器内の水素攪拌に必要な流量についても確保できていると評価される（添付3）。したがって、格納容器内における水素拡散・混合の観点からも、代替ポンプによる格納容器スプレイが、本設スプレイと同様に格納容器全体における動的な攪拌効果及び蒸気凝縮による格納容器内の攪拌効果が期待できるといえる。

したがって、上記のNUPEC試験の結果を踏まえると、実機解析においても多くのケースにおいて格納容器ドーム部の温度分布については概ね一様となると考えられることから、実機においても格納容器ドーム部のノーディングの差により解析結果において大きな差異が生じないと予測されるため、実機解析において格納容器ドーム部を[]により一つのボリュームを[]分割としていることは妥当であると考えられる。

(3) 濃度成層化が生じる場合における格納容器ドーム部のノード分割について

(2)においては格納容器内の混合が十分になされている場合の格納容器ドーム部のノード分割について考察を行なったが、格納容器ドーム部において濃度成層化が発生する場合について考察を実施する。

格納容器ドーム部において濃度成層化が確認されたNUPEC試験のケースとして、NUPEC Test M-8-1が挙げられる。Test M-8-1は加圧器気相部破断を想定した試験であり、本試験において加圧器室内で発生したヘリウム及び水蒸気は加圧器室上端の開口部を經由して格納容器ドーム部へ直接放出されることから、ドーム部のヘリウム濃度が顕著に高くなることが同試験の特徴である。この挙動をGOTHICコードで模擬するためには、加圧器室開口部からドーム部への流れを適切に模擬する必要があり、格納容器ドーム部の分割を[]による[]分割とし、検証解析を行った。なお、格納容器ドーム部の分割の概要を図 4-51に示す。

上記の通り格納容器ドーム部について分割をした際の格納容器のヘリウム濃度及び温度のGOTHICによる解析結果と試験結果の比較を図 4-52及び図 4-53に示す。

格納容器のヘリウム濃度については図 4-52に示すように、格納容器上下部の濃度差については、試験結果で確認される顕著な濃度差の予測には至らないものの、下部区画と比較してドーム部でよりヘリウム濃度が高くなる傾向は再現することができた。また、破断位置より上部においてヘリウムは高い濃度で均一になる傾向、すなわち格納容器ドーム部における成層化の傾向についても再現することができた。

格納容器の温度については図 4-53に示すように、格納容器のドーム部における温度測定点、SG煙突部及び下部区画の温度を再現することができ、また格納容器ドーム部がその他の区画に比べ温度が高くなる傾向についても再現することができた。

以上の結果から、水素成層化するようなケースについても格納容器ドーム部のノード分割を細かくすることで、GOTHICにより十分に再現可能である。

したがって、実機解析のノーディングについては基本的には格納容器ドーム部を [] [] により一つのボリュームを [] 分割とすることで、水素濃度挙動等については十分に確認することができると考えられる。一方で水素成層化が懸念される場合については、流体の流れを再現するために、より細かいノーディングにより格納容器ドーム部を分割すれば良いと考えられる。

なお、濃度成層化が確認された試験としてPANDA試験もあるが、PANDA試験は2つの圧力容器が配管で接続された特殊な試験体系（ESBWRを想定）であり、接続配管で接続された別のDWに放出区画からヘリウムが移動して成層化が発生している（添付2参照）。しかし、PWRの格納容器においてはPANDA試験装置のような構造の箇所は存在しないため、このようなメカニズムによる成層化は考えられない。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 4-8 PWRとNUPEC実験装置の比較

項目 \ プラント	2 ループ	3 ループ	4 ループ	NUPEC
プラント熱出力	1650 MWt	2652 MWt	3411 MWt	—
スプレイ系 (全能力)	2 トレイン	2 トレイン	2 トレイン	1 トレイン
格納容器内自由体積	42,400 m ³	67,900 m ³	73,700 m ³	1,300m ³

表 4-9 NUPEC 実験解析 (Test M-7-1) 及び 3 ループプラント解析の空間分割

	NUPEC 実験解析	3 ループプラント
ドーム部		
下部		

() 内は格納容器内空間のセル数を示す。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

表 4-10 NUPEC試験条件比較

試験条件	Test NO.	試験条件									成層化	
		CV初期温度 (°C)	ヘリウム放出		水蒸気放出			スプレイ水		ヘリウム、水蒸気放出位置		
			流量 (kg/s)	時間 (min)	流量 (kg/s)	時間 (min)	ヘリウム、水蒸気温度 (°C)	温度 (°C)	流量 (kg/s)			時間 (min)
CV内ヘリウム濃度分布・混合試験	M-2-2	RT	0.027	30	—	—	—	—	—	—	SG基礎部	なし
	M-2-3	RT	0.027	30	—	—	—	—	—	—	加圧器逃がしタンク	なし
放出水蒸気による濃度分布・混合試験	M-4-1	RT	0.027	30	0.04	30	68	—	—	—	SG基礎部	なし
	M-4-3	RT	0.027	30	0.33	30	115	—	—	—	SG基礎部	なし
スプレイによるヘリウム濃度分布・混合試験	M-5-1	RT	0.027	30	—	—	—	RT	5 (18m ³ /h)	30	加圧器逃がしタンク	なし
スプレイによるヘリウム濃度分布・混合試験	M-7-1	(初期)~70	0.0 ↓ 0.03 ↓ 0.0	0 ↓ 15 ↓ 30	0.08 ↓ 0.03	0 ↓ 30	~110	(初期)40	19.4 ↓ 19.4 (70m ³ /h)	0 ↓ 30	SG基礎部	なし
上部破断による混合試験	M-8-1	RT	0.027	30	0.33	30	115	—	—	—	加圧器逃がし弁(加圧器室)	有り
	M-8-2	(初期)~70	0 ↓ 0.033 ↓ 0	0 ↓ 15 ↓ 30	0 ↓ 0.03	0.08 ↓ 30	90	40	19.4 ↓ 19.4 (70m ³ /h)	0 ↓ 30	加圧器逃がし弁(加圧器室)	なし

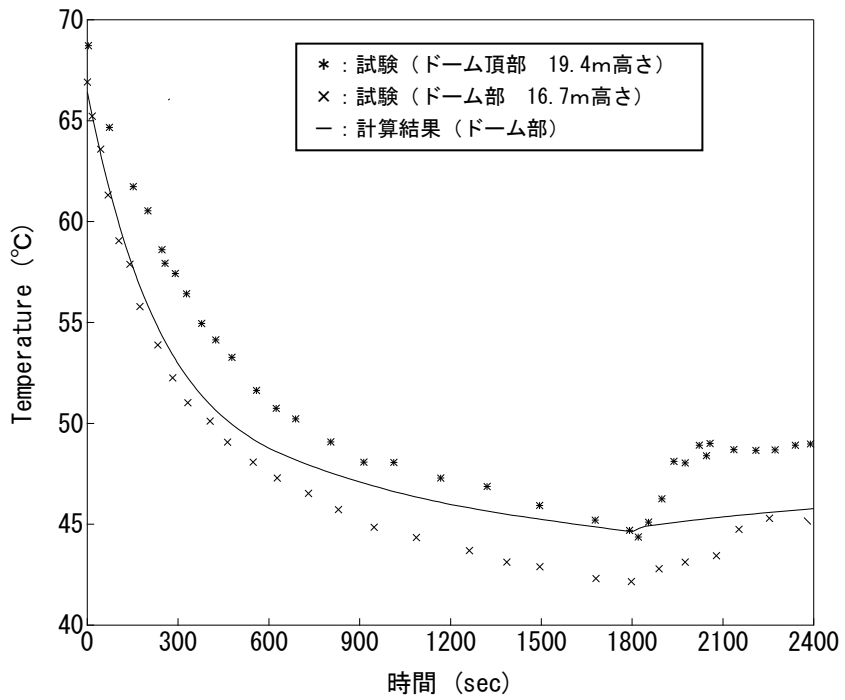


図 4-49 解析結果 (ドーム部 1 区画模擬) 格納容器ドーム部温度分布 (Test M-7-1)

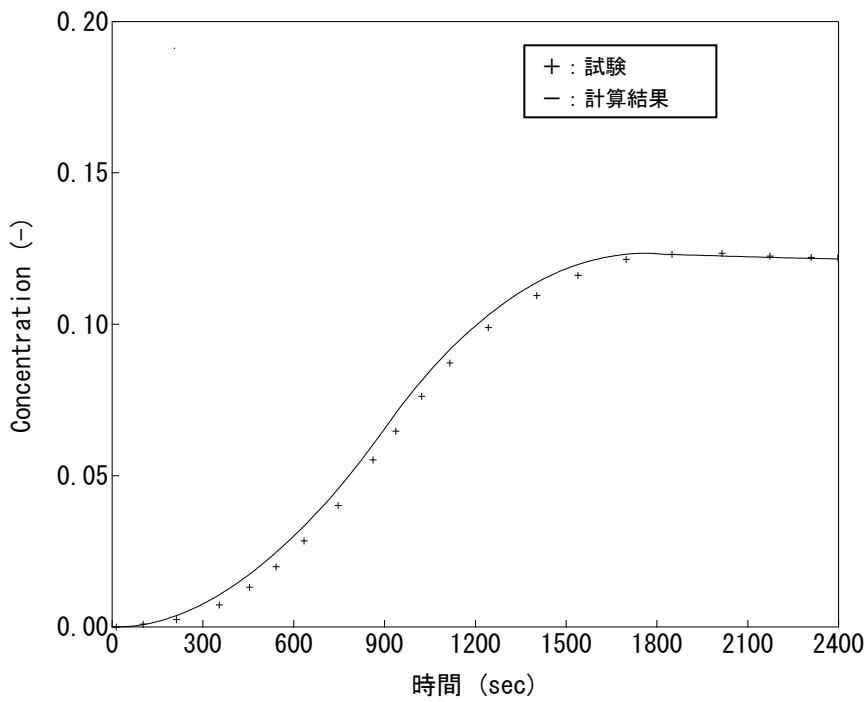


図 4-50 解析結果 (ドーム部 1 区画模擬) 格納容器ドームヘリウム濃度 (Test M-7-1)

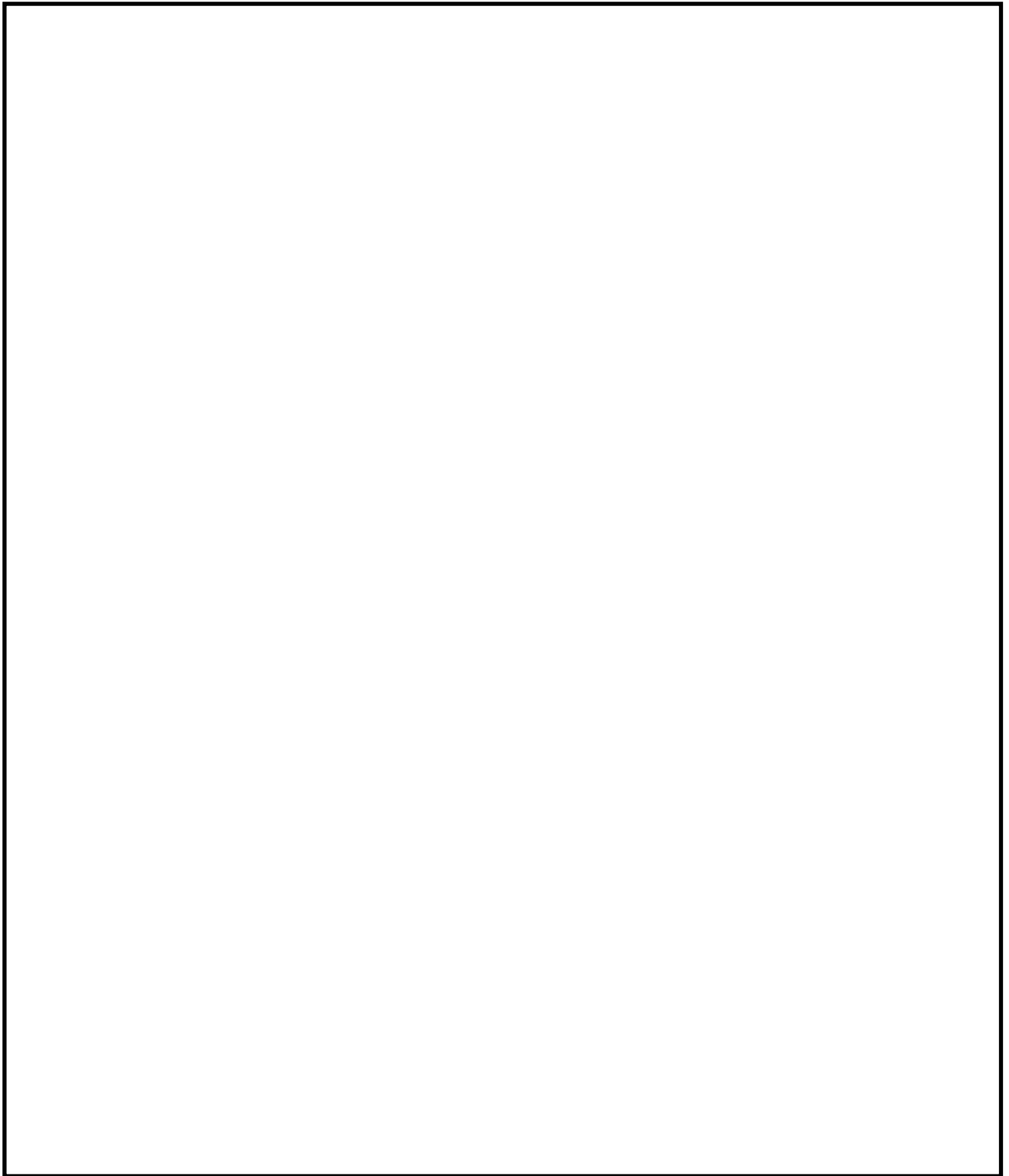
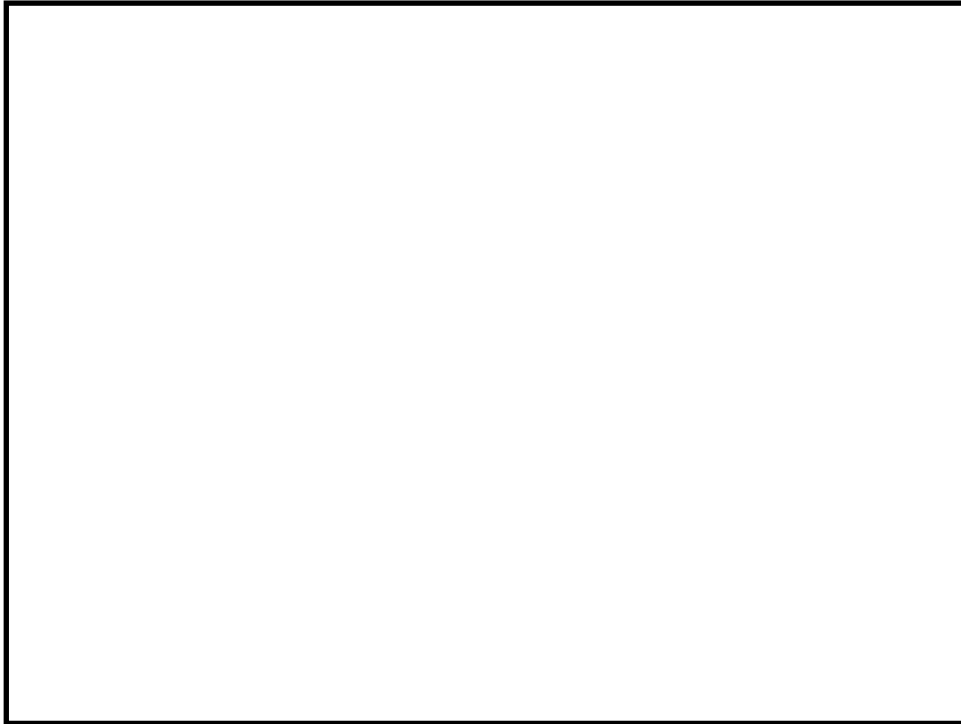
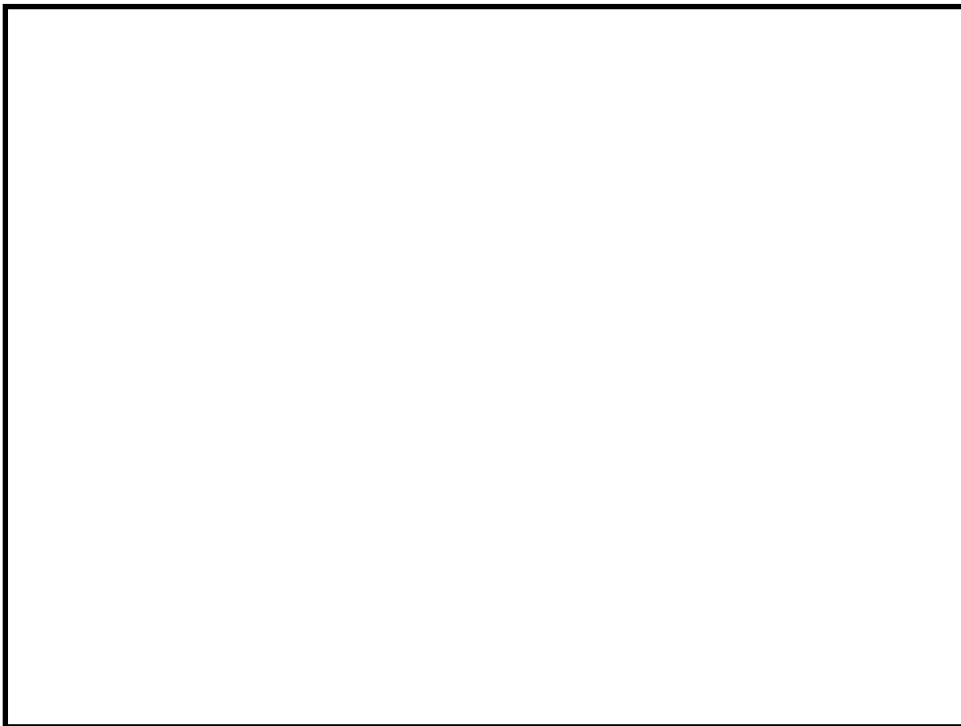


図 4-51 Test M-8-1 ドーム部ノーディング図

枠囲いの内容は、機密に属します
ますので公開できません。



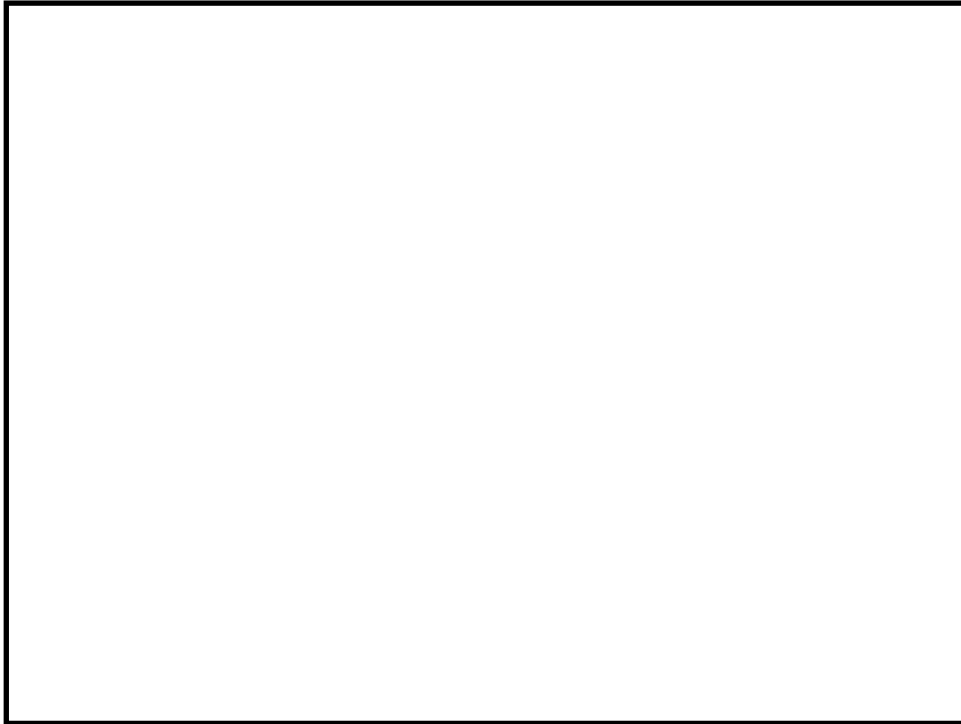
(a)試験結果



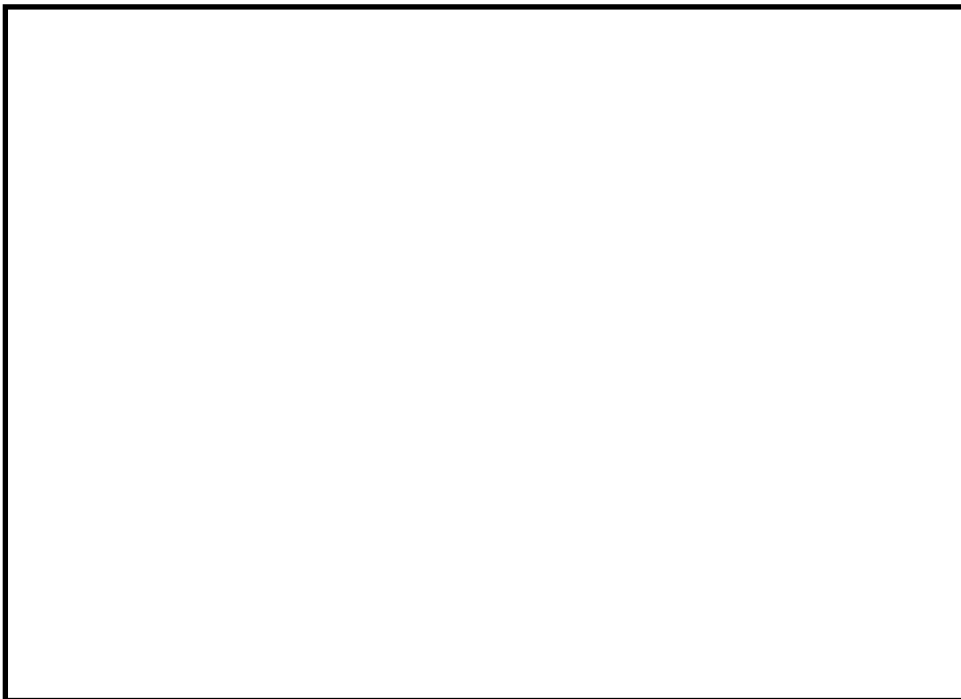
(b)解析結果

図 4-52 格納容器ドームヘリウム濃度 (Test M-8-1)

枠囲いの内容は、機密に属しますので公開できません。



(a)試験結果



(b)解析結果

図 4-53 格納容器温度分布 (Test M-8-1)

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

4.8.2 構造材との熱伝達及び内部熱伝導

(1) 熱構造材との熱伝達

実機解析に用いられる熱構造材表面、界面に対する熱・物質伝達の挙動は、上記のNUPEC試験検証解析結果により、適切に格納容器圧力及び雰囲気温度を予測し、更に、流動モデルと相まって、水素の拡散・混合挙動を適切に模擬されることが確認された。また、実機プラント解析に適用される熱伝達モデルの中でも、水素濃度に影響する凝縮熱伝達でも主要となる内田モデルについて、各種の試験データとの比較からモデルの予測特性を確認した。同モデルのバラつきを包絡する大きい凝縮熱伝達を実機プラント解析に適用することで蒸気凝縮を促進し、ウェット条件での水素濃度を大きく評価することを指向している。構造材の凝縮熱伝達を大きくすることの影響は、雰囲気と構造材に温度差が生じる期間に有効となるが、有効性評価のシナリオではスプレイが継続してこれによる凝縮が支配的となること、また、ドーム部については雰囲気と構造材が熱平衡に漸近する期間が長いことからその影響は限定的である。

NUPEC試験について、実機プラント解析に用いる構造材凝縮熱伝達モデルを適用した感度を4.3.1章で確認したが、その影響は小さい。また、NUPEC試験解析で用いたDLM-FMモデルを実機プラント解析に適用した場合の感度評価を示すが、格納容器圧力、雰囲気温度及び水素濃度に与える影響は小さいことを以下のとおり確認している。

(2) 実機プラント解析における構造材凝縮熱伝達モデルの感度解析について

実機プラントにおける水素燃焼について重要事故シーケンスとして選定される“大破断LOCA+ECCS失敗（スプレイ成功）”に対し、構造材の凝縮熱伝達係数としてより最適評価性の高いDLM-FMモデルを適用した場合の感度影響について以下に確認する。対象は3ループPWRプラントであり、ベースケースの構造材凝縮熱伝達モデルではGido-Koestelと内田の最大値に□を乗じている。

図4-54及び図4-55に格納容器ドーム部の圧力及び雰囲気温度について、ベースケースと感度ケースの比較を示す。同様に図4-56及び図4-57に格納容器平均のドライ換算及びウェット換算の水素濃度を示す。

図4-54及び図4-55より、構造材凝縮熱伝達モデルが格納容器圧力と雰囲気温度に与える影響が小さいことが示される。これは、当該シーケンスではスプレイ冷却が有効に作用するため、格納容器からの除熱に占める構造材ヒートシンクの影響が小さいためである。また、ドライ及びウェット換算の格納容器平均の水素濃度にもケース間の差異は見られない。このように、構造材の凝縮熱伝達に保守的なモデルを用いても重要事故シーケンスに対するSA対策有効性評価の結果に大きく影響しないことが分かる。

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

上記のように長時間に渡る事故シーケンスの評価では、格納容器の構造材と雰囲気温度が熱平衡状態に漸近し、温度差がつきにくくなることから、熱伝達モデルの差異が現れにくい。しかし、原子炉1次系からの蒸気放出が著しく増加する、また、スプレイ停止が生じた場合の直後等、構造材と雰囲気が熱的に非平衡な状態に遷移する一時的な期間、熱伝達モデルの差異が現れてくる。特に、実機プラント解析に適用する凝縮熱伝達を大きく評価するモデルでは、蒸気凝縮が進み、ウェット換算の水素濃度が大きく評価される傾向になる。

従って、有効性評価に対する感度解析ではその効果が表れにくいものの、実機プラントの解析では凝縮熱伝達を大きく評価するモデルを採用している。

以上より、構造材との熱伝達は、格納容器内の雰囲気と構造材の温度差が著しくなる期間にのみ影響が現れ、事故後の緩やかな過渡条件下ではモデル差の影響は小さい。従って、個別効果的に検証されたモデルに対して、そのバラつきを包絡する大きい凝縮熱伝達を適用すれば、有効性評価結果に大きな歪を与えることなくウェット換算の水素濃度を保守側に予測できる。

(3) 構造材の内部熱伝導

解析解との比較により、GOTHICコードは構造物内の熱伝導を精度よく解くことが確認できた。また、NUPEC試験解析では格納容器の構造材を実機と同様にモデル化しているが、前述の通り、コードは格納容器圧力、雰囲気温度及びヘリウム（水素）の挙動を良好に予測している。このことから、構造材内部の熱伝導モデルは十分に実機に適用できるものである。

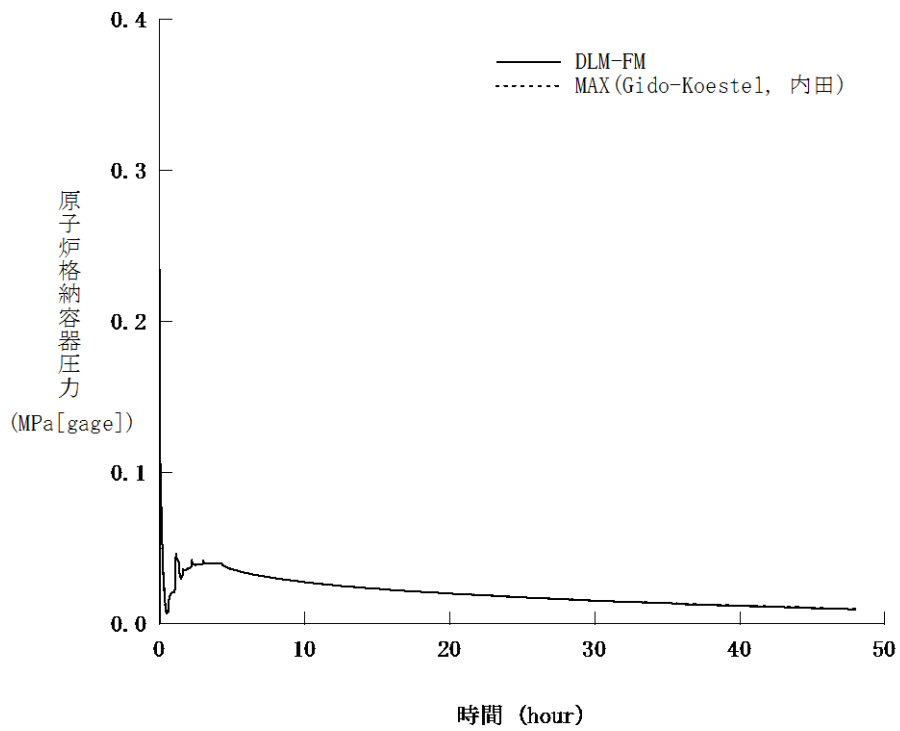


図 4-54 構造材凝縮熱伝達モデル感度 (格納容器圧力)

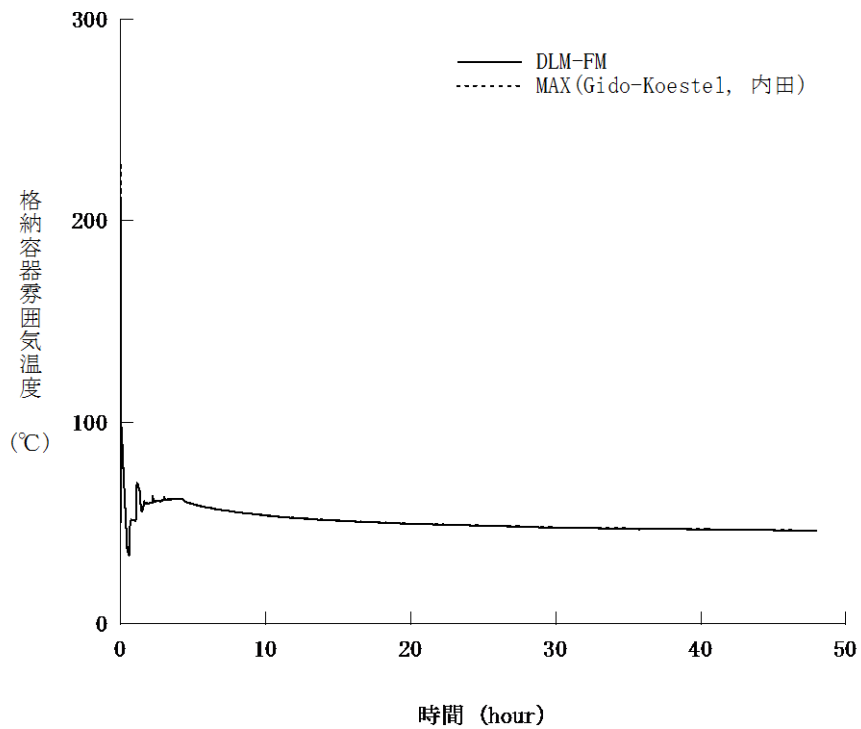


図 4-55 構造材凝縮熱伝達モデル感度 (格納容器雰囲気温度)

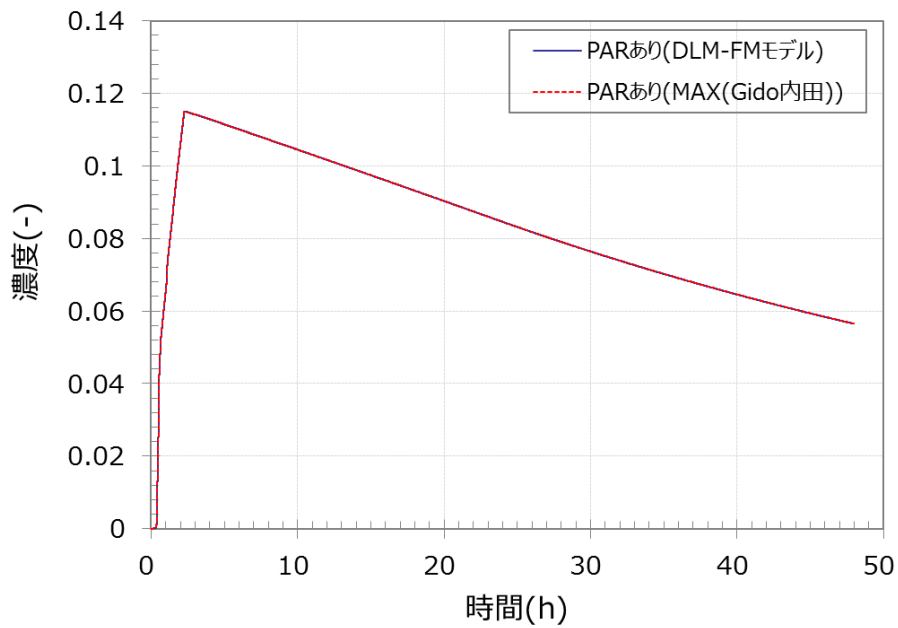


図 4-56 構造材凝縮熱伝達モデル感度（格納容器平均水素濃度、ドライ換算）

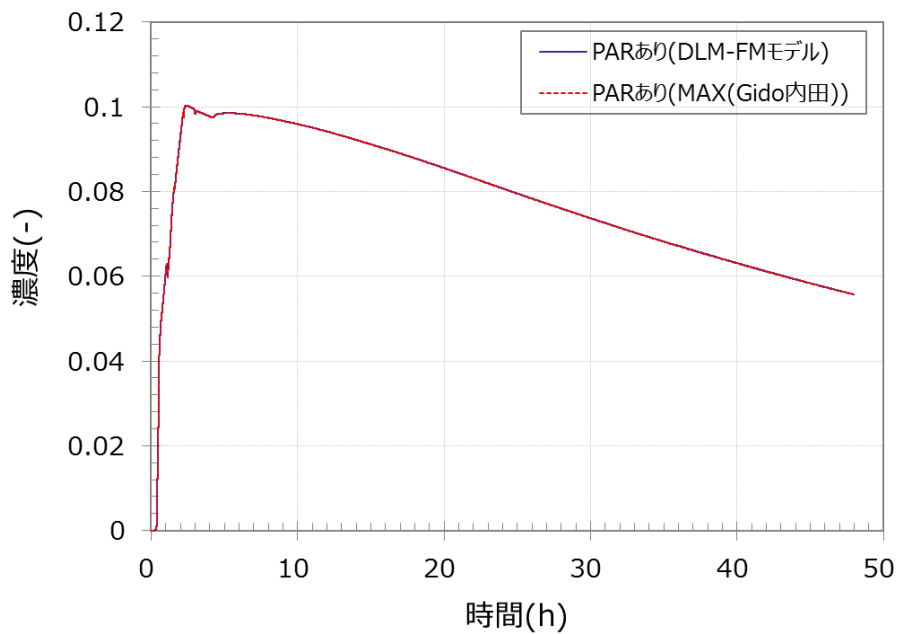


図 4-57 構造材凝縮熱伝達モデル感度（格納容器平均水素濃度、ウェット換算）

4.8.3 スpray冷却

Sprayによる格納容器圧力及び雰囲気温度挙動に与える影響、また、ドーム部における蒸気凝縮と水素の拡散・混合挙動の予測が重要となるが、NUPEC実験解析において、Spray冷却の有無を含めて、GOTHICコードはこれを適切に模擬できることが確認された。コードは、Spray水と流体との質量、エネルギー及び運動量交換を直接的に模擬できる三流体モデルを採用しており、Spray特性として液滴径、流量及び温度が設定されれば、これらSprayによる効果は適切に模擬される。従って、Sprayに係る流体モデルは実機プラント解析にも十分に適用できる。

4.8.4 水素処理

4.8.4.1 PARによる水素処理モデルの実機適用性検討

水素処理設備であるPARについては、GOTHICコードにその特性モデルを組み込む。これは製造元により整備された性能評価式が含まれ、水素処理（再結合）に関する理論評価値との比較により検証した。また、THAI試験HR-3による検証解析を実施し、実機への適用性を以下の通り検討した。

(1) 実機条件と試験条件の比較

実機条件と試験条件について表 4-5及び表 4-6に記載する。表 4-6のとおり、圧力・温度・水素放出量については実機条件と試験条件は同等である。

(2) PAR単体によるスケーリング効果

PARは同一規格の触媒プレート（幅 290mm、高さ 140mm の両側に触媒が付いている薄板）を複数枚同じ間隔（10mm）で並べ、下方から水素を含むガスが通り抜ける時の触媒反応で水素を処理するものである。ここで、THAI試験のPARと各プラントにおいて設置したPARの触媒プレートは実機で使用しているものと同じ規格であり、設置する間隔も同じである。したがって、触媒プレート間で形成される流路断面形状が同じとなるため、水素濃度が同じであれば触媒の発熱によって触媒プレート間に生じる上昇流の流速も同じとなる。このため、PARの触媒反応を律する拡散現象も同等と考えられ、いずれのPARも触媒との相互作用は同じとなる。

(3) PARによる水素処理に伴う水素濃度の局所的な濃度分布の影響

A. THAI試験において見られた水素滞留現象の実機プラントにおける発生可能性

THAI試験における水素の濃度分布（主に容器内シリンダ下部における滞留）は、水素放出及びPARによる上昇流と下降流が拮抗してしまうことにより発生すると考えられる。THAI

試験装置のように系のサイズが小さく空間分割が少ない空間においては、各部の断面積及び水力等価径が小さいことから気相部の流動に対する自由度が低い。そのような系であるシリンダに対しては、上部の圧力が高いことから垂直方向上向き的一次元的な流れが阻害されていると推測される。

しかし、実機プラントにおいては、事故時において下部区画に放出された水素は各ループ室間或いは外周部の周回流などの平面方向における区画間の流れに加え、SG区画とドーム部、外周部とドーム部の上昇・下降流により格納容器内の巨視的な流れにより拡散していくことから気相部の流動に対する自由度が高いといえる。また、PWRの格納容器は区画間の循環を生じさせる思想に基づいた配置設計がなされており、特にドームと下部区画の垂直方向の接続には多様性が存在するため、水素の滞留が生じるような流況は見られにくい。したがって、実機プラントはTHAI試験と比較すると、上記のように空間的な特性が異なることから、試験と同様な水素の滞留が発生することは考えにくい。

B. PAR排気によるPAR入口における水素濃度への影響

濃度分布の観点では、試験体系が小さい場合はPAR出口からの排気によりPAR入口近傍における局所的な濃度分布が生じることで、PAR入口における水素濃度の測定値と、実際にPARに流入する水素濃度との間に差異が生じることが考えられる。しかしながら、THAI試験は60m³の試験容器を用いており、試験に用いたPARの発熱によるガス流量は約0.07m³/s（試験における実測値と設備形状に基づく）であり、1秒間あたりのガス処理量は試験容器全体の約1/1000（体積比）であるため、PAR出口からの排気がPAR入口近傍における局所的な濃度分布に影響を与えることは考えにくい。

以上より、THAI試験体系においても実機体系においても、PAR排気に伴う水素濃度の局所的な濃度分布による影響は小さいといえる。

(4) PAR内を上昇する流量の影響

PAR内を上昇する流量が大きい方が水素処理は増加する。一方で、PAR内の流量が大きいと、触媒表面の除熱が促進され、触媒温度の低下に伴う処理効率低下が考えられる。THAI試験におけるPAR触媒表面温度は、水素濃度4vol%時において約600°C（試験実測値）まで上昇しているが、この場合にPAR出口で生じる上昇流は高々1m/s程度（試験実測値）である。一方、触媒温度を有意に低下させるようなPAR内を通過する強制対流は、単相を仮定すると計算上では数十m/s程度である。実機プラントに設置するPARは、処理蒸気が上部側面から放出される設計であり、格納容器内の対流によりPAR内が強制対流となるような状況は起こりえず、触媒温度の低下に伴い水素処理効率が低下することはない。

また、水素燃焼によりPAR及び周辺の流体状況に変化が及んだ場合も、水素処理性能に不可逆的な変化が生じていることは図4-38からは特段認められない。

(5) 水素濃度分布に伴うGOTHICコードによる評価への影響

GOTHICコードで用いられているPARの性能評価式はPAR入口における水素体積比ではなく、PARを配置している区画の水素体積比を処理量計算の入力としているため、PAR入口近傍において水素濃度分布が生じるような体系であれば、実際の水素処理量と評価値の間に差異が生じる(PAR排気を再び吸い込むため、定性的には水素濃度がやや過小に評価される)。

しかしながら、(3)で示したとおり、実機においてもTHAI試験体系においてもPAR入口近傍の局所における水素濃度分布の影響は小さいと考えられ、GOTHICコードにおいて区画における水素体積比を入力と用いても、影響は軽微であると考えられる。

また、(4)において示したように、格納容器内部の対流がPARの水素処理能力を低下させる状況は考えにくく、GOTHICによりPARの作動を模擬する際、設置区画における流れの状態が影響を及ぼすことはないと言える。

なお、解析においては燃焼を模擬していないため、PARにおいて燃焼が生じるような場合においては、水素処理量を小さく見積もるため、解析結果は保守的な水素濃度を与えることとなる。

(6) GOTHICコードによるPARの空間設置模擬手法による影響

GOTHICコードによる実機プラントの評価では、PARを比較的大きな体積の分布定数系セル或いは集中定数系ボリュームに設置している。これにより、PAR出入口における局所的な濃度分布はPARが存在する有限体積内で様となり、その結果PAR排気によって体積内の水素濃度が低く計算されるため、影響は軽微であるものの計算上は水素処理量が定性的に低下する傾向となる。ただし、THAI試験における解析体系を1区画及び多区画により模擬した際において、水素処理量に大きな差が見られなかった。このことから、実機解析の結果に対してもPARが設置される有限体積ボリュームの大きさにより有意な感度がないと判断できる。

以上の考察から、THAI試験より得られた検証結果を実機に適用すること及び実機体系におけるPAR設置空間模擬手法は妥当であると考えられる。

4.8.4.2 イグナイタによる水素燃焼の実機適用性

同じく、イグナイタにより発生する水素燃焼の評価に対しては、燃焼が想定される空間に対してコードの内部モデルを適用する。このモデルは、コード開発元により解析解との比較を行うことで妥当性が検証されている。

個別効果的なモデル組み込みの検証に限られるものの、水素処理設備は、周辺の水素再結合を評価するものであることから、①設備の特性が適切に模擬され、また、②その効果を考える区画もしくはノードに対し実プラントでの設備配置を適切に考慮することにより、実機プラントの水素濃度評価は適切に行える。

4.8.5 まとめ

以上より、本章に記載している妥当性確認結果より得られた不確かさについても、実機PWRの有効性評価解析に適用できると言える。重要現象に対するGOTHICコードの不確かさを表4-11に示し、実機解析における不確かさの取り扱いを5章にて述べる。

表 4-11 重要現象に対する不確かさ

分類	重要現象	解析モデル	検証／妥当性確認	不確かさ
格納容器	区画間・区画内の流動	保存式、流動を模擬する構成式及び相関式	NUPEC試験 Test M-7-1 NUPEC試験 Test M-4-3	ヘリウム濃度のコード予測性から、モデル不確かさが各区画の水素濃度予測に与える影響は約2.4%と推定
		非凝縮性ガスの輸送モデル		
		ノーディングスキーム		
	構造材との熱伝達及び内部熱伝導	多相流モデル	NUPEC試験 Test M-7-1 NUPEC試験 Test M-4-3	区画間・区画内の流動と同じ
		熱伝達モデル	熱伝達試験との比較	流動に影響する凝縮熱伝達モデルについて±40%程度
		熱伝導モデル	熱伝導解析解との比較	不確かさはない
	スプレイ	多相流モデル	NUPEC試験 Test M-7-1	区画間・区画内の流動と同じ
		界面積モデル		
		界面伝達モデル		
	水素処理	PAR特性モデル	PAR特性検証 THAI試験 HR-3	実規模試験に基づき、製造元が供給する水素処理に係る性能評価式を使用（組込誤差約0.3%） THAI試験再現性より、水素処理量を少なく予測する傾向となる。
イグナイタによる水素燃焼モデル		イグナイタによる水素燃焼モデルの検証	コード開発元による解析解との比較により、圧力で0.5%、温度で1%	

5. 有効性評価への適用性

4章に記載した試験解析をふまえ、重要現象についての不確かさ、及びその不確かさが評価指標の視点と運転操作の視点から有効性評価解析へ与える影響について表 5-1に纏めた。以下にその不確かさについて記述する。

5.1 不確かさの取り扱いについて（評価指標の観点）

5.1.1 区画間・区画内の流動

格納容器の水素濃度に影響する重要モデルの一つとなる区画間・区画内の流動及びスプレイ冷却について、NUPEC試験解析を行うことで、コードが現象を適切に予測できることが確認された。実機プラントのシビアアクシデント対策の有効性評価で想定するシナリオは、大破断LOCAを起因事象としたスプレイ継続を仮定するシーケンスとなることから、格納容器内の流体の攪拌が大きく、水素濃度は均一化する傾向にある。NUPEC試験は同様のシーケンスを模擬したものであり、その傾向が実験的にも確認され、かつコードもこの傾向を適切に予測している。NUPEC試験検証解析では、格納容器内の各区画で測定されたヘリウム濃度のピーク値に対し、解析予測のバラつきは約2.4%（測定誤差の大きい破断区画/ループ室を除く。含めた場合4.4%）となる。

5.1.2 構造材との熱伝達及び内部熱伝導

また、構造材との熱伝達及び内部熱伝導のうち、水素濃度評価に影響する凝縮熱伝達モデルについては、コードに組み込まれるモデルと試験データとのバラつきを評価し、その不確かさを同定した。実機プラント解析への適用においては、その不確かさを包絡するよう凝縮熱伝達モデルを設定し、ウェット条件換算の水素濃度を保守的に予測するアプローチとしている。格納容器内流動ならびに水素濃度に影響する凝縮熱伝達モデルについて、実機プラント解析で用いるモデルは約40%の不確かさを有する。これを包絡的する実機プラント解析用のモデルと、不確かさが約20%となり最適評価性の高いDLM-FMモデルをNUPEC検証解析及び実機プラント解析に適用し、両者を比較したとしてもヘリウム濃度及び水素濃度に与える影響は無視できる程度であることを確認している。

5.1.3 水素処理

水素処理設備となるPARについては、製造元が供給する水素処理特性モデルがGOTHICコードに組み込まれることを検証した。実機プラント解析では、PAR設置位置を考慮した格納容器ノーディングとし、設備周辺の水素濃度等の環境が適切に考慮されるようモデル化している。THAI試験を対象とした実験解析より、水素処理量は定性的に小さく見積もることとなり、特にPARにおいて燃焼が生じる場合においてその傾向は顕著に現れる。実機プラント解析においては水素

処理量を、小さく見積もるため、水素濃度の解析結果については保守的な値となる。また、イグナイタによる水素燃焼モデルに対しては、コード開発元により解析解との比較が行われており、その誤差はごく軽微あり水素濃度の評価値に与える影響が無視できる程度であると言える。

なお、NUPEC検証解析において、GOTHICコードは、破断区画からの経路の一部で局所的かつ過渡的な水素濃度の変化を過小評価する場合があることが確認された。これは試験装置では蒸気/非凝縮性ガスが上方放出となり流れの異方性が大きく、ヘリウム流量が減少に転じた際、側面に隣接する区画への流れをコードが過大に予測するためである。これは、実機プラント解析においては、原子炉1次系からの水素の流出が減少する際に、広大なドーム部への経路において水素濃度を過小評価する傾向となるが、側面に隣接する相対的に狭いキャビティ区画や外周区画への水素の流入を一時的に過大に予測する傾向となることを示している。また、このように放出口からドーム部に至るまでの水素の流れに差異が見られたとしても、スプレイの有無にかかわらず、ドーム部の水素濃度は適切に予測できることがNUPEC試験解析にて確認されている。以上より、NUPEC試験解析で見られた一時的かつ局所的なヘリウム濃度の予測の不確かさは、実機プラントのSA対策有効性評価に影響を与えるものではないと判断できる。

以上、解析コードの凝縮熱伝達モデル、流動ならびにスプレイ冷却に係るモデルが有する不確かさが、格納容器内の各区画の水素濃度に与える影響は限定的であり、また、実機プラントの評価上、最も重要となるドーム部の水素濃度をコードは良好に予測することができるものと判断される。

5.2 不確かさの取り扱いについて（運転員操作の観点）

GOTHICコードによる水素燃焼解析は、MAAPによって検討された事象進展を反映することにより実施する。したがって、運転員操作の設定はMAAPコードのものを受け継ぐ。

水素分布評価の観点から運転員操作に反映される項目はない。

表 5-1 重要現象に対する不確かさの取り扱い

分類	重要現象	解析モデル	不確かさ	有効性評価解析への影響
格納容器	区画間・区画内の流動	保存式、流動を模擬する構成式及び相関式	NUPEC 検証解析より水素濃度に与える影響を推定	ヘリウム濃度のコード予測性から、モデル不確かさが各区画の水素濃度予測に与える影響は約 2.4%と推定
		非凝縮性ガスの輸送モデル		
		ノーディングスキーム		
	構造材との熱伝達及び内部熱伝導	多相流モデル	NUPEC 検証解析より水素濃度に与える影響を推定	区画間・区画内の流動と同じ
		熱伝達モデル	流動に影響する凝縮熱伝達モデルについて±40%程度	モデル感度解析により水素濃度への影響は無視できることを確認
		熱伝導モデル	解析解と一致	なし
	スプレイ	多相流モデル	NUPEC 検証解析より水素濃度に与える影響を推定	区画間・区画内の流動と同じ
		界面積モデル		
		界面伝達モデル		
	水素処理	P A R 特性モデル	実規模試験に基づき、製造元が供給する水素処理に係る性能評価式を使用（組込誤差約 0.3%） T H A I 試験再現性より、水素処理量を常に少なく予測する傾向となる。	燃焼が生じる水素濃度範囲においては、水素処理量を少なく予測する傾向となる。
イグナイタによる水素燃焼モデル		イグナイタの水素燃焼モデルの検証により推定	コード開発元による解析解との比較により、圧力で 0.5%、温度で 1%	

6. 参考文献

- [1] 原子力規制委員会「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」原規技発第 13061915 号、平成 25 年 6 月 19 日制定
- [2] 三菱 PWR 格納容器損傷に係る重要事故シーケンスへの GOTHIC コードの適用性について、MHI-NES-1057,改 0 三菱重工業, 平成 25 年
- [3] McAdams, W.H., Heat Transmission, Third Edition, McGraw-Hill, New York, 1954.
- [4] Dittus, F.W., and L.M.K. Boelter, University of California, Publ. Eng., 2, 443, 1930.
- [5] Uchida, H., A. Oyama and Y. Togo, Evaluation of Post-Incident Cooling Systems of Light Water Power Reactors, U. of Tokyo, International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, New York, 1965.
- [6] Tagami, T., Interim Report on Safety Assessments and Facilities Establishment Project in Japan for Period Ending June 1965 (No. 1), unpublished work, 1965.
- [7] Gido, R.G., and A. Koestel, Containment Condensing Heat Transfer, Second International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Santa Barbara, CA, January, 1983.
- [8] Electric Power Research Institute, “GOTHIC Containment Analysis Package Technical Manual version 7.2a(QA)”, EPRI Product 1013072, NAI 8907-06 Rev.16, January 2006
- [9] 凝縮熱伝達相関式に関わる SAFE プロジェクト報告書
- [10] MH Anderson, “Steam Condensation on Cold Walls of Advanced PWR Containments”, PhD Dissertation, University of Wisconsin, Madison, 1998
- [11] I Huhtiniemi, A Pernsteiner and ML Corradini, “Condensation in the Presence of a Noncondensable Gas: experimental Investigation”, Dept. of Nuclear Engineering and Engineering Physics, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, April 1991.
- [12] AA Debhi, “The Effects of Noncondensable Gases on Steam Condensation Under Turbulent Natural Convection Conditions”, Ph. D. Thesis, Department of Nuclear Engineering, MIT, 1991.
- [13] RC Shmitt, GE Bingham and JA Norberg, “Simulated Design Basis Accident Tests of the Carolinas Virginia Tube Reactor Containment – Final Report”, Idaho Nuclear Corporation, Idaho Falls, Idaho, prepared for the US Atomic Energy Commission, UC-80, December 1970.

- [14] Investigation of the Phenomena Occurring within a Multi-Compartment after Rupture of the Primary Cooling Circuit in Water-Cooled Reactors, Technischer Bericht BF RA 60-32-C13-1, Battelle-Institute e. V., 6000 Frankfurt am Main 90, Am Romerhof 35, Postfach 600160, July,1976, (German).
- [15] Investigation of the Phenomena Occurring within a Multi-Compartment after Rupture of the Primary Cooling Circuit in Water-Cooled Reactors, Technischer Bericht BF RA 60-32-C15-1, Battelle-Institute e. V., 6000 Frankfurt am Main 90, Am Romerhof 35, Postfach 600160, July,1976, (German).
- [16] Die Containment-Versuchsanlage (C0und D-Versuche), Detailbericht BF-RS 50-21-1, Battelle-Institute e. V., 6000 Frankfurt am Main 90, Am Romerhof 35, Postfach 600160, July, 1976, (German with English Summary). Design Report for the HDR Containment Experiments V21.1 to V21.3 and V42 to V44 with Specification for the Pre-Test Computations, Report No. 3.280/82, January, 1982.
- [17] RHDR 38-83, Test V44, May, 1983.
- [18] W. Nusselt, Z.VDI, 60, P.541-569, 1916
- [19] 独立行政法人 原子力安全基盤機構,「溶接部等熱影響部信頼性実証試験 (原子炉格納容器) に関する報告書 (平成 4 年度)」,平成 5 年 3 月
- [20] NUPEC, “Final Comparison Report on ISP-35: NUPEC Hydrogen Mixing and Distribution Test (Test M-7-1) ” , CSNI Report NEA/CSNI/R(94)29, December, 1994.
- [21] NUPEC, “NUPEC Hydrogen Mixing and Distribution Test (Test M-7-1)”, NEA/CSNI/R(94)29, December, 1994.
- [22] Electric Power Research Institute, “GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE QUALIFICATION REPORT Version 7.2a(QA)”, EPRI Product 1013072, NAI8907-09 Rev9, January 2006.
- [23] Reactor Safety Research Project 150 1326 OECD-NEA THAI Project(contract 18 July 2007) Quick Look Report Hydrogen Recombiner Tests HR-1 to HR-5,HR-27 and HR-28 (Tests without steam, using an Areva PAR)

添付1 解析コードにおける解析条件

表 解析コードにおける解析条件

分類	解析条件	
原子炉格納容器関連データ	区画データ	自由体積
		底部高さ
		区画高さ
		初期圧力
		初期温度
	区画間データ	底部高さ
		開口高さ
		断面積
		水力等価径
		圧力損失
	ヒートシンク（伝熱面、表面積、厚さ、材質の物性、初期温度）	CV ドーム部およびリングガータ
		CV シリンダ部
		CV コンクリート
		スチールラインドコンクリート
		雑鋼材（炭素鋼）
		雑鋼材（ステンレス・スチール）
雑鋼材（銅フィン・チューブ）		
配管（ステンレス・スチール（内部に水有））		
配管（ステンレス・スチール（内部に水無））		
配管（炭素鋼（内部に水有））		
配管（炭素鋼（内部に水無））		
検出器等（アルミニウム）		
境界条件データ	破断流	圧力
		温度（或いはエンタルピ）
		流量
	水素	圧力
		温度（或いはエンタルピ）
		流量
	デブリ・FP による発熱	発熱量
事象収束に重要な機器・操作関連	PAR	[]
		[]
		[]
	スプレイ	[]
		流量 温度

枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

添付 2 PANDA試験

濃度成層化発生についてはOECD/C S N I で実施されたPANDA試験において、成層化事象が発生していると報告されている。以下ではPANDA試験の概要及びその実験解析結果について示す。

(1) PANDA試験装置 (参考文献 1)

PANDA試験装置は、E S B W R (Economic Simplified Boiling Water Reactor) の格納容器と安全系を実機の 1/40 にスケールダウンしたものである。付図 2-1 に示すように、PANDA試験装置は6つの大型圧力容器から構成されている。

一つは蒸気生成を目的とした原子炉圧力容器(R P V)である。R P Vは出力系として2本の主蒸気ラインにてドライウエル(DW)と接続されている。R P Vへの入力ラインは受動的格納容器冷却(P C C)ドレンラインと重力駆動冷却系(G D C S)ドレンラインである。

2つのDWは高さ 8m の円筒型容器であり、各々が大口径の接続配管で接続されている。DWの出力はDWの頂部とP C C熱交換器の上部ドラムと接続するP C Cフィードラインである。

2つのWWは高さ 10.11m の円筒型容器であり、約 4m の水位で水が満たされ、各々が2本の大口径の配管で気相部と液相部で接続されている。WWはP C Cベントライン経由でP C C熱交換低ドラムと、2本の圧力均衡ライン経由でG D C S気相部と各々接続されている。

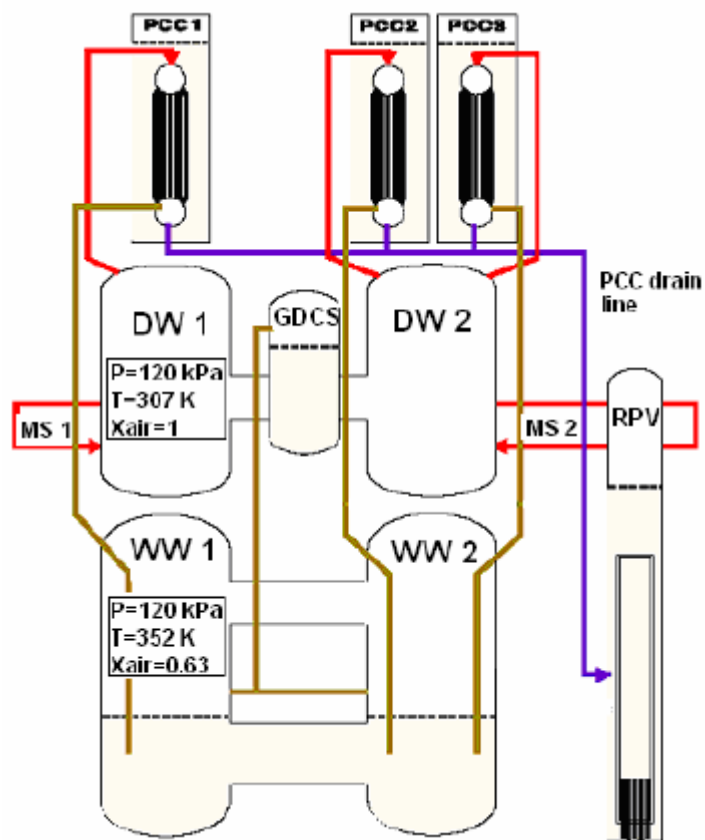
(2) PANDA試験概要 (参考文献 2)

PANDA試験は、PANDA試験装置のうち、内径 0.9m の連結管で接続された直径 4m、高さ 8m、容積 90m³の円筒型圧力容器2体からなるドライウエルを対象として、放出ジェット流や自然対流、水素成層化等の事故時の格納容器内の諸現象を対象とした、自由区間における混合気体の3次元的挙動及び多区画形状容器内における移行、混合、濃度分布の3次元挙動の詳細を把握し、緩和系の効果や、解析コードの検証のためのデータの提供を目的としている。

L O C A等を想定した1次系からの高速ジェット吹き出し流及び緩やかな吹き出し流(プルーム)の2種類のパターンを中心に以下の5つのシリーズからなる計 25 ケースの試験が実施された。

- ・ 水平ジェット流試験 (水蒸気/空気系) Test-1~4
- ・ 水平ジェット流試験 (水蒸気/ヘリウム系) Test-5~8
- ・ 器壁近傍のプルーム挙動試験 Test-9~17
- ・ 自由空間中のプルーム挙動試験 Test-18~24
- ・ 総合試験 (水蒸気/ヘリウム/空気系) Test-25

上記の試験のうちヘリウム濃度の成層化が確認された総合試験である Test25 については、実験解析と共に以降で説明する。



付図 2-1 PANDA 試験装置

(3) PANDA試験解析

NAI (Numerical Applications Inc.)社とPSI (Paul Scherrer Institut)により執筆された文献(参考文献3)において、PANDA試験のTest 25に対しGOTHICによる再現解析が実施されている。本解析は、PANDA試験Test 25における配管で接続されたタンク(付図2-2)間の蒸気・ヘリウムの移流に起因する蒸気の熱成層ならびにヘリウムの成層化に対して、詳細なセル分割を採用することでGOTHICコードが再現性能を有することを確認するものである。対象となる試験設備と条件を付表2-1及び付表2-2に示す。

対象となる試験では空気が満たされたタンク(DW)の片側に、内部の上向きノズルを経てヘリウム及び水蒸気が放出され、配管で接続された別のタンクへの移流などを含む挙動が観測されている。注入される気体は、2時間までは過熱蒸気とヘリウムの混合気体、以降は過熱蒸気のみである。

タンク形状を模擬し、詳細メッシュにより実施した再現解析は過渡挙動を比較的良好に再現している。片側のタンク(注入ノズルあり)においては、時間経過に伴いヘリウムがタンク上部に滞留することにより、上向きのプルームがタンク上端に至らず下方向に向けて流れ方向を変える様子が見られる。これに伴い隣接するタンクへの気体の流れ込みが増加し、隣接するタンクにおいてもヘリウムの存在割合が増加する。隣接タンクにおいては、蒸気・ヘリウム混合気体の流入に対し、壁面での凝縮が見られる。このため、タンク上部にヘリウムが滞留し、中～下部エレベーション近傍では混合気体の割合が高くなる(付図2-3)。

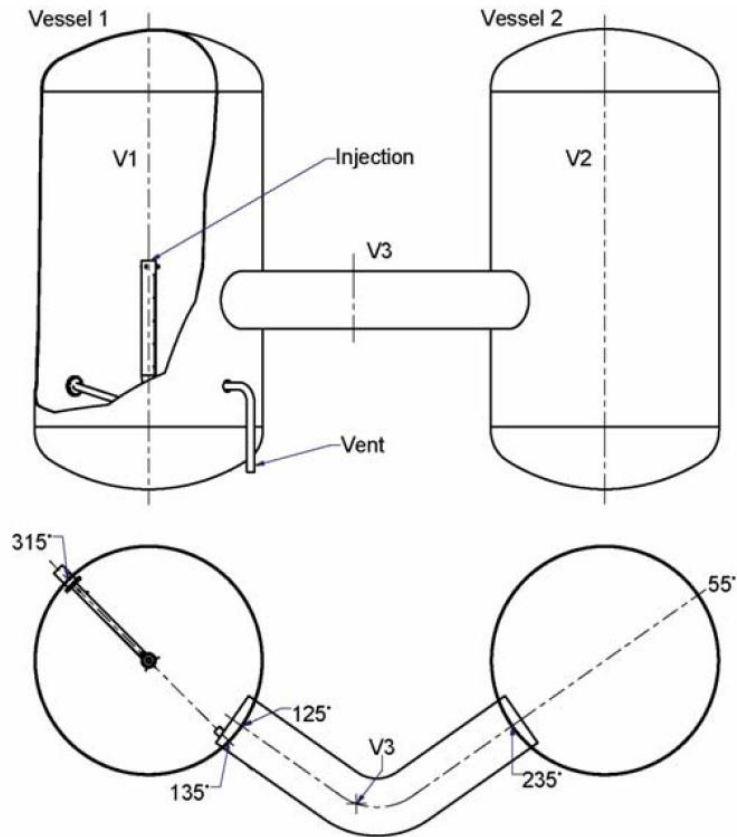
タンク上部では凝縮により蒸気成分が少なくなっており、ヘリウムも同時に冷却されて密度に変化が起き、下降流が発生する。しかしながらこの効果は過渡的であり、拡散による分布強度と相まって、タンク内のヘリウムは均質な拡散に向かう。時間経過に伴い、蒸気成分の減少、成分間の温度の平衡が進む。破断流が継続しているため、タンク1・2共にヘリウムは上部に滞留したままとなる。結果的に、タンク1の上部に微量のヘリウムが、タンク2の上半分においては顕著に成層化したヘリウムが見られる(付図2-3)。

付表 2-1 Test 25 試験条件

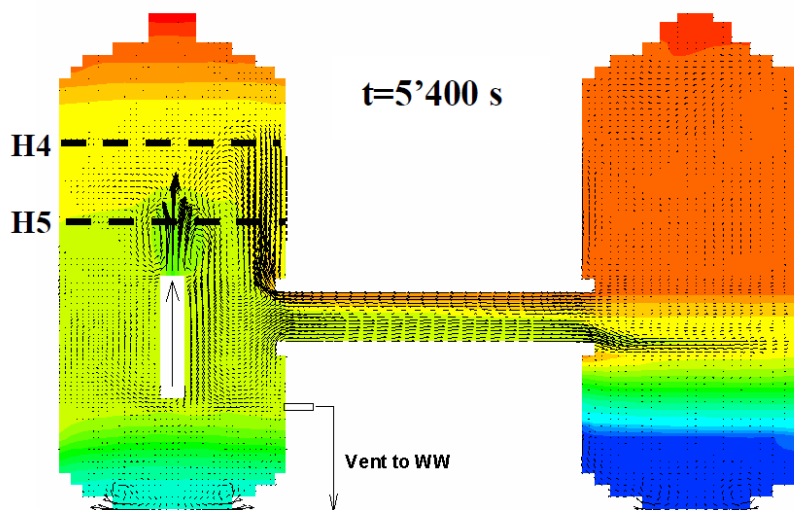
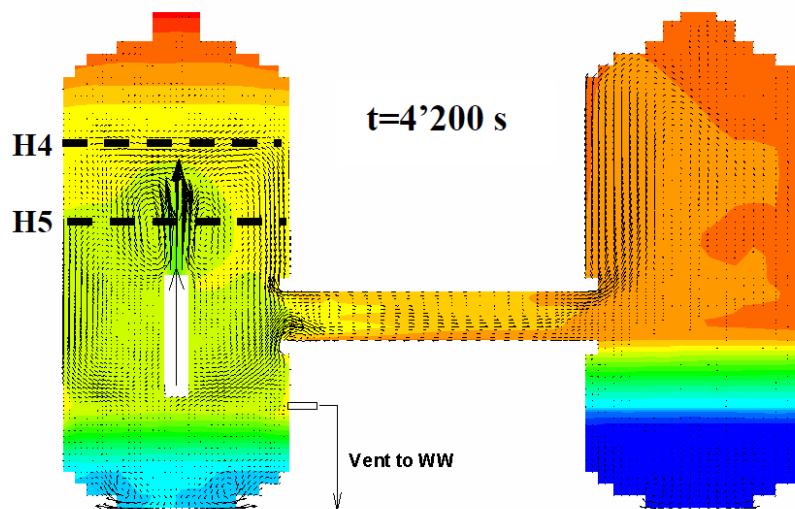
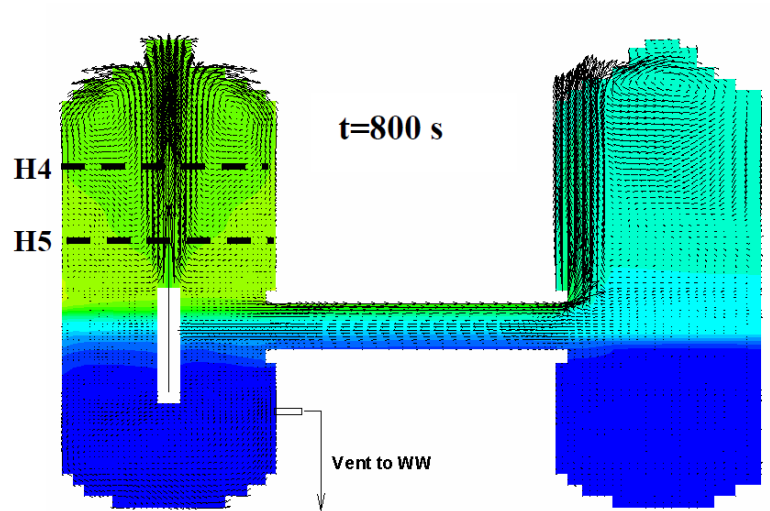
Test	Flow	Pipe diameter (m)	Fluid injected
Phase-1 ~2hours	垂直上方ジェット	0.2	過熱蒸気・ヘリウム混合
Phase 2 2 hours~	噴水状、のち垂直上方ジェット	0.2	過熱蒸気

付表 2-2 Test 25 解析条件

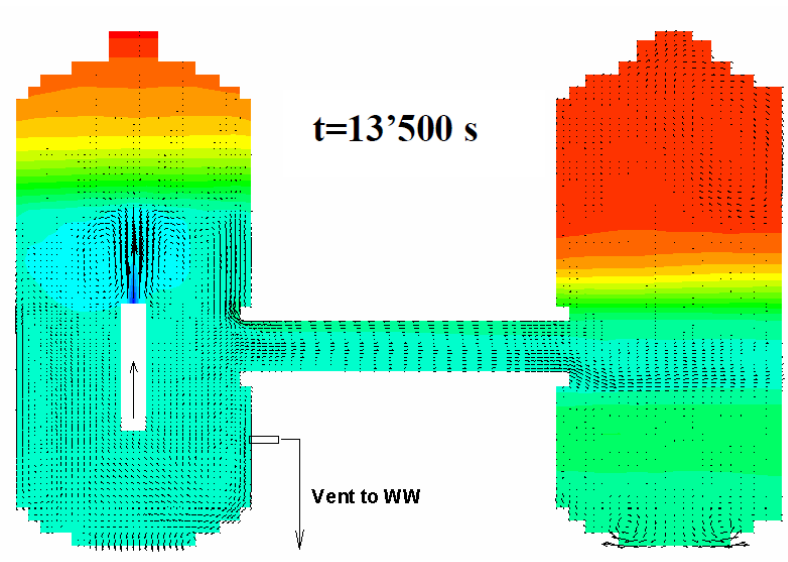
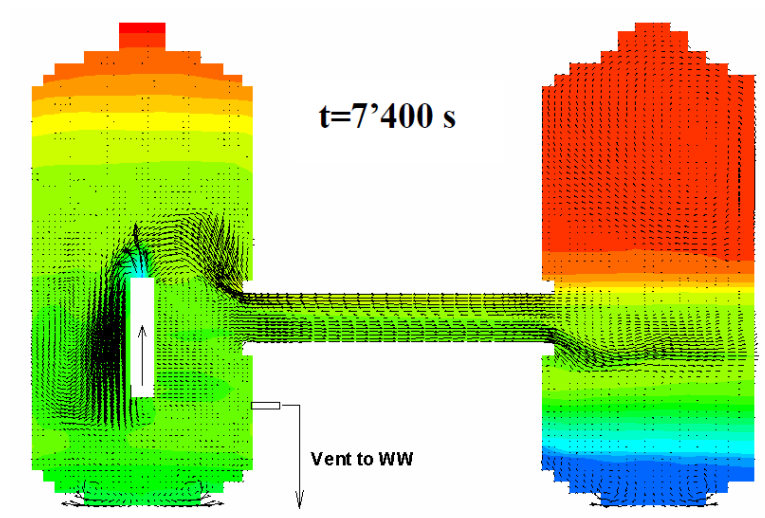
メッシュ	形状	タンク 1	接続配管	タンク 2	壁面熱伝達
詳細	シリンダー 半球 (ドーム)	21 19 50	15 5 10	13 15 48	・自然/強制対流 ・Direct (DLM-FM)



付図 2-2 3種ガス混合試験(Test25)装置体系



付図 2-3 ヘリウムモル分率と流速(Phase1)



付図 2-4 ヘリウムモル分率と流速(Phase2)

(参考文献)

- [1] Analysis of OECD/CSNI ISP-42 Phase A PANDA Experiment Using RELAP5/mod3.3 and GOTHIC 7.2a Codes (International Conference Nuclear Energy for New Europe 2009)
- [2] アクシデントマネジメント 知識ベース整備に関する報告書=格納容器内多次元流動解析手法の検証と自然対流冷却 AM 策への適用(JNES/SAE06-057 H18 年 8 月)
- [3] SIMULATIONS OF BASIC GAS MIXING TESTS WITH CONDENSATION IN THE PANDA FACILITY USING THE GOTHIC CODE (Proceedings of the 16th International Conference on Nuclear Engineering ICONE16)

添付 3 代替スプレイポンプの攪拌効果について

(財)原子力発電技術機構による平成 11 年度「格納容器内水素挙動解析評価に関する報告書」(参考文献 1) では、シビアアクシデントにおける水素成層化時における代替スプレイでの攪拌効果について検討がなされている。概要を以下にまとめる。

(1) 解析モデル概要

同検討では、INSPAT/CV コード (α -FLOW コードの非圧縮性流体解析モジュールに液滴、液膜モデル及びコンパートメントモデルを追加したコード) を用いて、格納容器上部での水素成層化状態におけるスプレイの攪拌挙動が解析されている。

解析は付図 3-1 に示される通り、格納容器の上部コンパートメントを対象に、約 22,000 メッシュに空間分割したモデルにより解析が実施される。解析の初期条件としては以下のとおり。

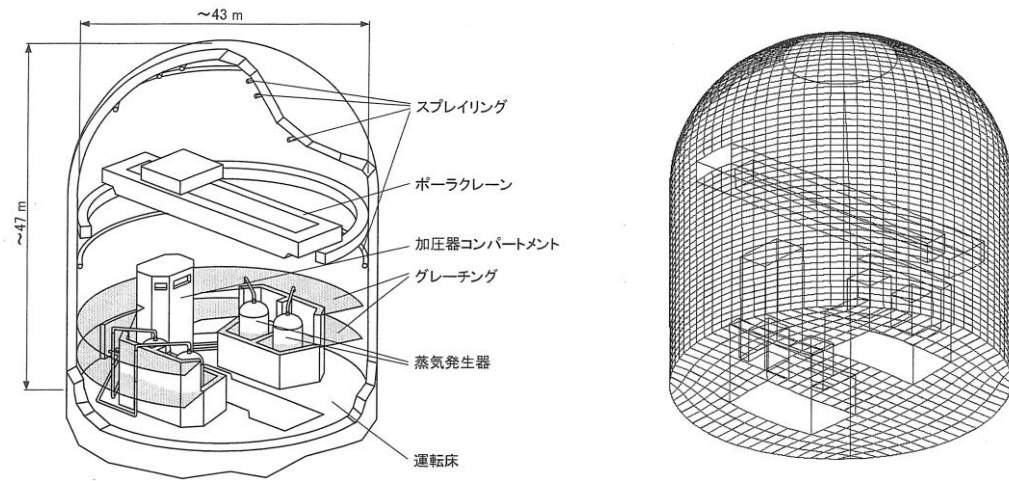
- ・水素は上部に滞留 (上部にモル分率 1.0、下部は大気条件 (平均モル分率約 0.21))
- ・初期圧力: 0.3MPa (定格使用圧力の約 1/2)
- ・初期温度: 400K (飽和温度相当)
- ・代替スプレイポンプ流量: 120m³/h/台 (本設スプレイ定格流量の約 1/10)

(2) 解析結果

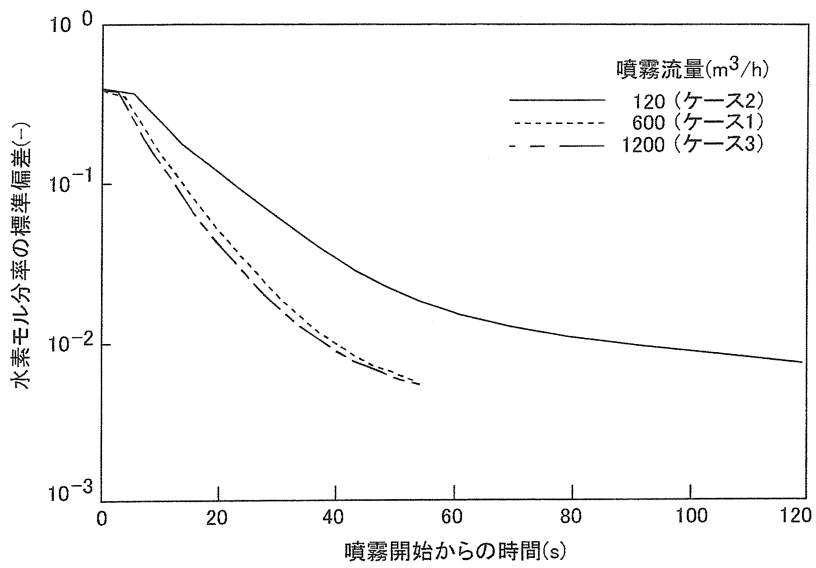
混合挙動に関するスプレイ流量の依存性を付図 3-2 に示すが、スプレイ流量が本設スプレイ流量の 1/10 となった場合においても、混合までの時間は長くなる傾向とはなるが、スプレイ開始から 120 秒後には格納容器内の水素モル分率の分布の標準偏差が 10^{-2} にまで低下し、水素は格納容器内で混合することが確認される。

(3) 結論

格納容器のドーム部で水素が滞留 (成層化) した場合のスプレイによる水素濃度分布の攪拌について、INSPAT/CV コードを用いた解析により評価した。スプレイ流量が低下すると攪拌効果も遅れる傾向となるが、代替スプレイポンプとして想定される流量 (本設スプレイ流量の約 1/10) とした場合においても、スプレイ開始後の 120 秒程度で水素濃度が均一化することが確認された。



付図 3-1 格納容器概略構造と解析メッシュ



付図 3-2 水素モル分率の時間変化の噴霧流量依存性

(参考文献)

- [1] (財)原子力発電技術機構、平成 11 年度「格納容器内水素挙動解析評価に関する報告書」(平成 12 年 3 月)