

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 G O T H I C)

目 次

－ 第4部 － G O T H I C －

1. はじめに.....	4-3
2. 重要現象の特定.....	4-4
2.1. 事故シーケンスと評価指標.....	4-4
2.2. ランクの定義.....	4-4
2.3. 物理現象に対するランク付け.....	4-5
3. 解析モデルについて.....	4-9
3.1. コード概要.....	4-9
3.2. 重要現象に対する解析モデル.....	4-9
3.3. 解析モデル.....	4-10
3.4. ノード分割.....	4-15
3.5. 入出力.....	4-23
4. 検証／妥当性確認.....	4-24
4.1. 重要現象に対する検証／妥当性確認方法.....	4-24
4.2. N U P E C 試験解析.....	4-26
4.3. 熱伝達試験との比較.....	4-52
4.4. 熱伝導解析解との比較.....	4-54
4.5. P A R 特性検証.....	4-55
4.6. 実機解析への適用性.....	4-57
5. 有効性評価への適用性.....	4-62
5.1. 不確かさの取り扱いについて（評価指標の観点）.....	4-62
5.2. 不確かさの取り扱いについて（運転員操作の観点）.....	4-63
6. 参考文献.....	4-65
添付 1 入力パラメータ.....	4-66
添付 2 イグナイタ及び燃焼モデル.....	4-70
添付 3 実機プラント感度解析.....	4-73
添付 4 水素分布挙動に関する整理.....	4-76

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。

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、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度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。

(1) 区画間・区画内の流動

--

(2)気液界面の熱伝達

(3)構造材との熱伝達及び内部熱伝導

(4)スプレイ冷却

(5)水素発生



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

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
スプレイ	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	PAR特性モデル

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
スプレー	<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

3.3.1. 区画間・区画内の流動

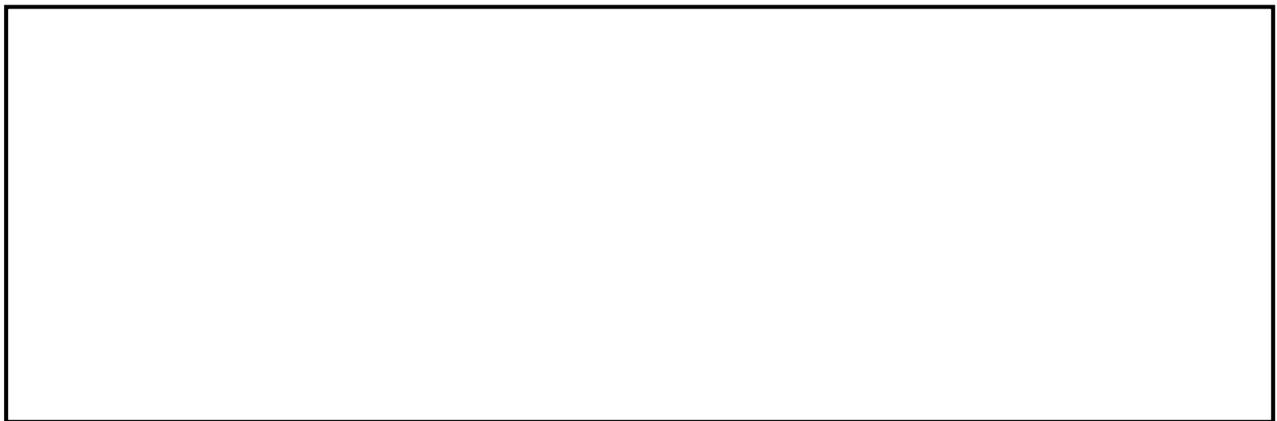
格納容器内の区画・区画内の流動を適切に模擬するため、格納容器を適切にノード分割する。流動計算で取り扱われる流体は各種ガス組成及び蒸気を含む気相、液相及び液滴相となり、これら各相に対して質量、エネルギー、運動量の保存式を各種の構成式及び相関式と合わせて数値的に解き、格納容器内の流動を模擬する。流体の各相に対しては非平衡状態の模擬が可能であり、多相の流況及び界面状態、相間の相互作用が考慮される。また、これら流体に合わせ、アイス及びミストも考慮することが可能である。

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。



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、後述する気液界面の熱伝達や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。

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。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：自由対流、Dittus-Boelter：強制対流）
- ・輻射熱伝達（壁面-気相、壁面-壁面、Stefan-Boltzman 式に基づく）
- ・凝縮熱伝達（内田・田上、Gido-Koestel、Diffusion Layer Model）

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。

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。この各部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。

3.3.3. スpray冷却

分散液滴を考慮する三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、構成式は、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（図 3-2及び図 3-3を参照）。

- ・ 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）について説明する。水素燃焼設備となるイグナイタについては添付2にて説明する。

P A R の性能評価式はメーカー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、P A R 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、P A R 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はないが、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。

$$\gamma = \eta \cdot \min(XH_2, 2 \cdot XO_2, 8.0) \cdot (A \cdot P + B) \cdot \tanh(XH_2 - 0.5)$$

ここで、

γ : 再結合率 (g/s)

η : 1.0 ($XO_2 > XH_2$)

XH_2 : 水素体積比 (%)

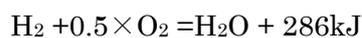
XO_2 : 酸素体積比 (%)

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、P A R 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G O T H I C コードにおいて考慮される。

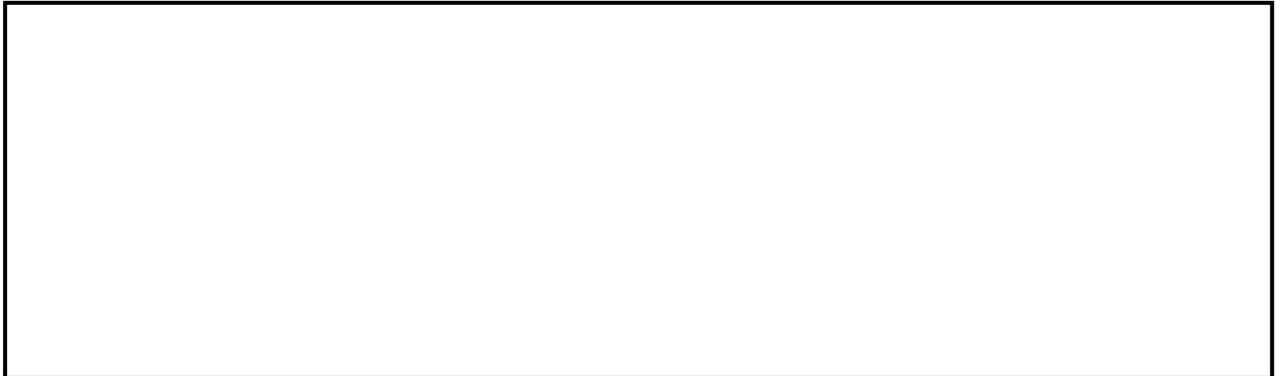


G O T H I C コードでは、P A R が設置されるノードの水素及び酸素の体積比、圧力が性能評価式の入力として与えられ、性能評価式に基づいて再結合率、即ち、ノード内の水素処理速度が計算される。計算された水素処理速度に基づき発生する化学反応熱量が計算され、当該ノードの雰囲気への熱源として考慮される。



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、図 3-4 に示すように形状、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。

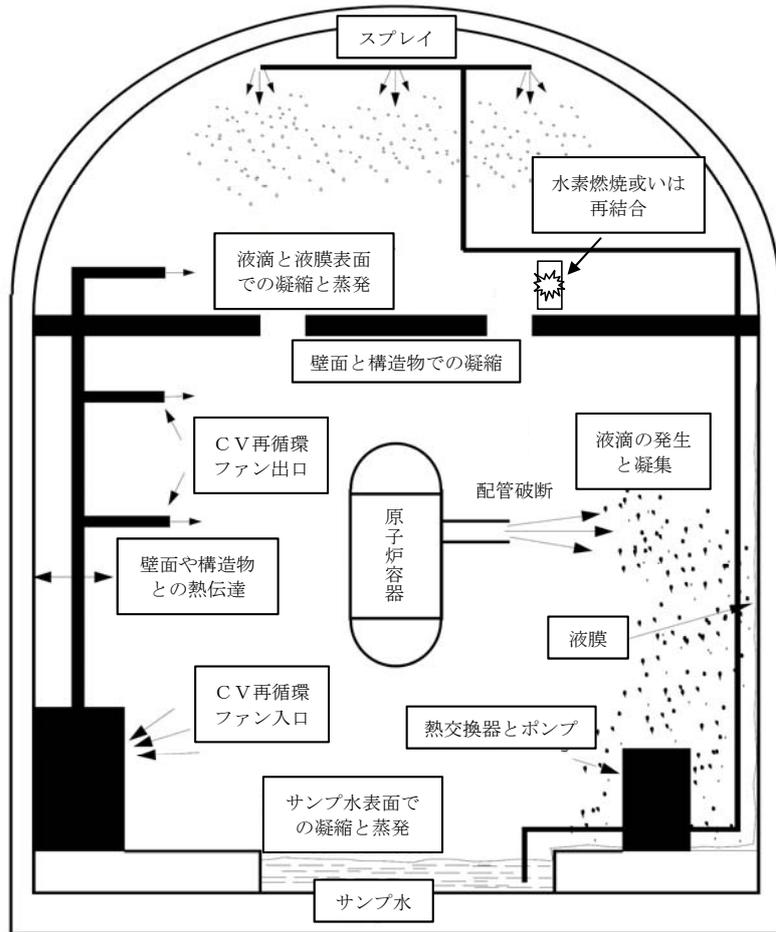


プラントノーディングを図 3-4から図 3-7に示す。

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 3-8に示す。

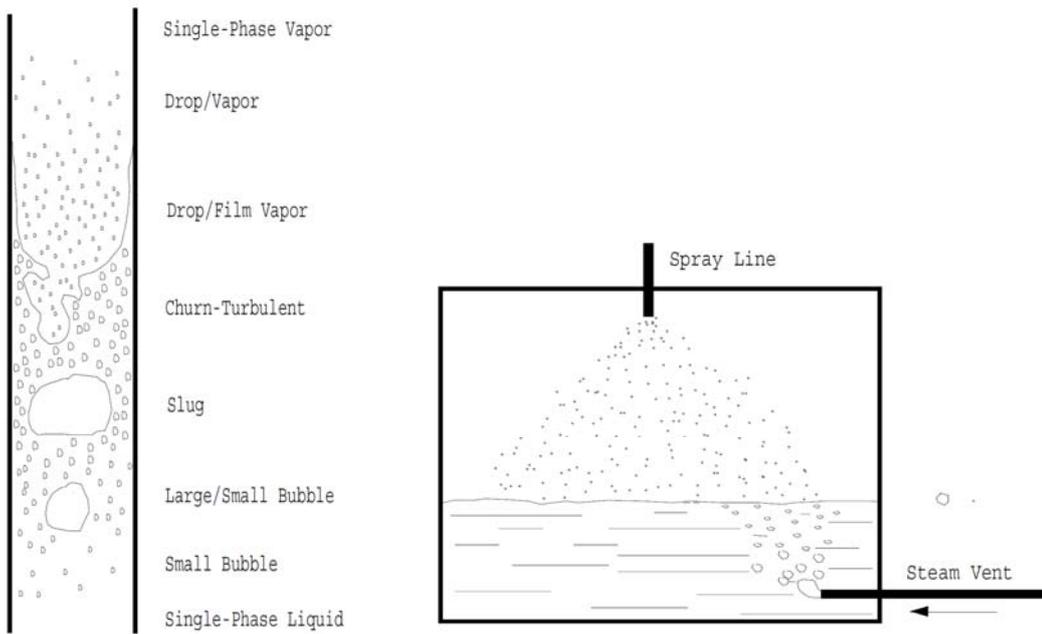
表 3-3 ノード分割の考え方

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	



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



分布定数系における Flow Regime

集中定数系における Flow Regime

図 3-2 二相流モデル

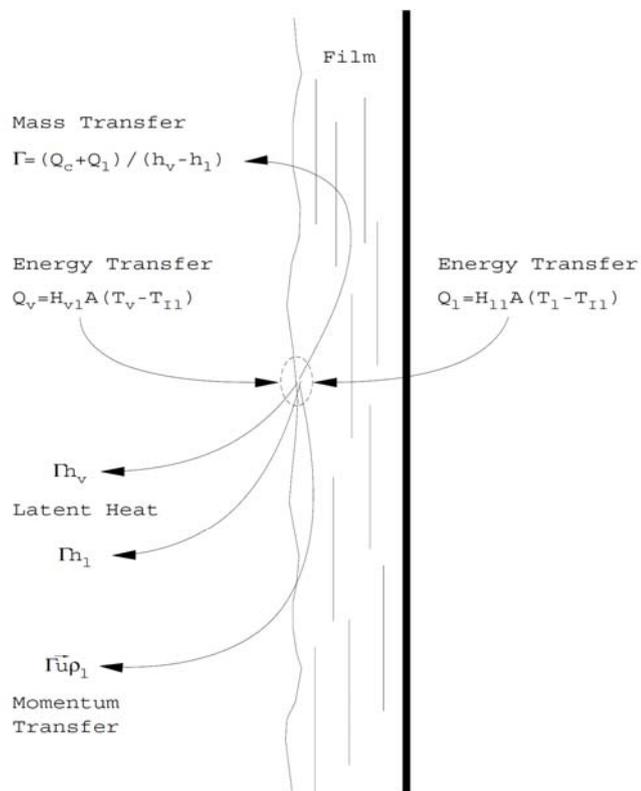
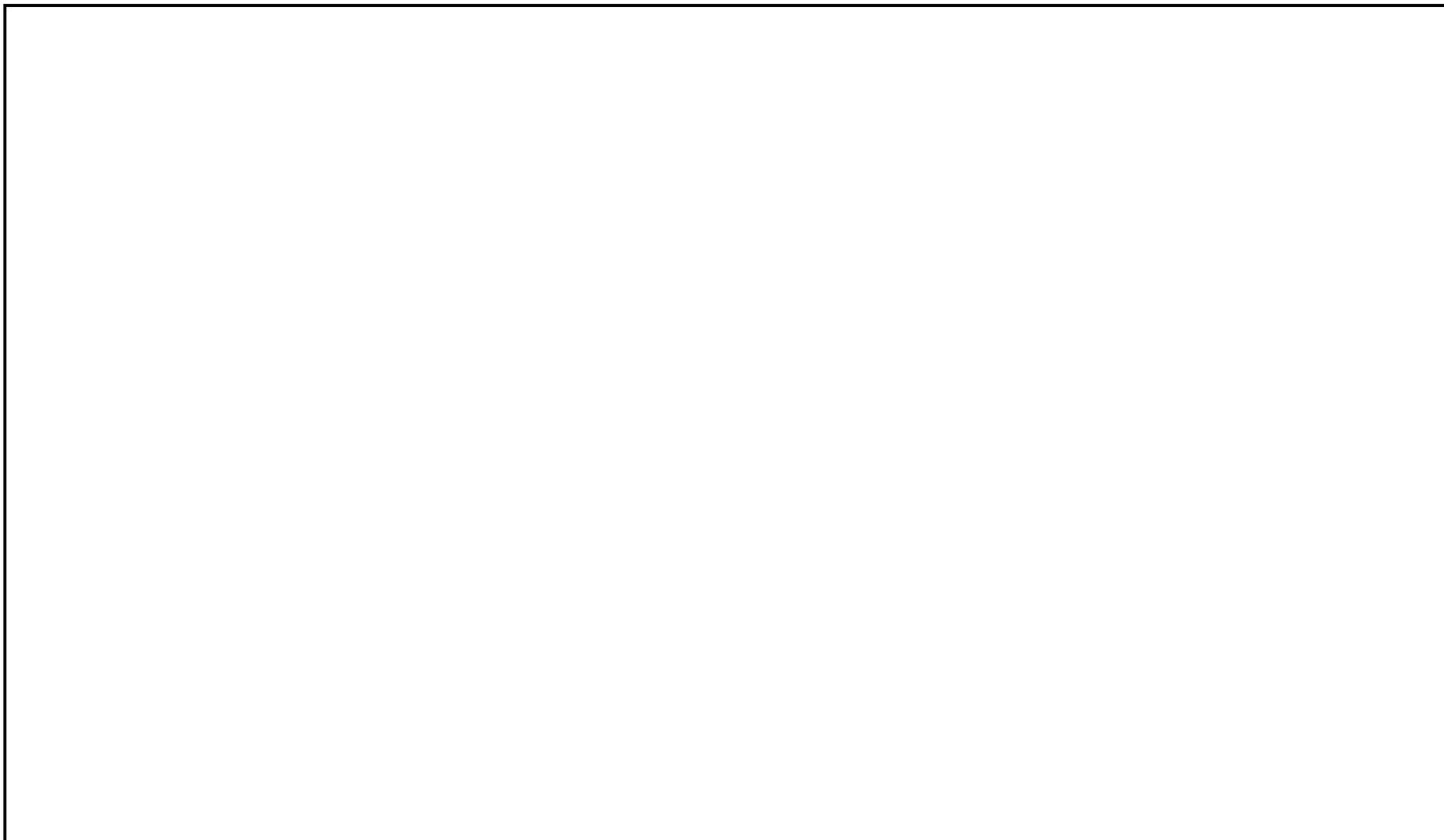


図 3-3 界面伝達モデル



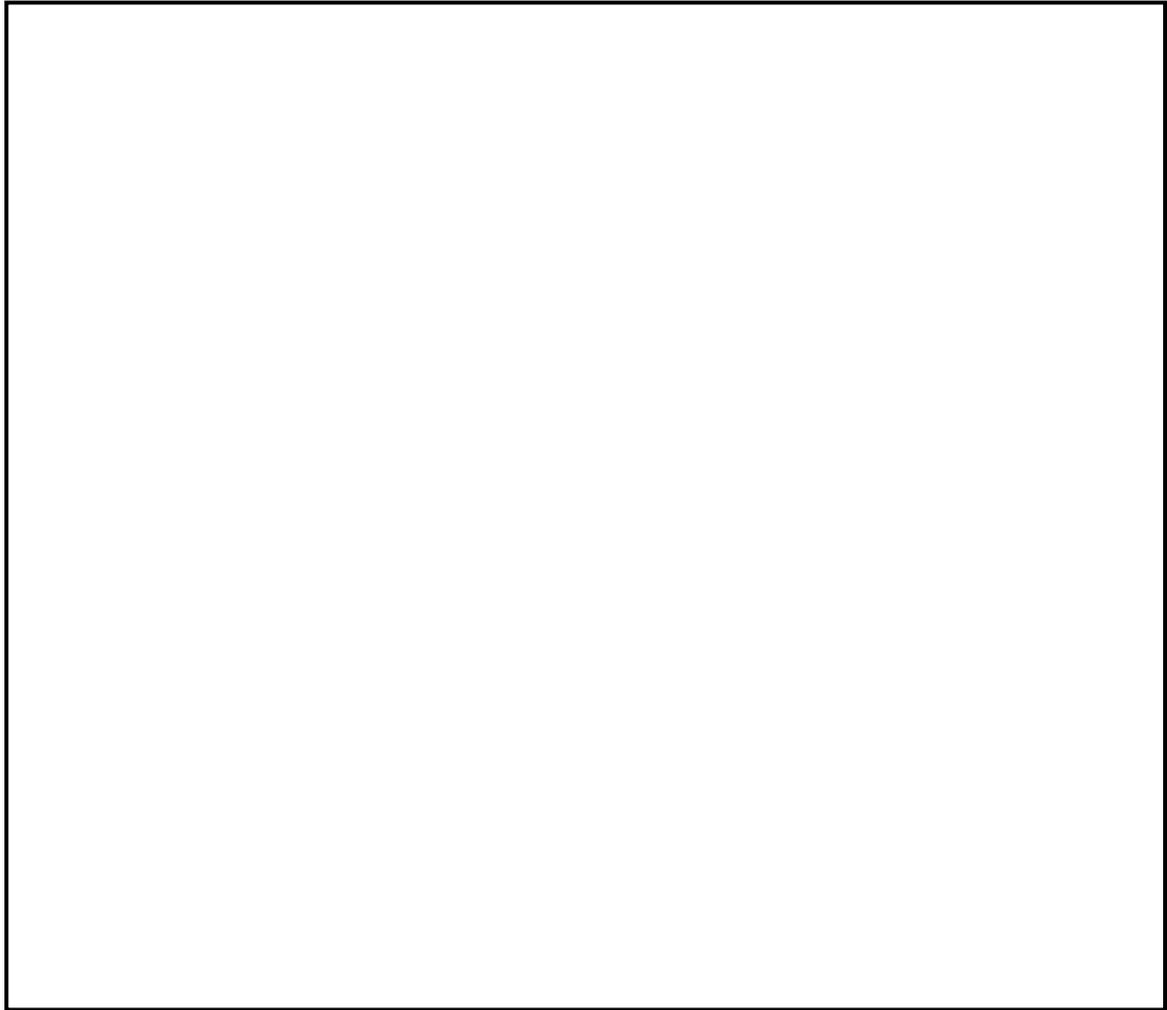
枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

図 3-4 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）



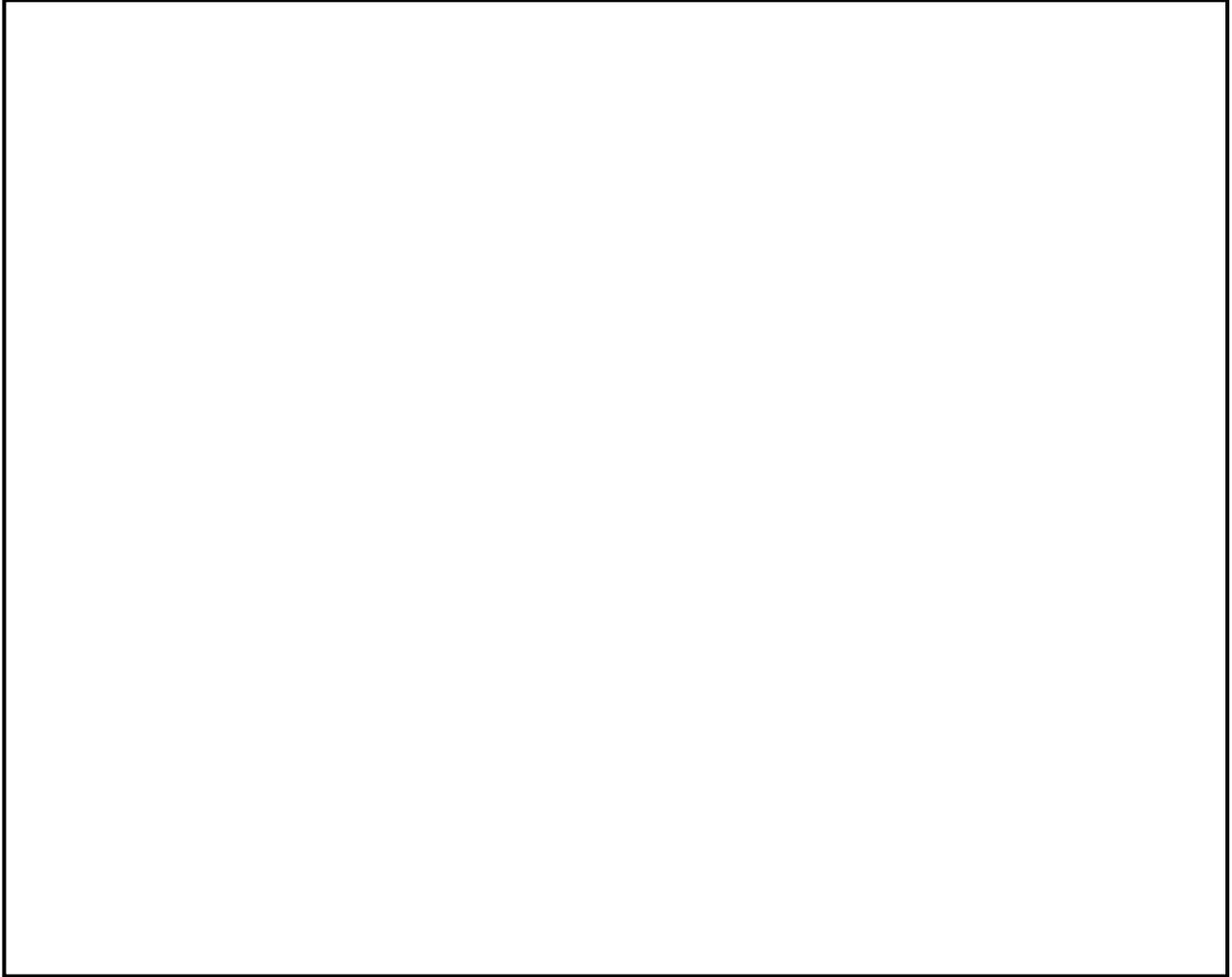
枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。

図 3-5 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 3-6 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 3-7 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

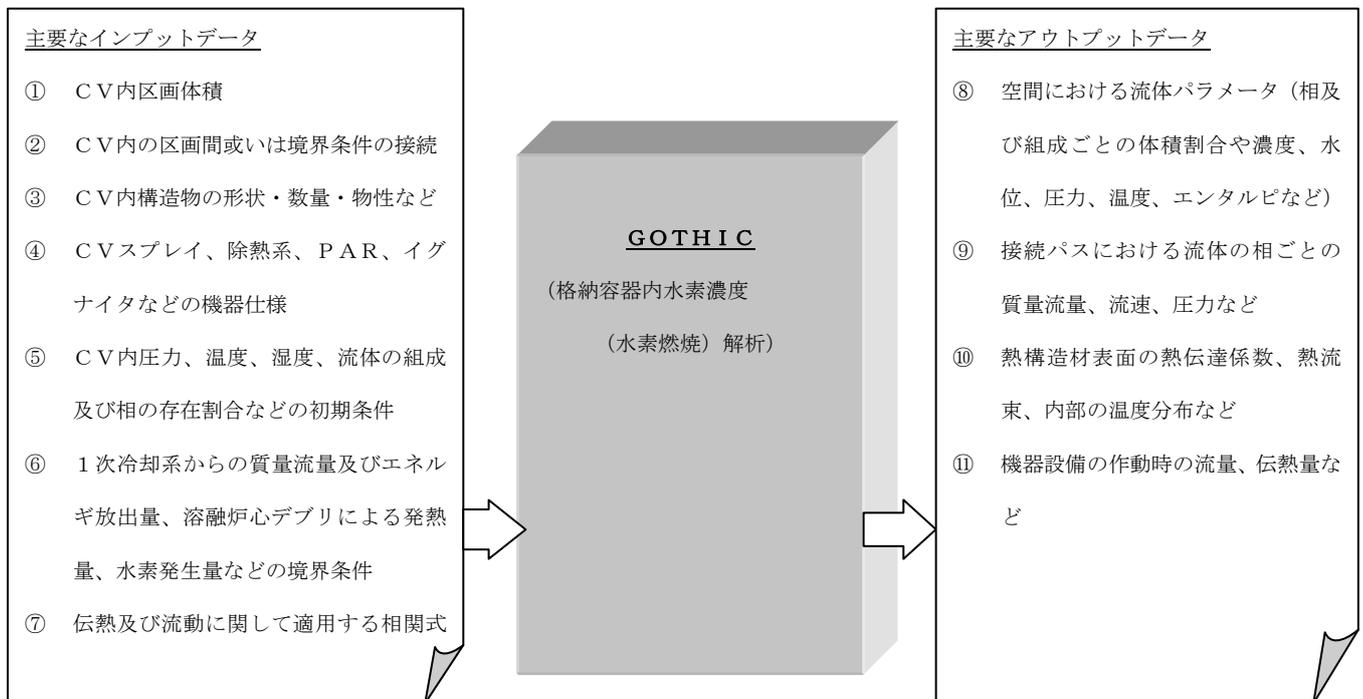
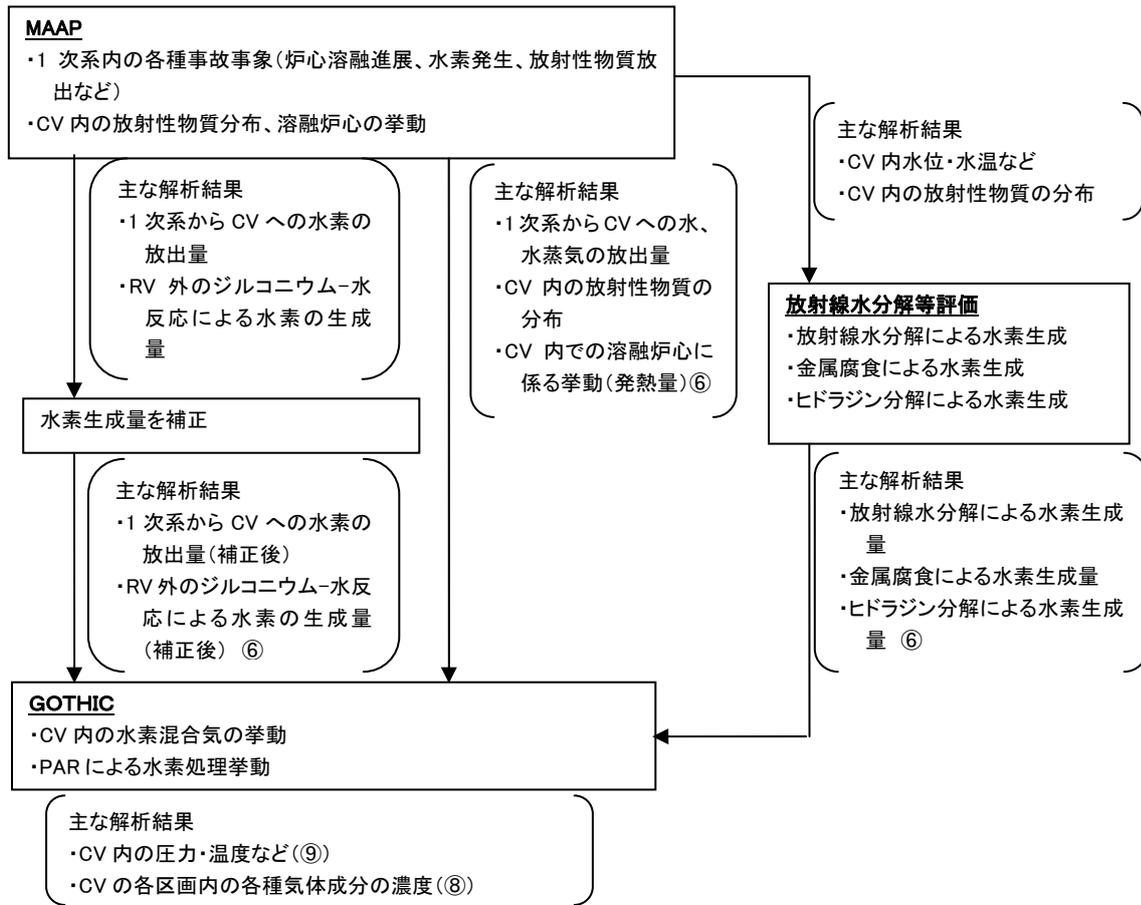


図 3-8 実機プラントにおける格納容器内水素濃度評価の概要

3.5. 入出力

GOTHICコードによる水素濃度評価の主要な入出力は図 3-8に示される。また、主要なインプットデータを以下に示す。

- 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、熔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）

水素濃度評価に用いられる主要な入力パラメータを添付 1 に整理する。

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4.1.4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	P A R 特性検証	関連モデル
区画間・区画内の流動	☒ 4-8 ～ ☒ 4-12	☒ 4-13 ～ ☒ 4-15	—	—	—	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 ノーディングモデル（空間離散化モデル）
構造材との熱伝達及び内部熱伝導			☒ 4-17 ～ ☒ 4-21	☒ 4-22	—	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	—	—	—	—	☒ 4-23 ☒ 4-24	P A R 特性モデル

※ 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、実機プラントの水素燃焼評価での重要事故シーケンスとなる大破断LOCA+ECCS失敗を模擬し、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となる。ここでは、水素燃焼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全体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モデルの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

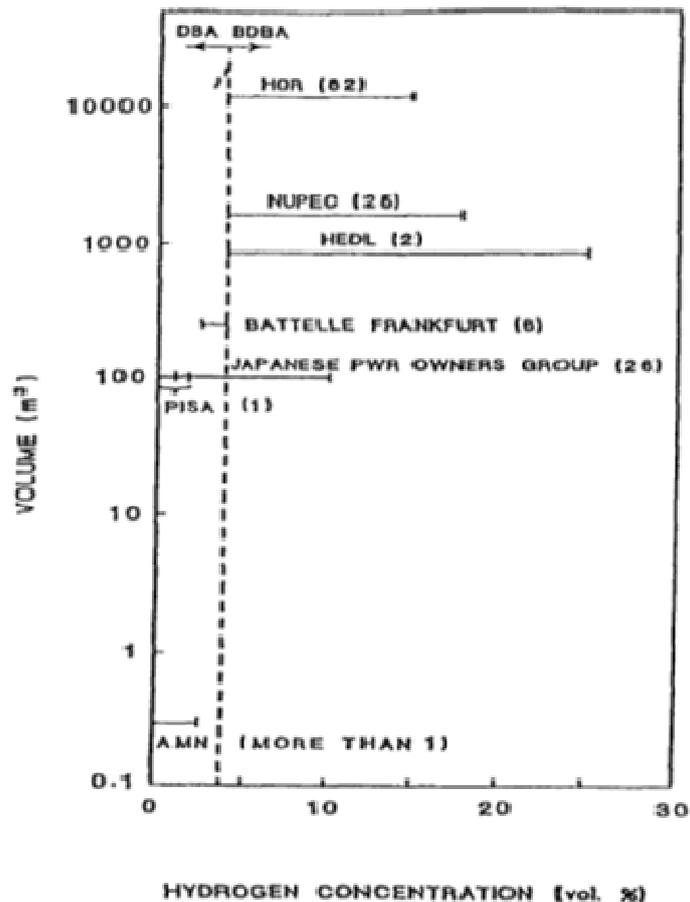
水素処理設備のうち、シビアアクシデント対策として採用される静的触媒式水素再結合装置（PAR）について、設備製造元が供給する水素処理特性モデルが、コードに適切に組み込まれていることを検証する。

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3、4および5）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

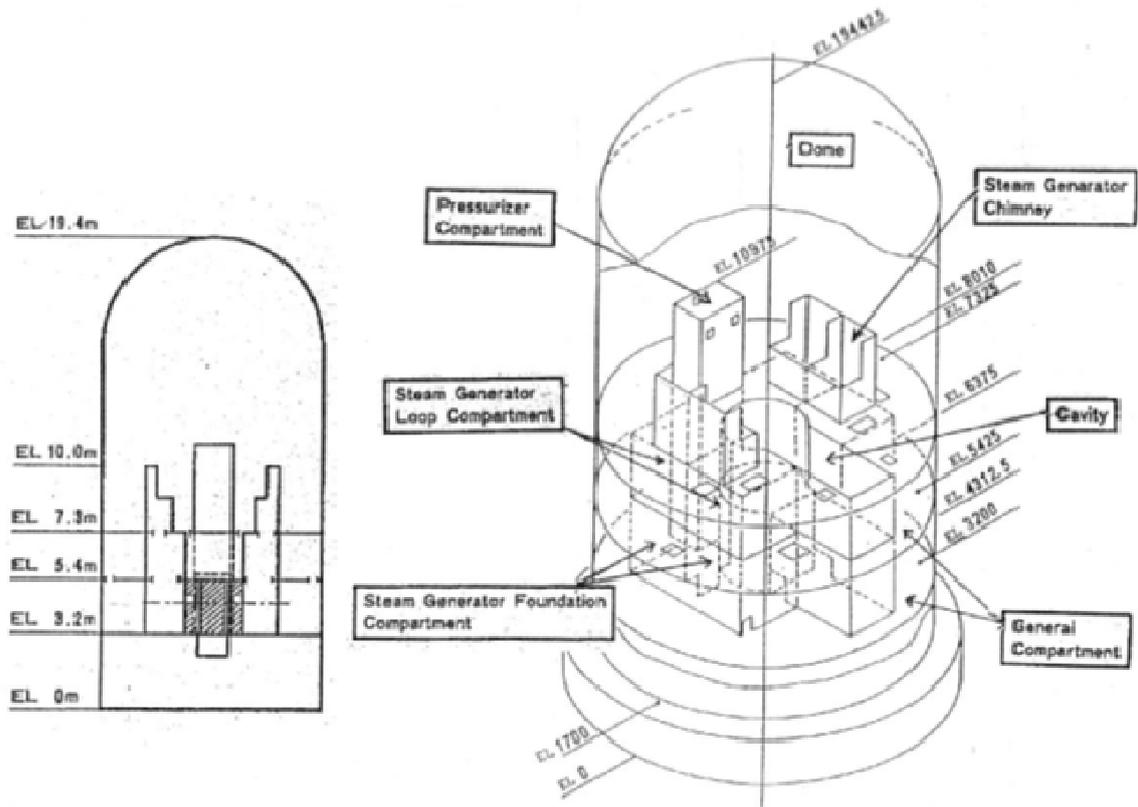
格納容器全体をカバーするため合計 21 個のスプレイノズルが設置されている。スプレイ液滴径は約 0.75mm である。

(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。

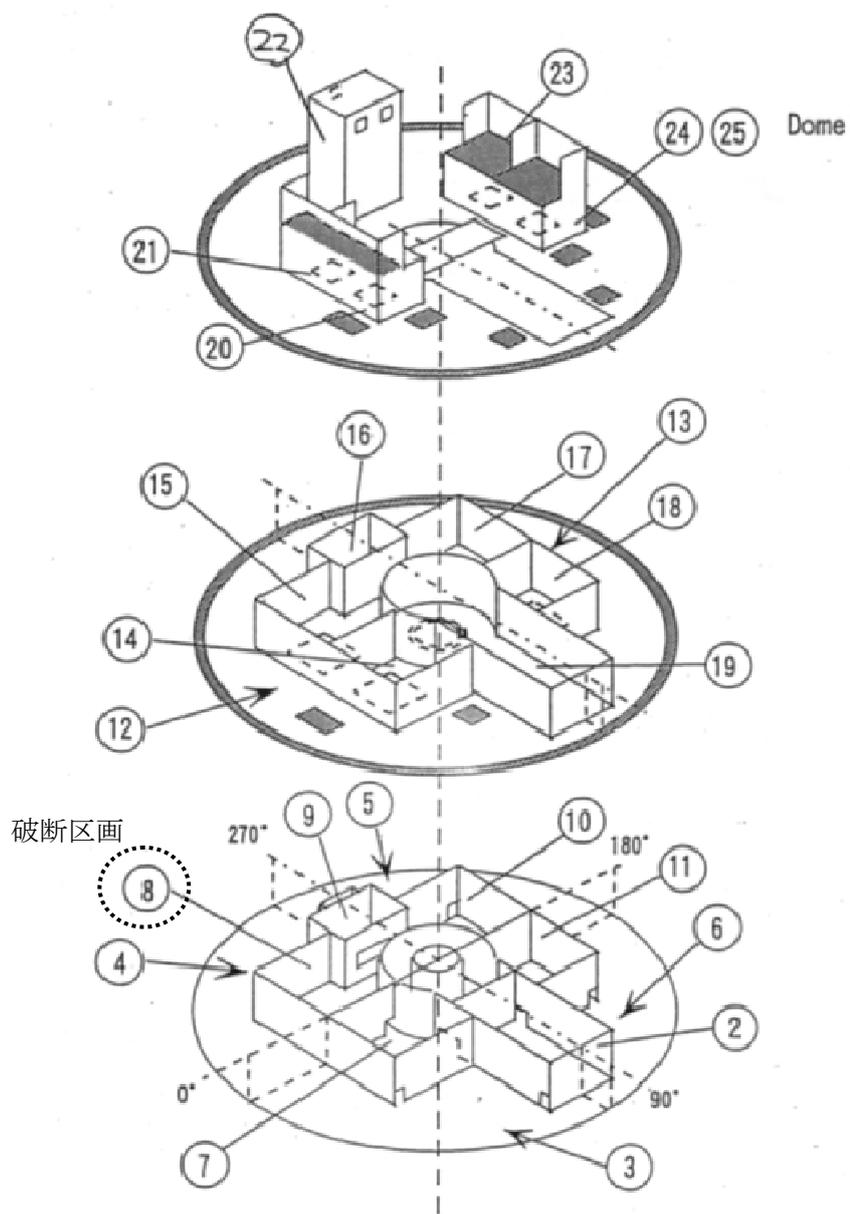
(5) 計測設備

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

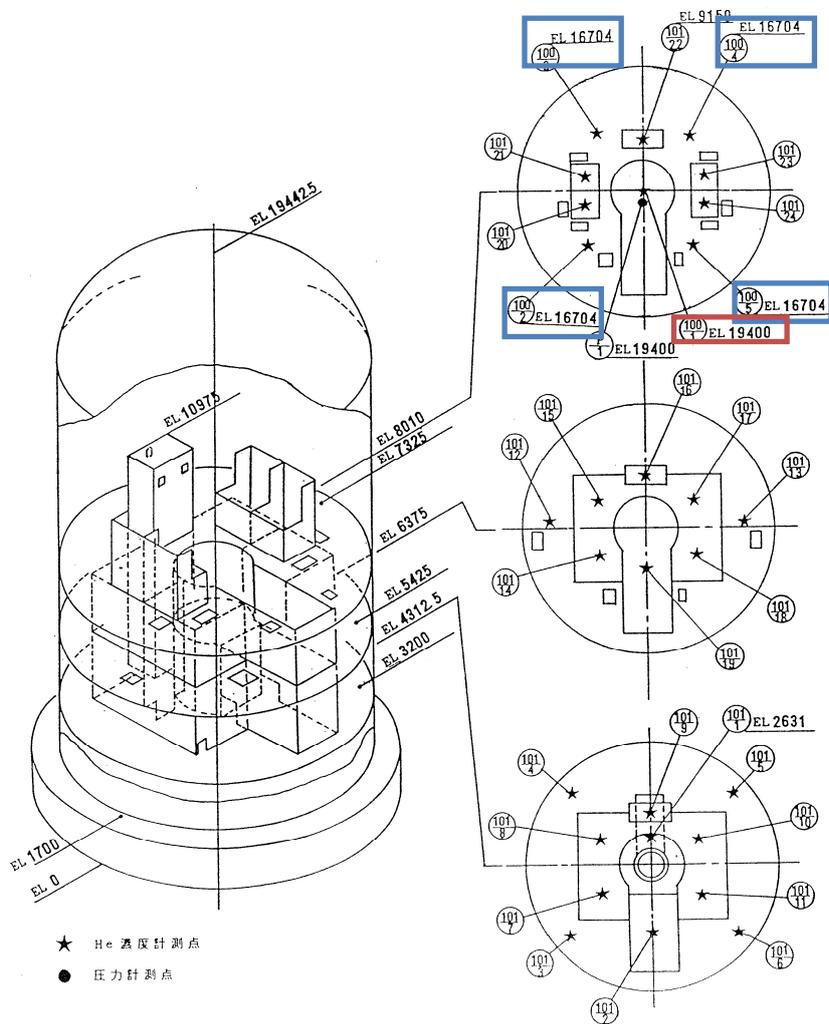
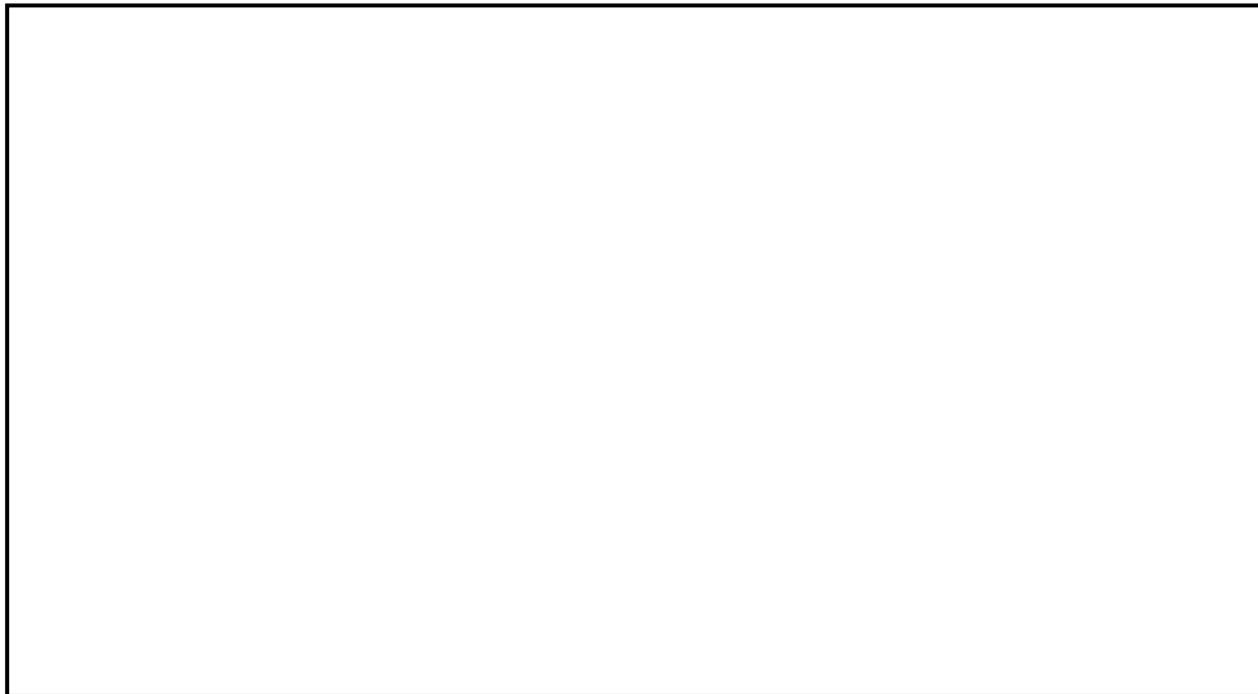


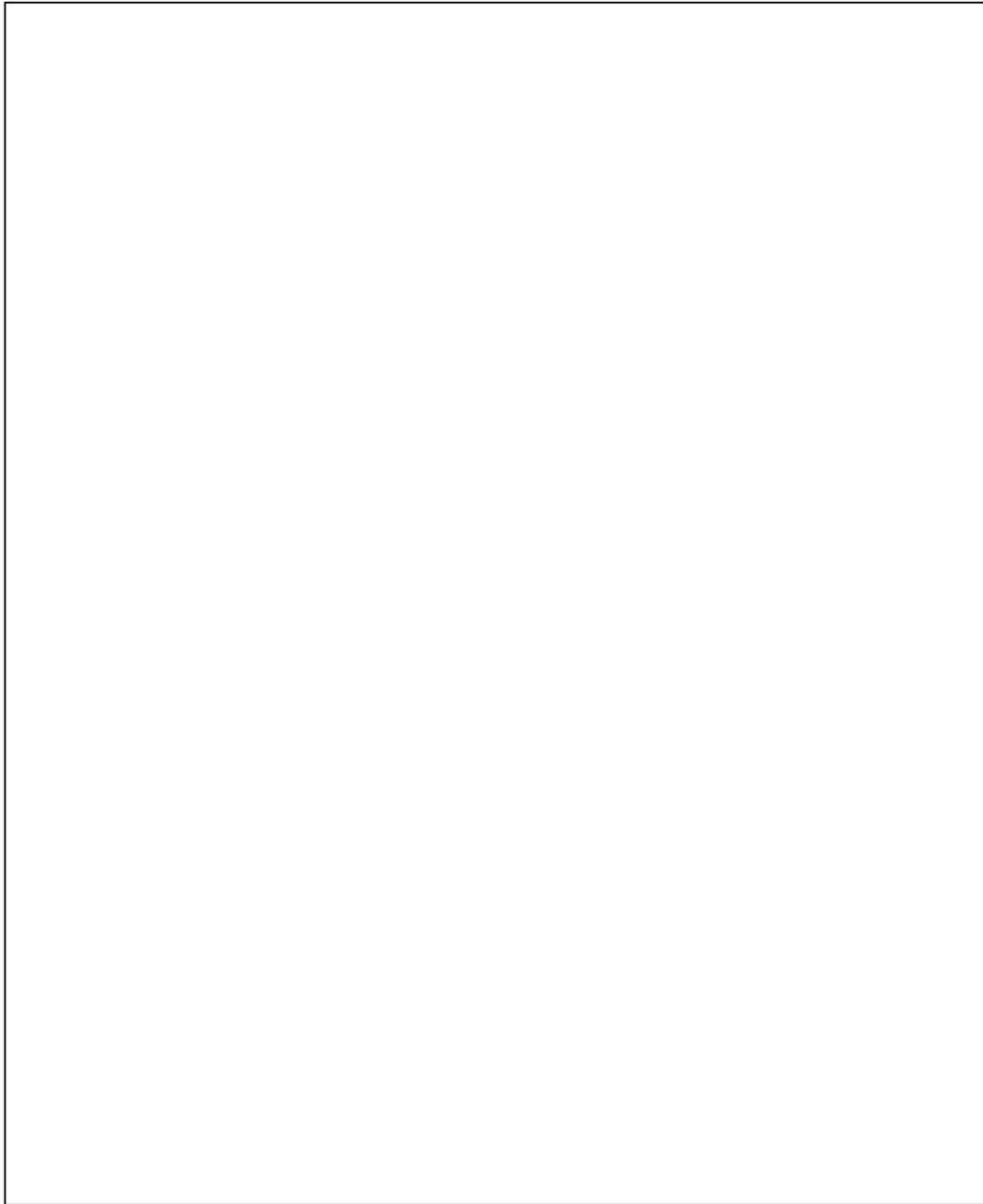
図 4-4 ヘリウム計測位置

4.2.2. 解析モデル



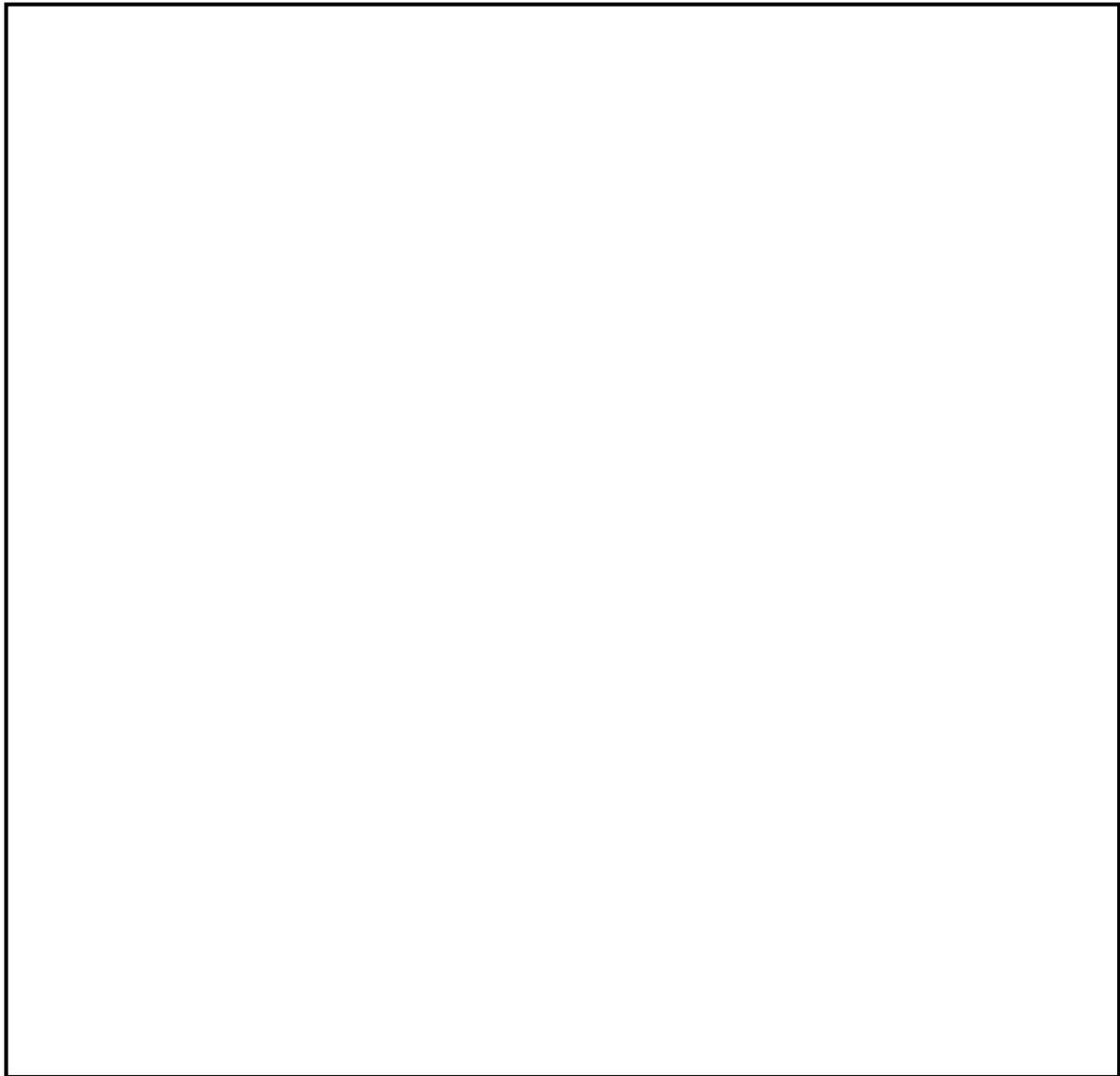
GOTHICコードによるNUPEC試験施設のノード分割モデルを図 4-5に、ドーム部の分割を図 4-6に示す。

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。



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

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°C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°C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) に至りドーム部に放出される。

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。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。結果として、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重要となる格納容器ドーム部の水素濃度挙動は良好に再現されている。

表 4-2 NUPEC試験条件

試験ケース	Test M-7-1	Test M-4-3
<u>初期条件</u>		
ドーム部圧力	139.7 kPa	101kPa (大気圧)
ドーム部温度	66.4 °C	28°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	0.027 kg/s
蒸気放出流量	0.08-0.03 kg/s	0.33 kg/s
放出ヘリウム温度	14 °C	同左
放出蒸気温度	165 °C	同左
放出期間	30 min	同左
放出位置	Dループ SG基礎区画	同左
<u>スプレイ</u>		
スプレイ流量	19.4 kg/s (70 m ³ /h)	—
スプレイ水温	40 °C	—
放出期間	30 min	—
スプレイ液滴径 (平均液滴径)	0.75 mm	—
スプレイノズル個	21 個	—
放出位置	ドーム部	—

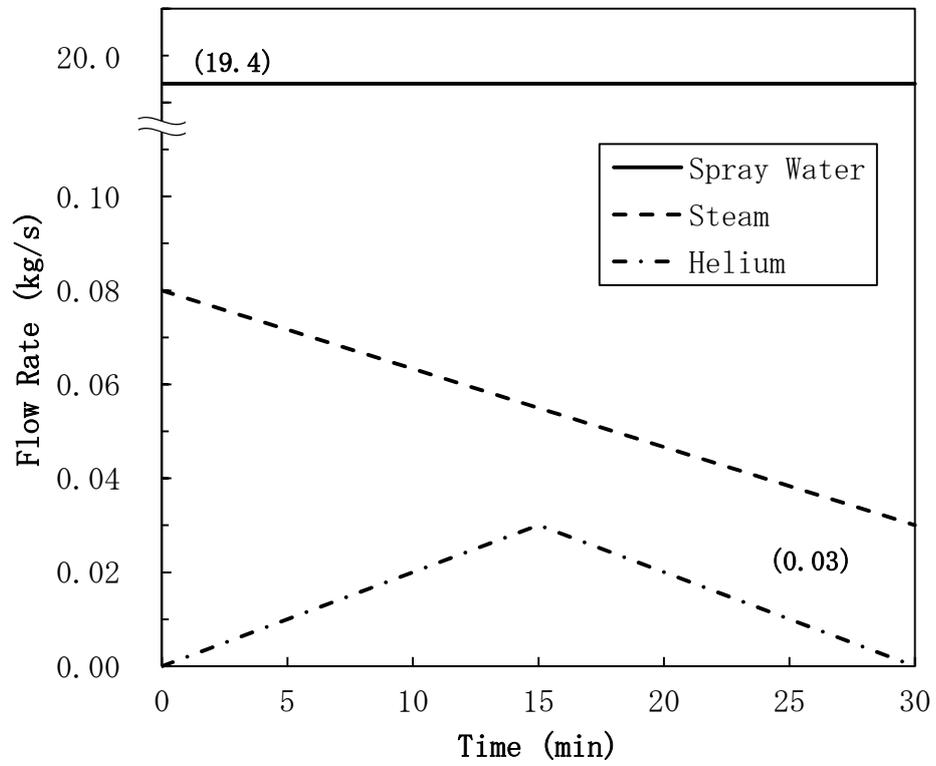


図 4-7 供給流体の流量条件 (Test M-7-1)

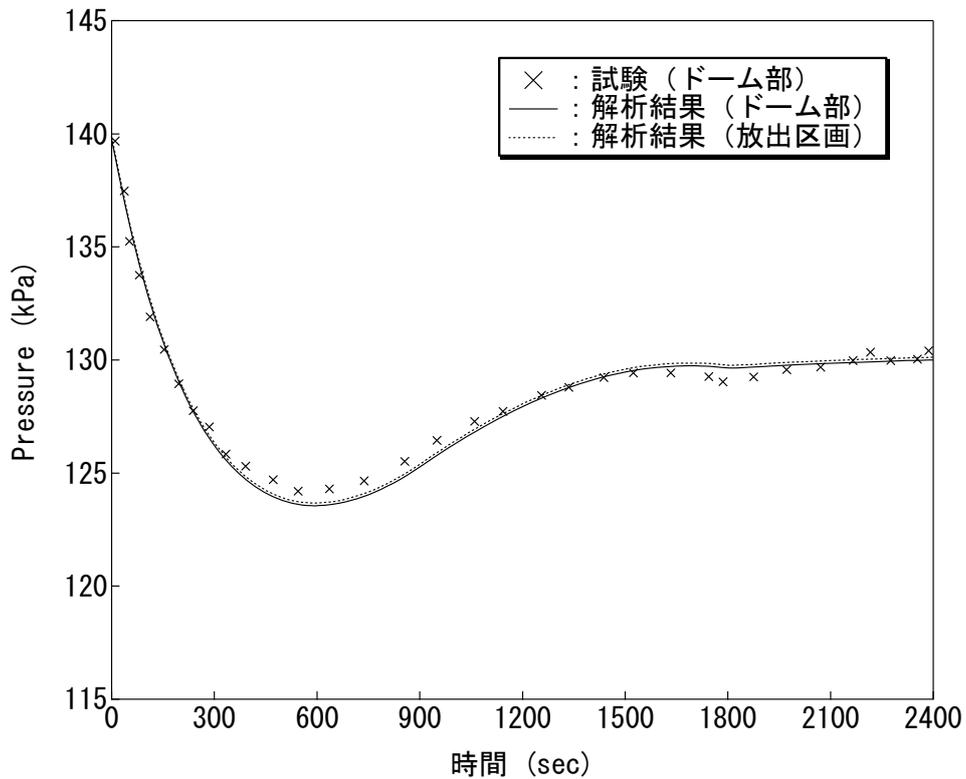


図 4-8 格納容器圧力 (Test M-7-1) (ノード 25)

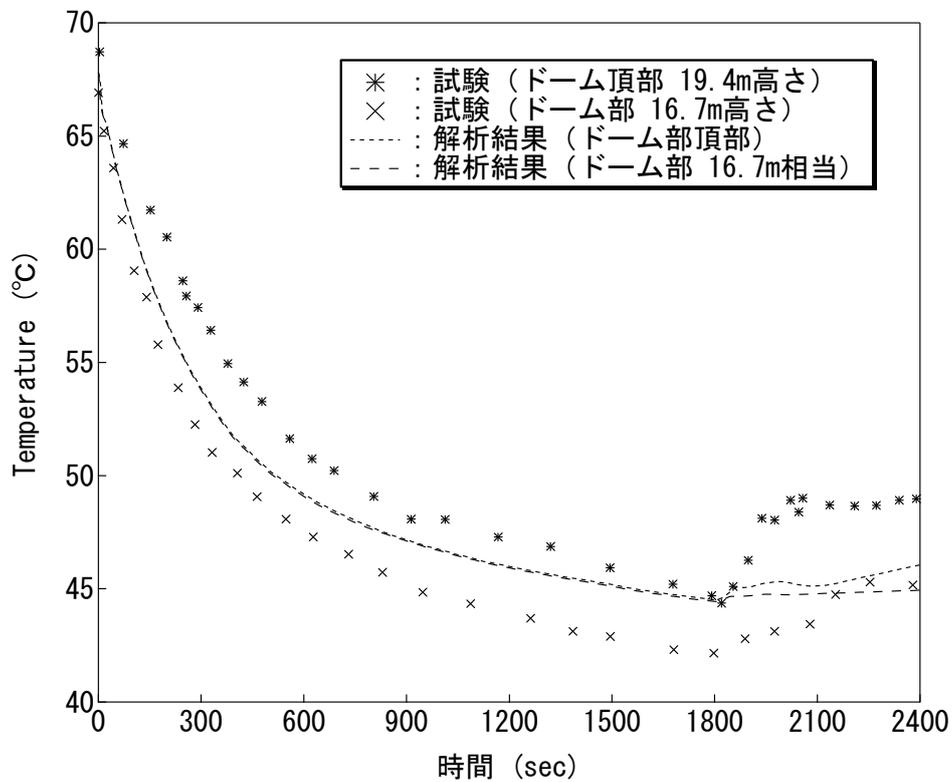


図 4-9 ドーム部雰囲気温度 (Test M-7-1) (ノード 25)

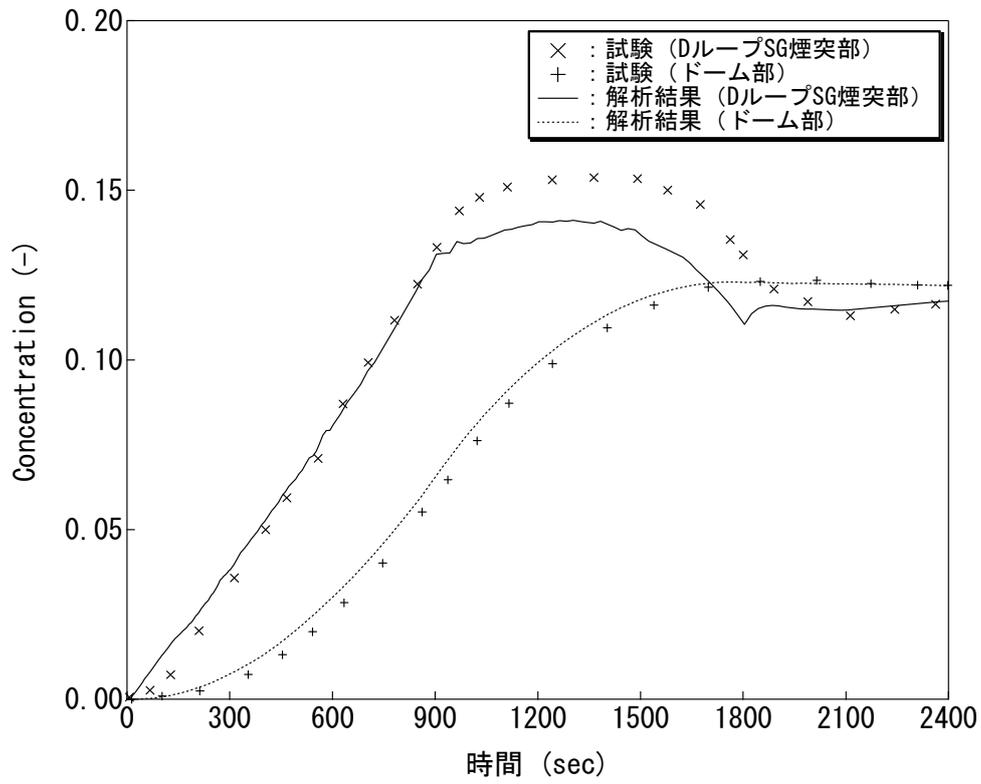
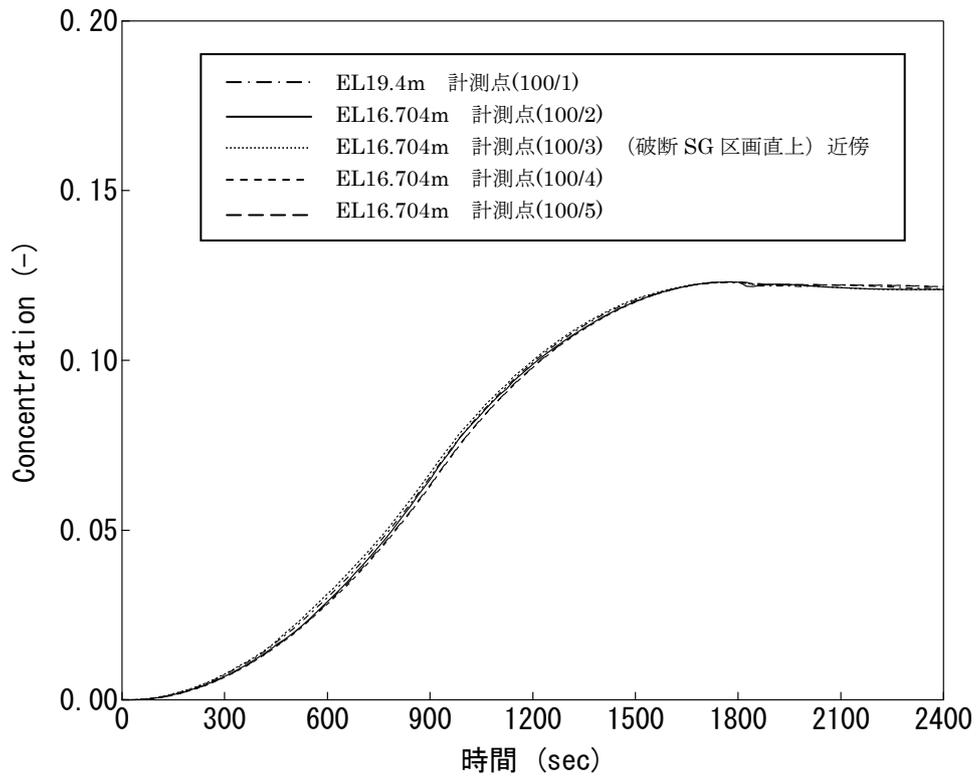
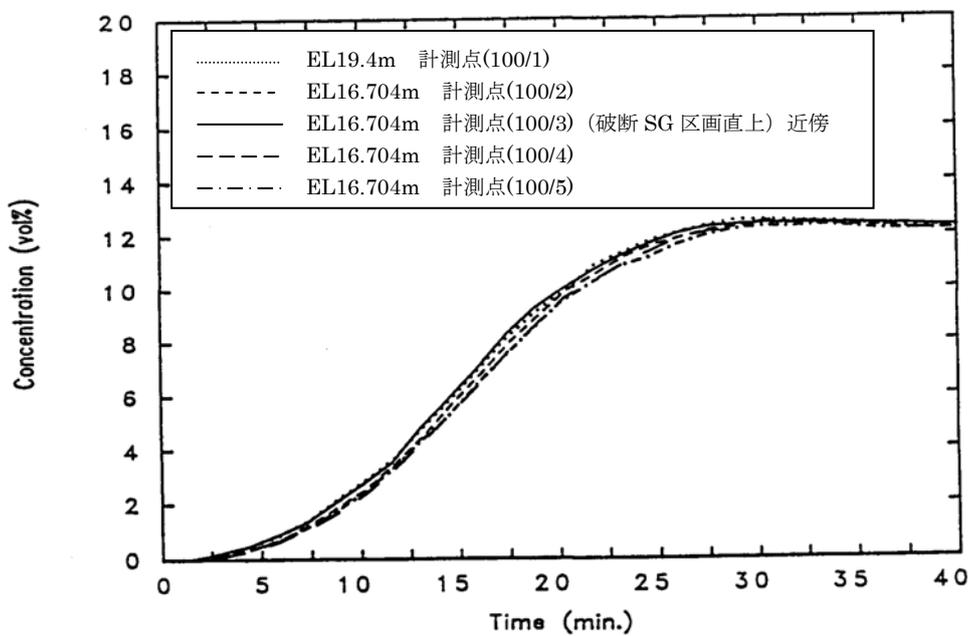


図 4-10 ノード 21、ノード 25 ヘリウム濃度 (Test M-7-1)



(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)

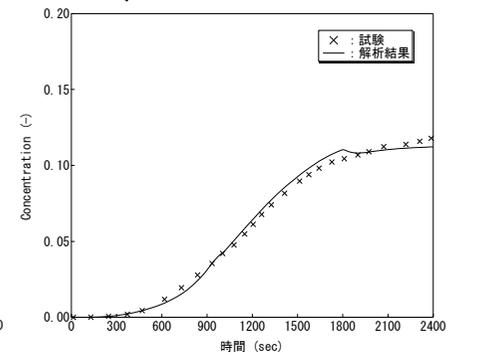
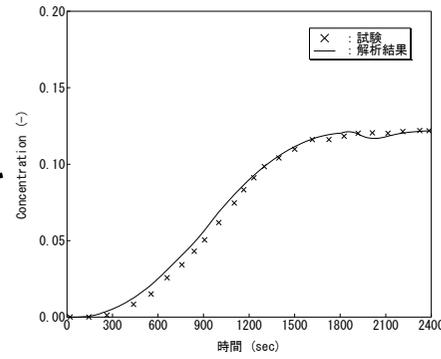
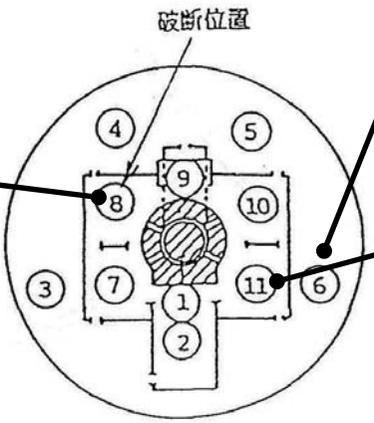
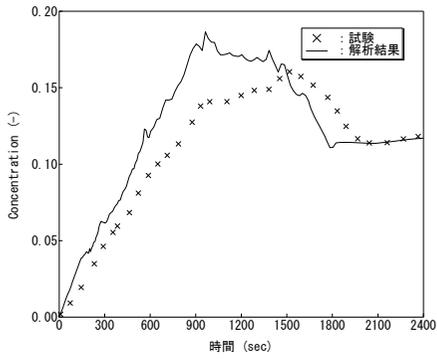
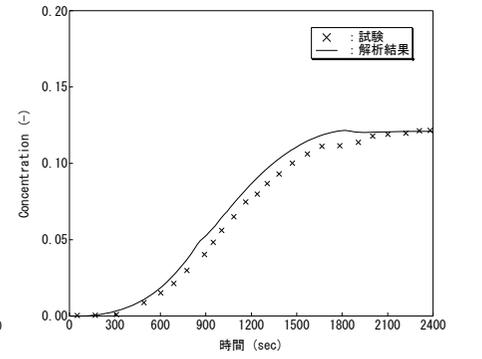
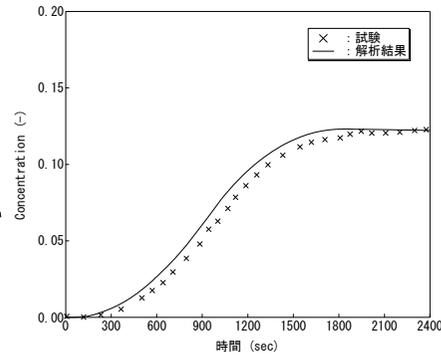
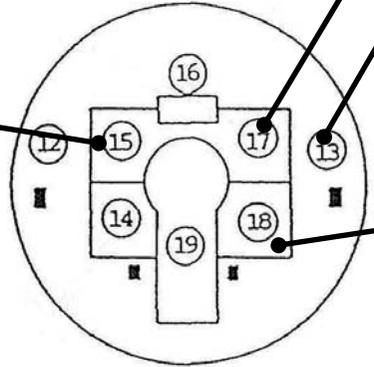
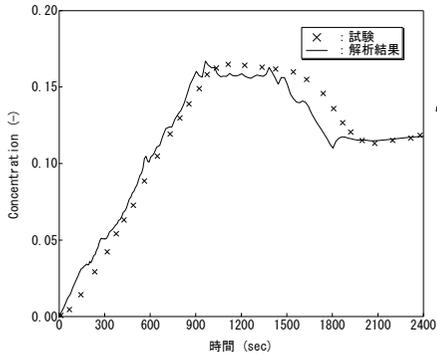
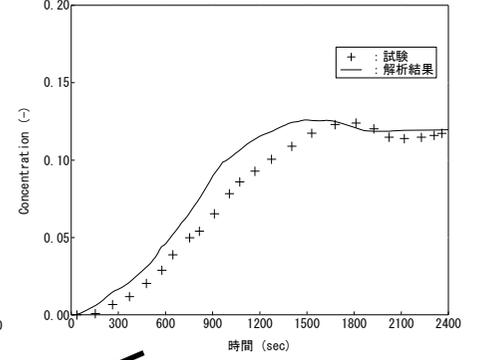
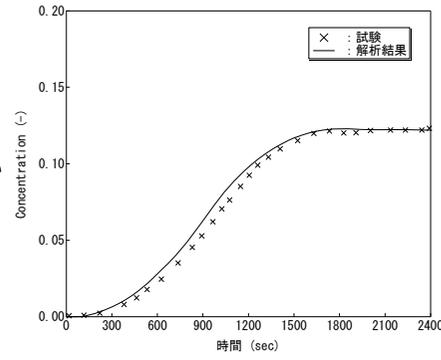
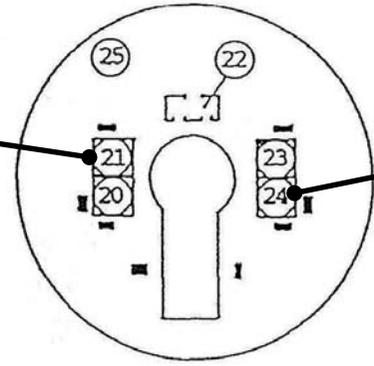
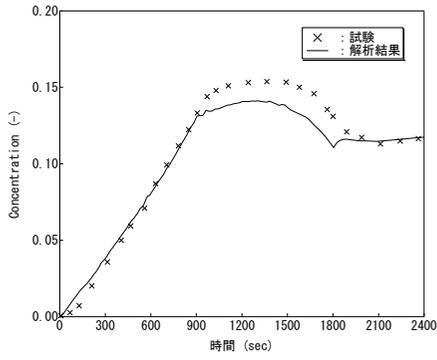
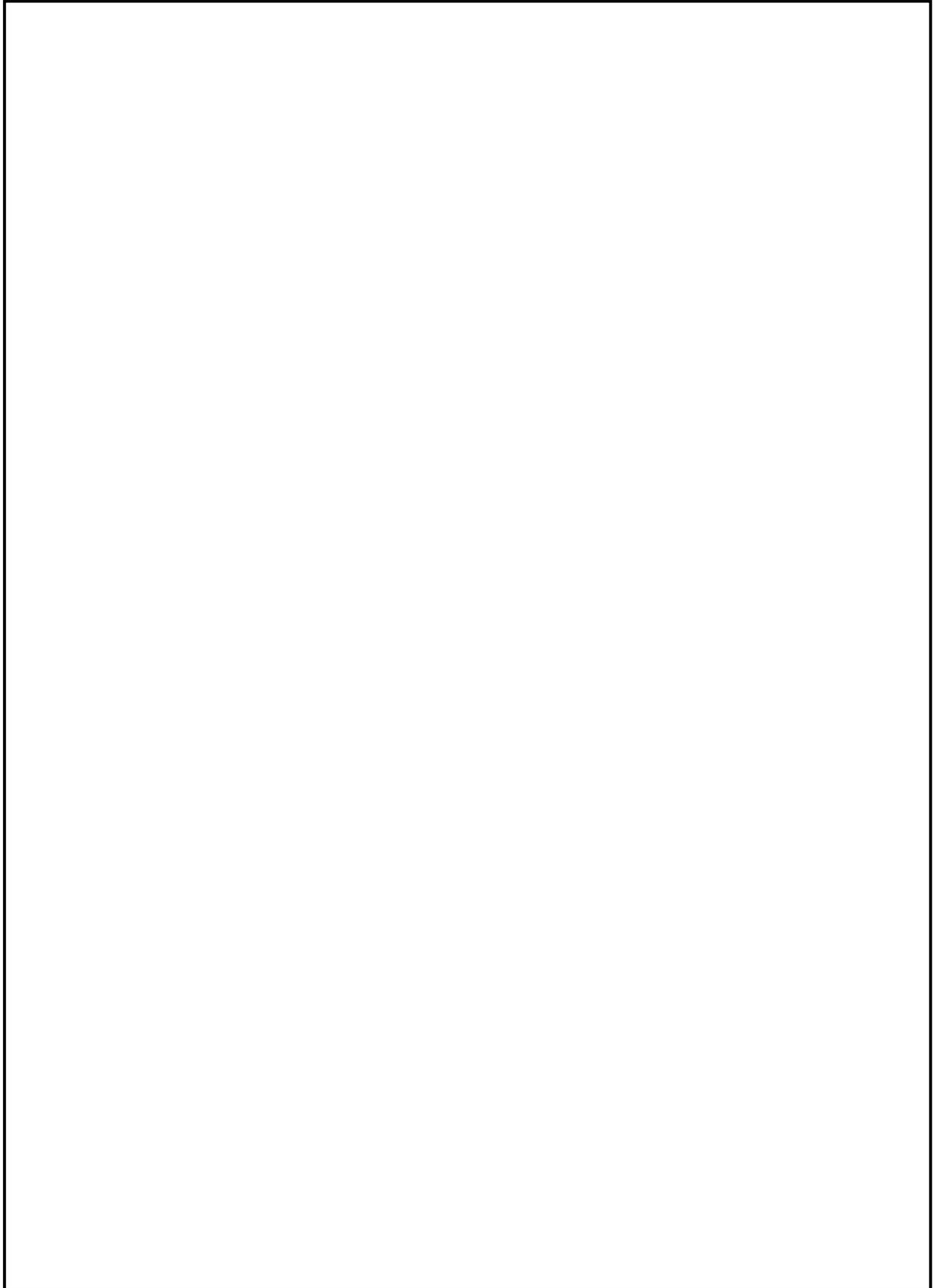


図 4-12 格納容器内各部のヘリウム濃度 (Test M-7-1)

4.2.3.2. Test M-4-3 (スプレイなし/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。

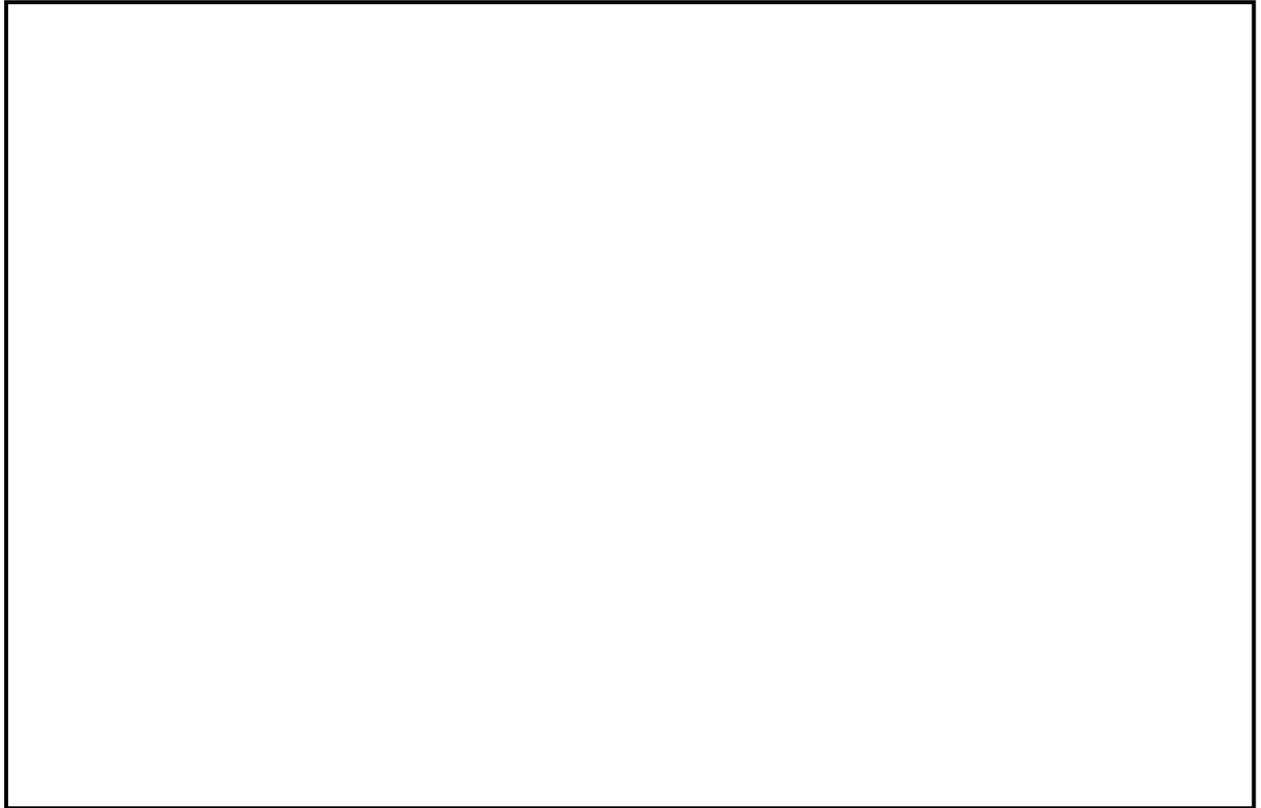


図 4-13 格納容器圧力 (Test M-4-3) (ノード 25)

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。

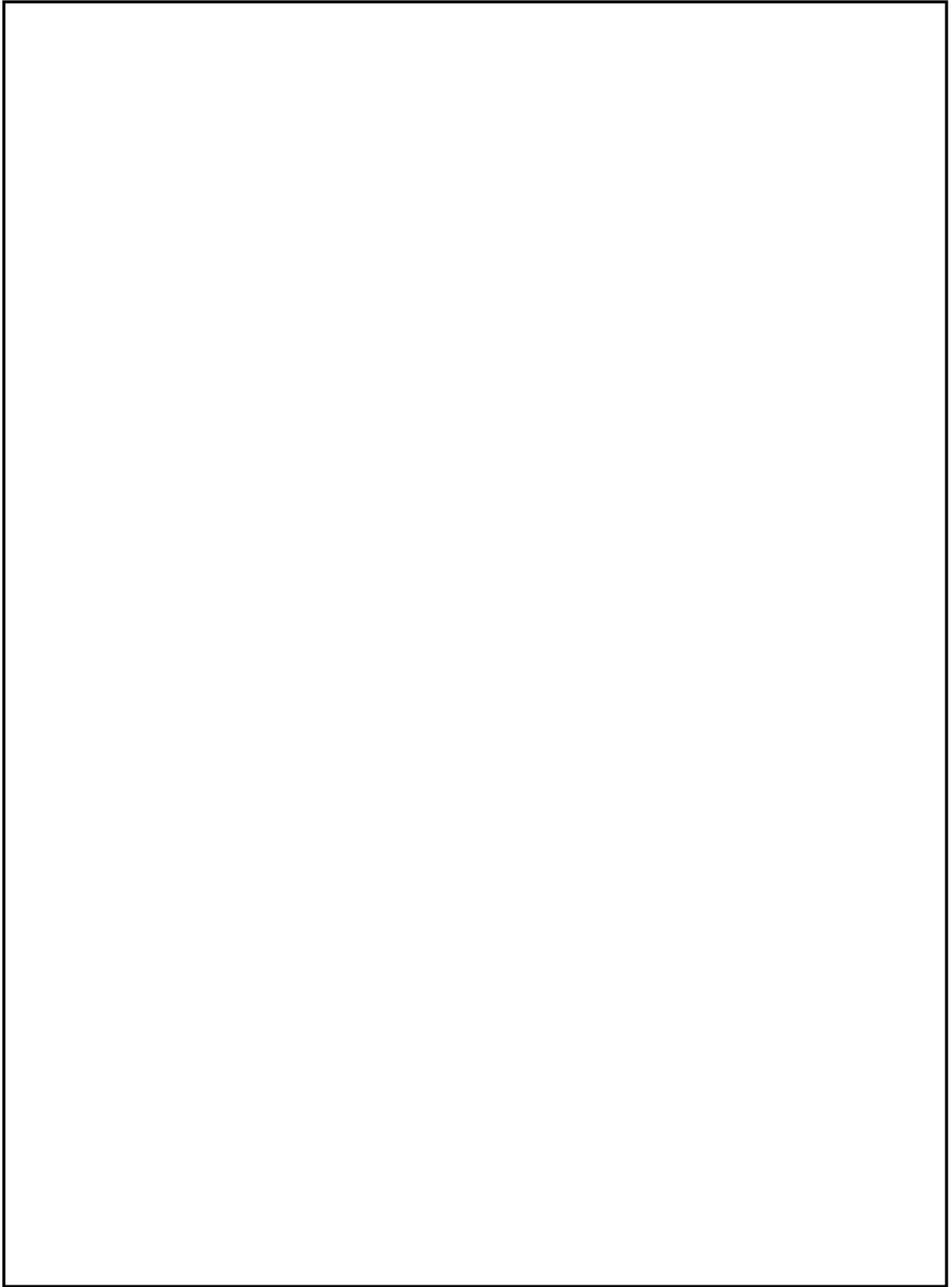


図 4-14 ドーム部雰囲気温度 (Test M-4-3)

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。

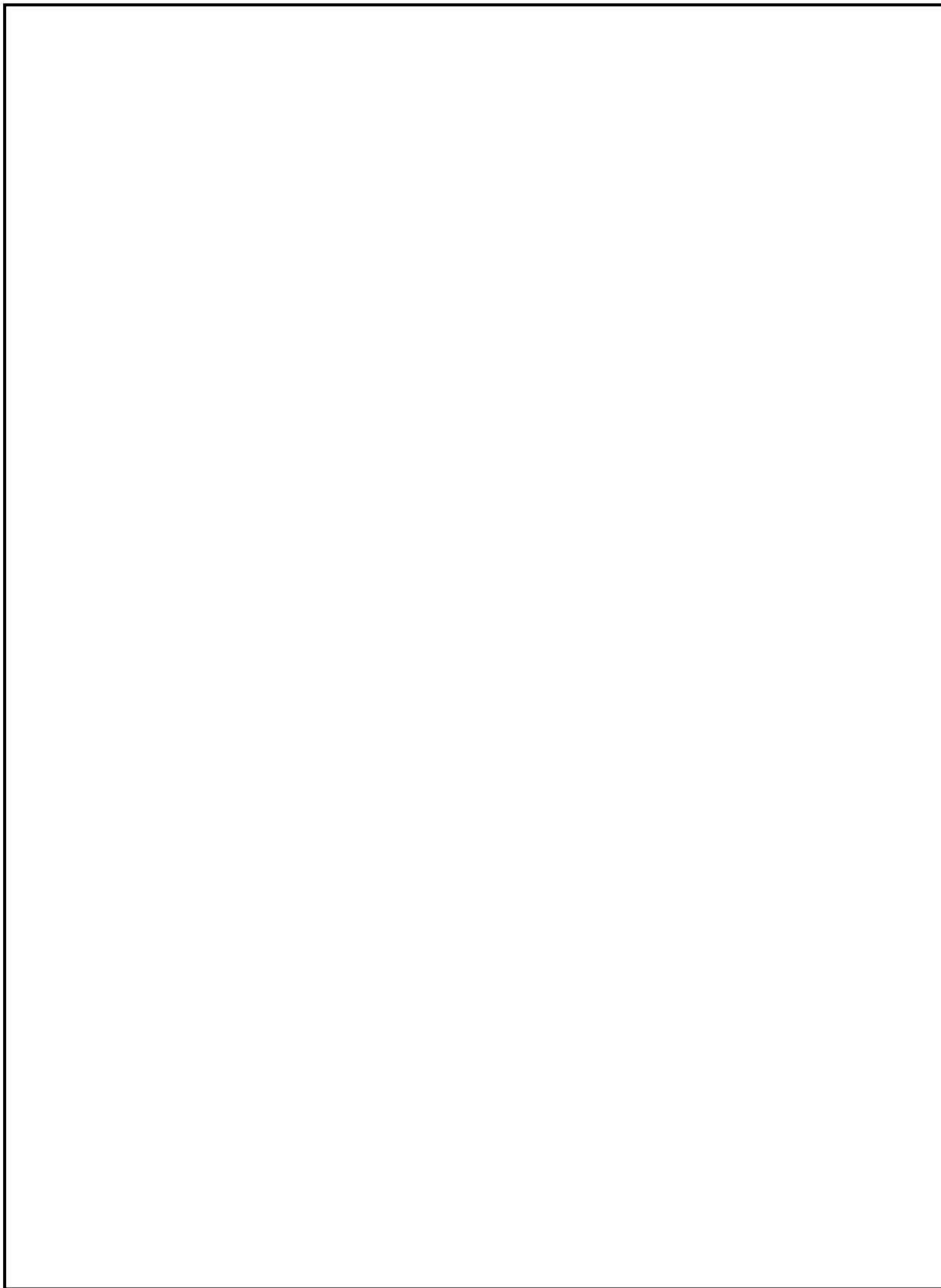


図 4-15 ドーム部ヘリウム濃度 (Test M-4-3)

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. 構造材凝縮熱伝達モデルの感度検討

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□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4.3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□を乗じる）を、図4-17～図4-19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。

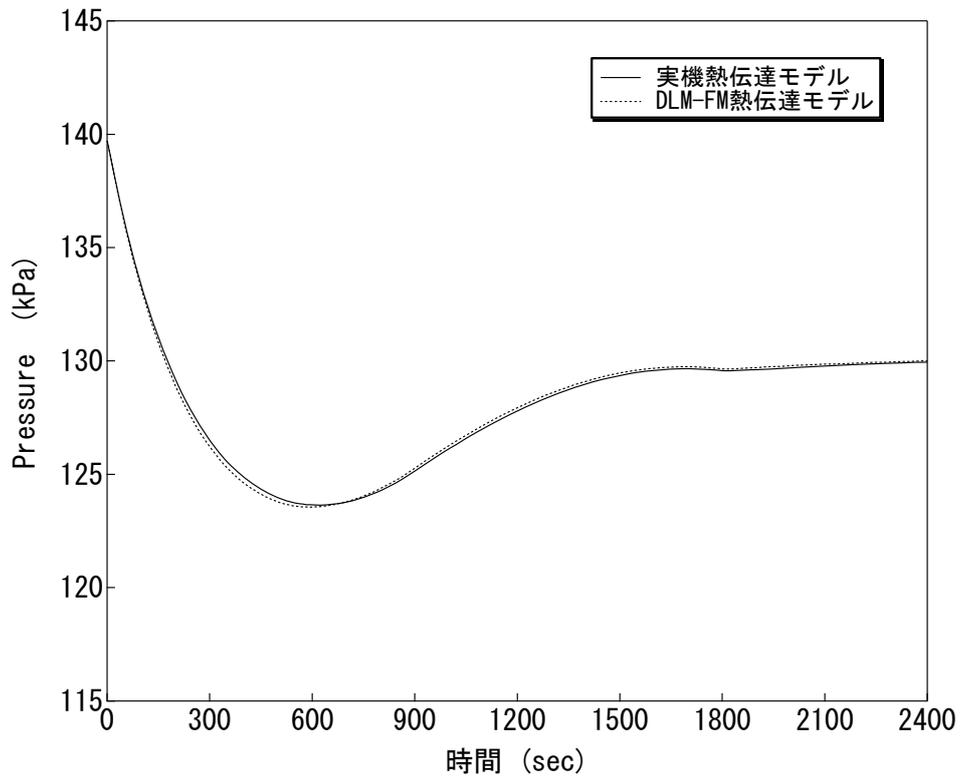


図 4-17 格納容器圧力 (Test M-7-1、構造材熱伝達モデル感度ケース)

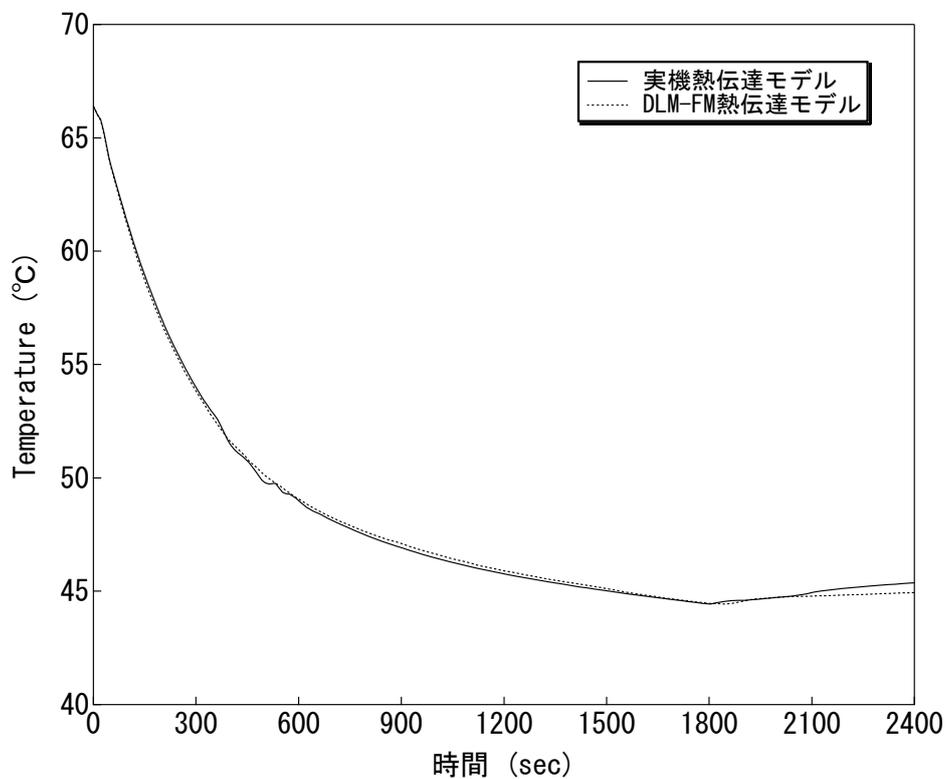


図 4-18 ドーム部雰囲気温度 (Test M-7-1、構造材熱伝達モデル感度ケース)

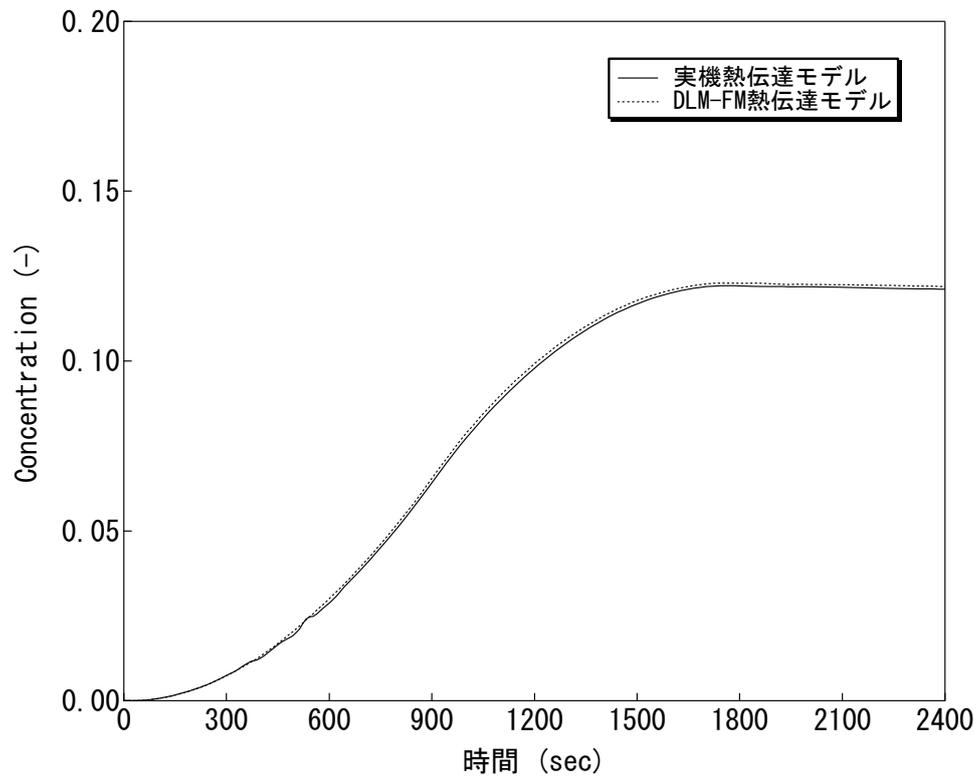


図 4-19 ドーム部ヘリウム濃度 (Test M-7-1、構造材熱伝達モデル感度ケース)

4.3. 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 6）と内田（参考文献 7）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。スプレイ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イ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 4-20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イ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 G O T H I C 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 4-21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、N U P E C 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、同試験ではスプレイ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。

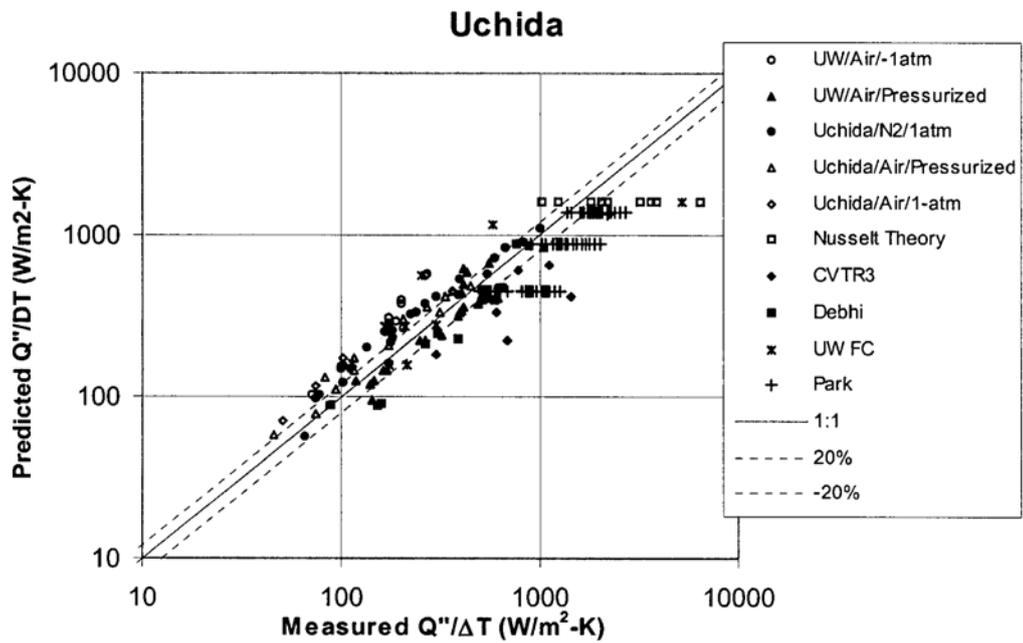


図 4-20 内田凝縮相関式の実験予測特性

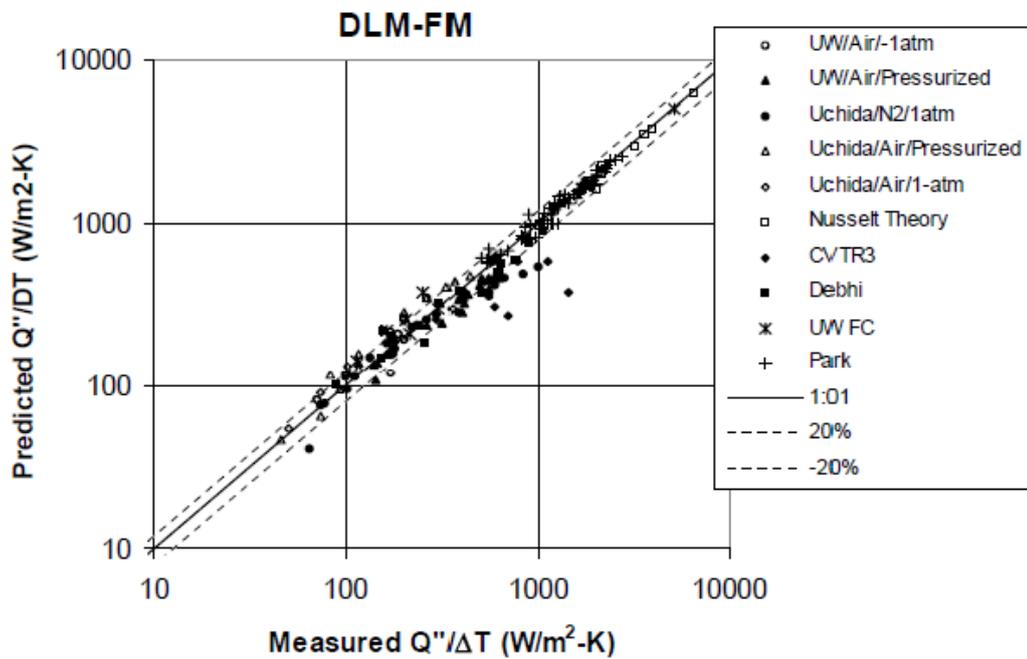


図 4-21 DLM-FM の実験予測特性

4.4. 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9）。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4-22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

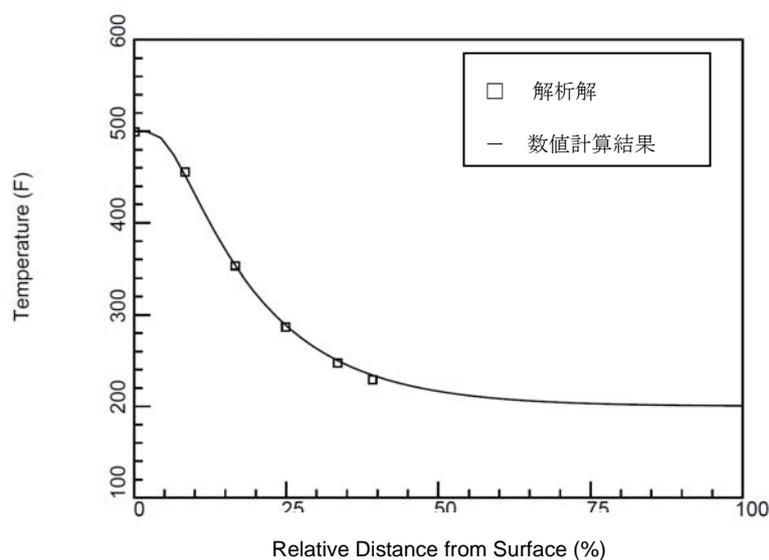


図 4-22 1次元熱伝導モデルと解析解の比較

4.5. PAR 特性検証

水素処理設備となる静的触媒式水素再結合装置 (PAR) 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 GOTHIC 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。

PAR 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 GOTHIC 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、GOTHIC 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 4-23 及び図 4-24 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、GOTHIC 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る。

以上より、PAR の水素処理に関する特性式は GOTHIC コードに適切に組み込まれていることが検証された。

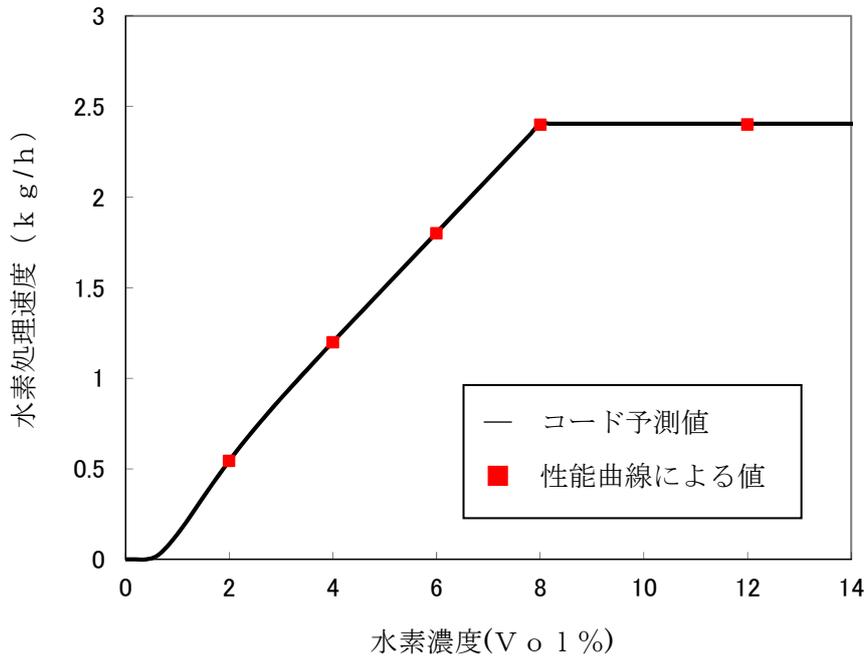


図 4-23 1.5bar における P A R 性能曲線組み込み結果

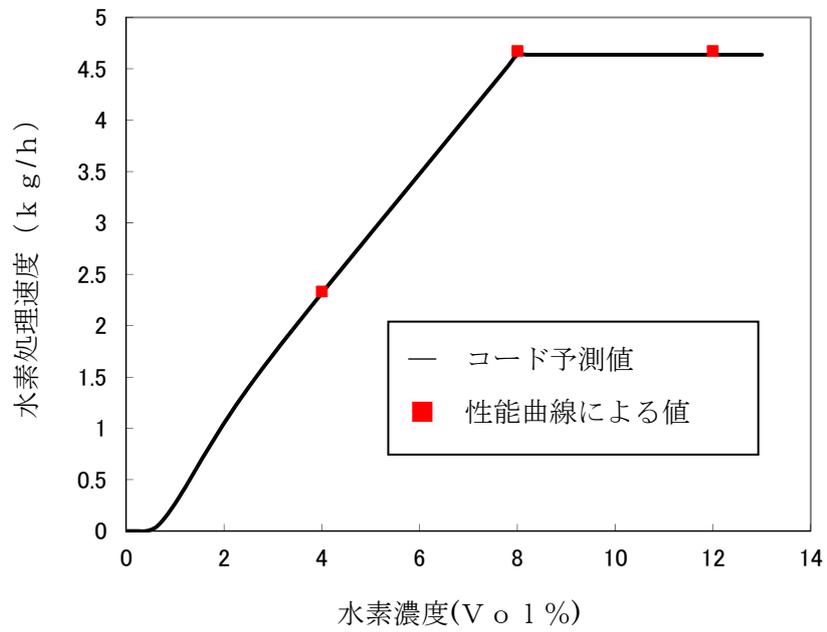


図 4-24 4.0bar における P A R 性能曲線組み込み結果

4.6. 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。

4.6.1. 区画内・区画間の流動

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。同試験では、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を模擬しており、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、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 4-3及び表 4-4に示し、実機3ループプラントの解析を例にして、NUPEC解析でのノーディングについて以下に比較する。

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。実機プラントの解析では、格納容器ドームは、により一つのボリュームを分割している（図 3-6及び図 3-7を参照）。水平方向のノード分割は、実験解析と実機プラント解析では同じノーディングとなる。一方、軸方向については、実験での計測点位置をより正確に模擬するため実験解析でより詳細な分割を採用している。しかし、NUPEC試験及び同試験を対象にしたGOTHICコードの解析結果から示されるように、格納容器ドーム部のヘリウム濃度は、スプレイ効果もあり、均一に混合することが確認されている。また、スプレイ終了以降においても、濃度の分布が増大することは見られない。このため、ドーム部の軸方向の分割精度が解析結果に与える影響は軽微であり、想定される事故シーケンスにおけるドーム部の分割は妥当であることが判断できる。

以上、GOTHICコードは、後述される構造材熱伝達、スプレイ冷却の個別モデルと相まって、実機プラントのスケール設備であるNUPEC試験において格納容器内の区画間・区画内の流動、また、ドーム部のヘリウム濃度を適切に模擬している。また、実機プラントとNUPEC試験解析では同等のノーディングスキームを採用しており、NUPEC実験解析で得られたコード検証結果は実機プラント解析にも適用できると判断される。

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。また、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 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。

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 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 4-4 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。

4.6.2. 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4.2.4章で確認したが、その影響は小さい。また、添付 3 に、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。

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。

(2) 構造材の内部熱伝導

理論解との比較によりGOTHICコードの構造物内の熱伝導を精度よく解くことが検証された。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。

4.6.3. 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。

4.6.4. 水素処理

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。PARについては製造元により整備された評価モデルが組み込まれ、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、設備の特性が適切に模擬され、また、その効果を考える区画もしくはノードが実プラントでの設備配置を適切に考慮すれば、実機プラントの水素濃度評価は適切に行える。

4.6.5. 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4-5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 4-5 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	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%）

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）

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。

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。これを包絡的と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。

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。

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可能性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%）	なし

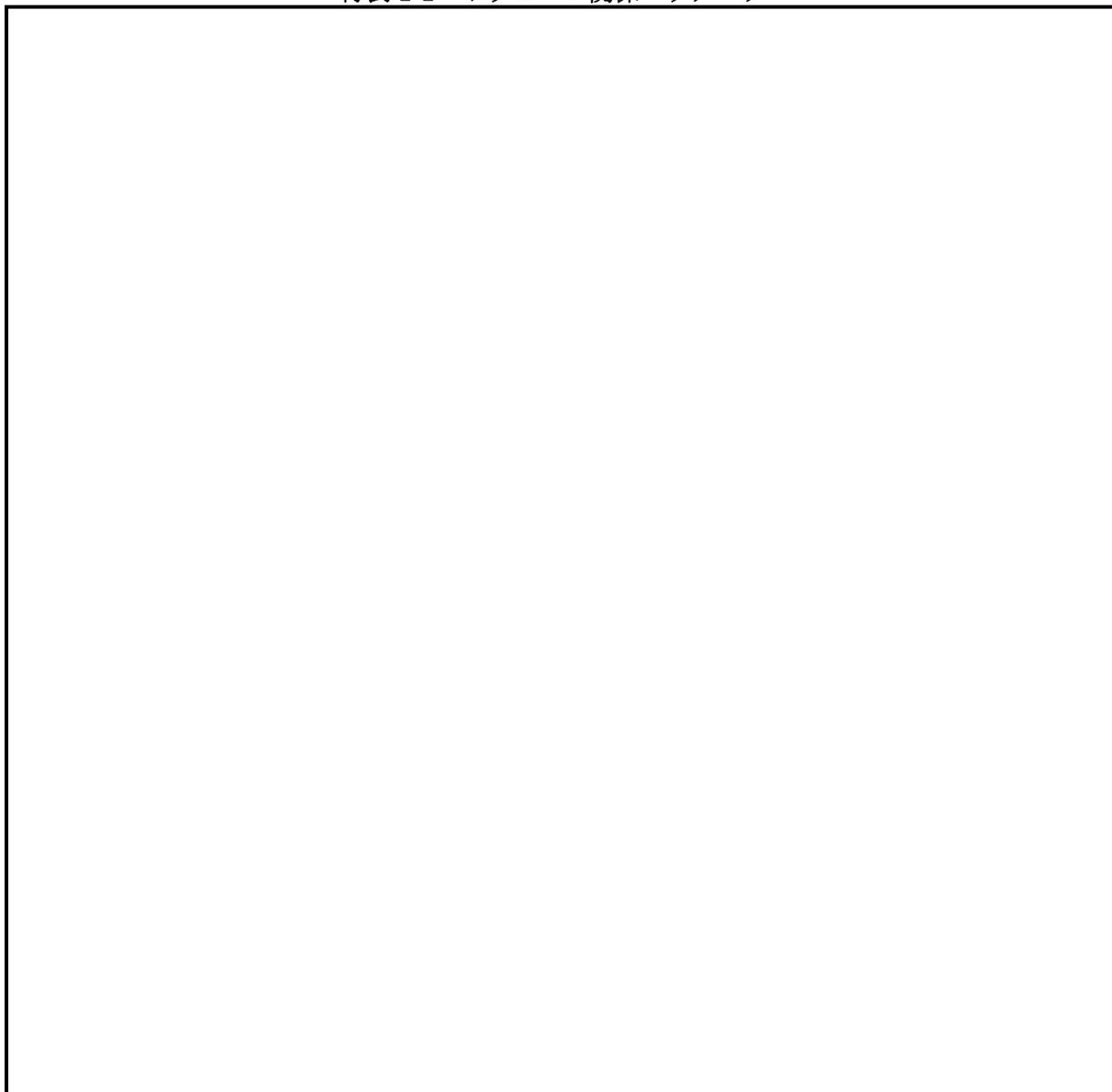
6. 参考文献

- [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] 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
- [4] 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.
- [5] NUPEC, “NUPEC Hydrogen Mixing and Distribution Test (Test M-7-1)”, NEA/CSNI/R(94)29, December, 1994.
- [6] Gido, R.G., and A. Koestel, Containment Condensing Heat Transfer, Second International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Santa Barbara, CA, January, 1983.
- [7] 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.
- [8] (Non-published) GOTHIC Action Report I.D. 7.1-100, Numerical Applications Inc.
- [9] Electric Power Research Institute, “GOTHIC CONTAINMENT ANALYSIS PACKAGE QUALIFICATION REPORT Version 7.2a(QA)”, EPRI Product 1013072, NAI8907-09 Rev9, January 2006.

添付1 入力パラメータ

GOTHICコードの入力パラメータにつき、有効性評価で使用するものを以下に説明する。

付表 1-1 ボリューム関係パラメータ



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。

付表 1-2 パス関係パラメータ

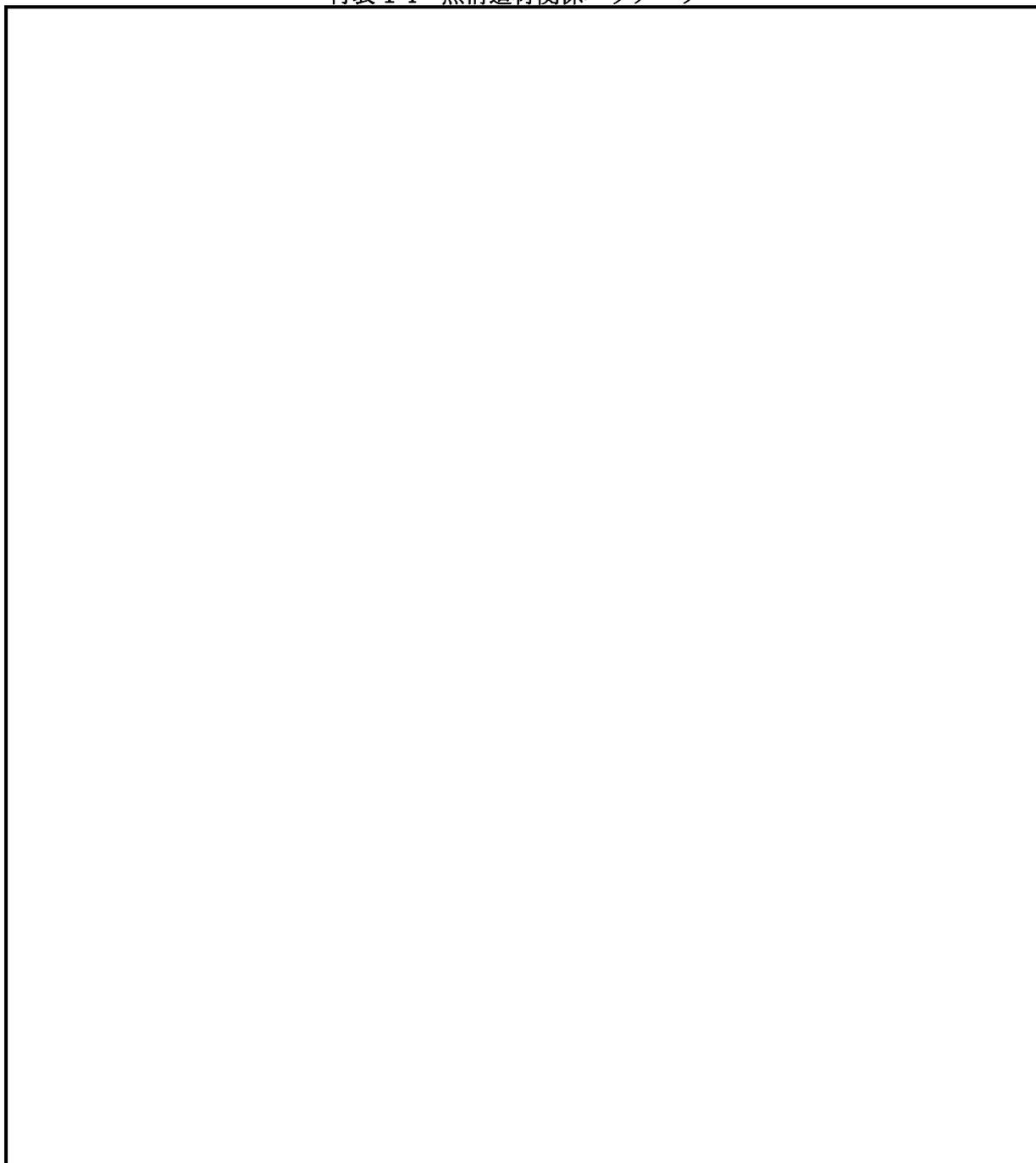
--

付表 1-3 境界条件関係パラメータ

--

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。

付表 1-4 熱構造材関係パラメータ



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。

付表 1-5 設備関係パラメータ



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 イグナイタ及び燃焼モデル

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℃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℃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コードに組み込まれるイグナイタモデルは、コード開発元となるEPR Iにより水素燃焼に関して熱バランスを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。

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、パスを経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。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で生じるとするものである。

付図 2-1 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、火炎速度については、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。

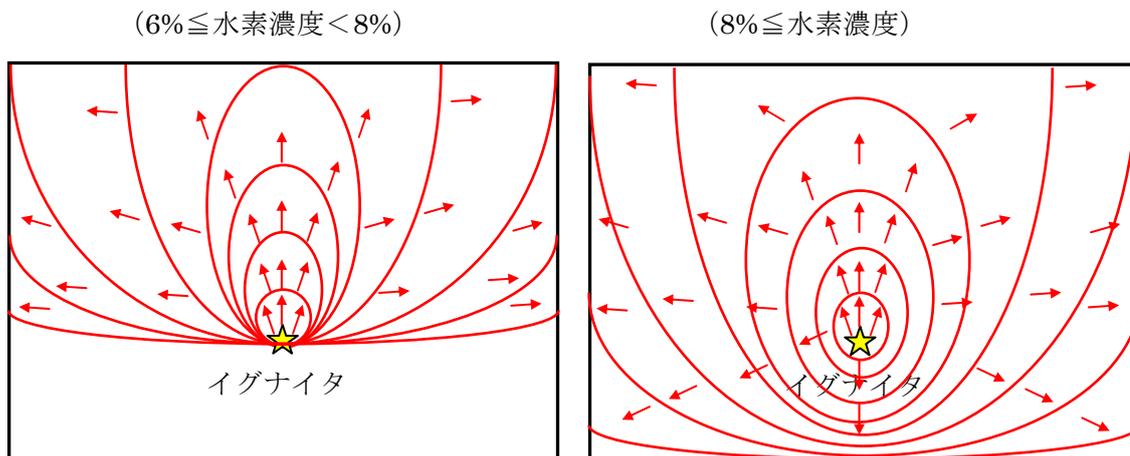
GOTHICコードに組み込まれるイグナイタモデルは、コード開発元となるEPR Iにより水素燃焼に関して熱バランス考慮することで得られる解析解と比較することで検証されている。

水素燃焼による格納容器内の圧力・温度上昇については、断熱等積完全燃焼（A I C C ; Adiabatic Isochoric Complete Combustion）モデルにより評価する。これは、手計算により行う。評価の概要及び手順を示す。

全炉心内 Zr 量の75%が水と反応して水素が発生し、これが全て燃焼に寄与することを想定した場合の格納容器圧力バウンダリにかかる圧力を評価する。

評価は、75%Zr-水反応相当の水素量（付図 2-2 の①）、水素燃焼前の格納容器内の酸素量及び窒素量（同じく②）から、火炎の下方伝播により格納容器全体燃焼が生じるウェット水素濃度8%の条件下での水蒸気量（同じく③）を設定して格納容器内の圧力を算出した後

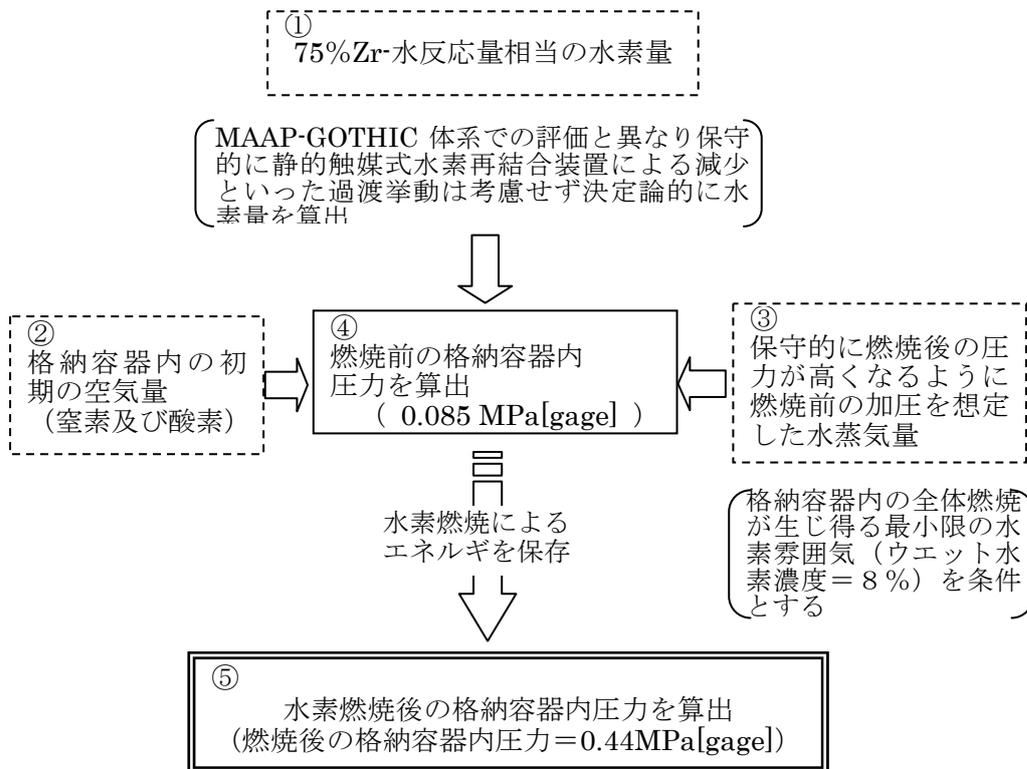
(同じく④)、酸水素反応等を考慮したうえで、水素燃焼前後のエネルギー保存の関係から水素燃焼後の格納容器内の圧力を算出する (同じく⑤)。



【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

付図 2-1 イグナイタによる水素燃焼挙動



$$P_{cv}' = P_{cv} \frac{n' T_{cv}'}{n T_{cv}} = P_{cv} \frac{T_{cv}' \sum_{i=N,O,S} \frac{m_i'}{M_i}}{T_{cv} \sum_{i=N,O,H,S} \frac{m_i}{M_i}}$$

(「'」は燃焼後の状態を表す。)

付図 2-2 水素燃焼後の格納容器内圧力の評価の流れ

添付 3 実機プラント感度解析

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 L O C A + E C C S 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。

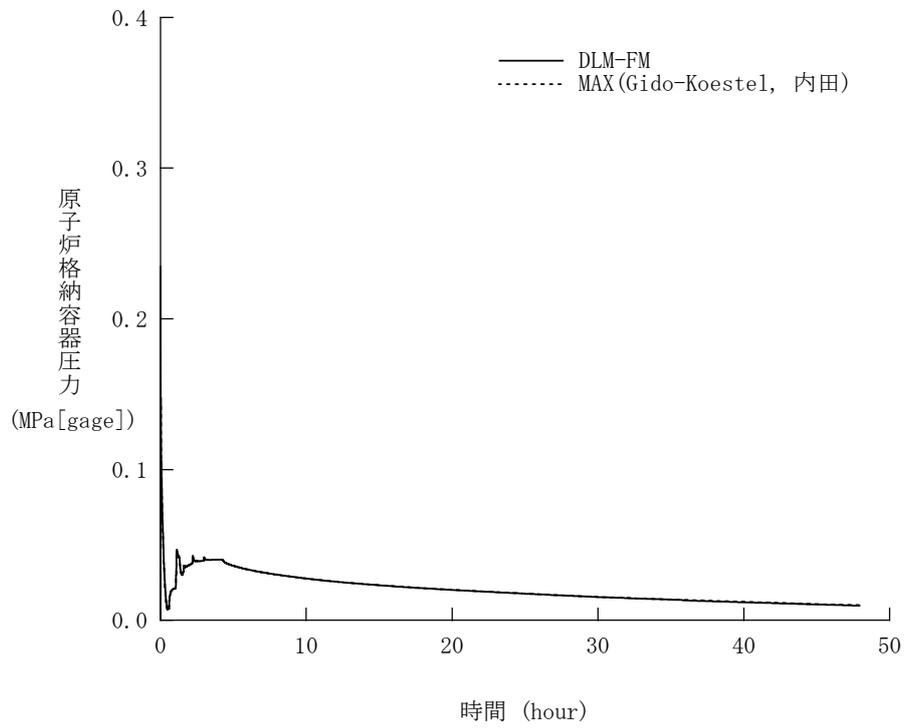
付図 3-1 及び付図 3-2 に格納容器ドーム部の圧力及び雰囲気温度について、ベースケースと感度ケースの比較を示す。同様に付図 3-3 及び付図 3-4 に格納容器平均のドライ換算及びウェット換算の水素濃度を示す。

付図 3-1 及び付図 3-2 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 S A 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。

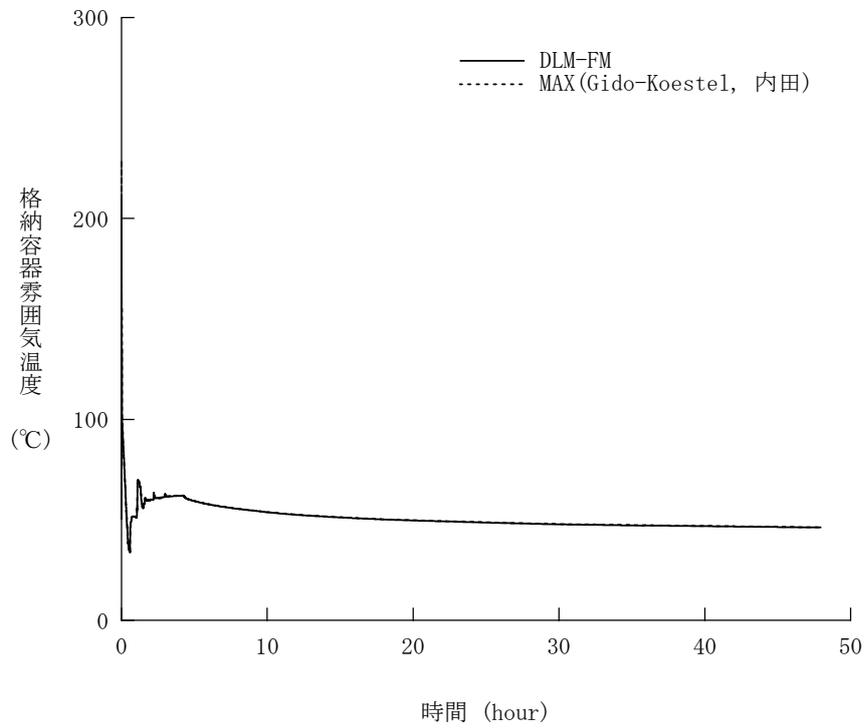
上記のように長時間に渡る事故シーケンスの評価では、格納容器の構造材と雰囲気温度が熱平衡状態に漸近し、温度差がつきにくくなることから、熱伝達モデルの差異が現れにくい。しかし、原子炉 1 次系からの蒸気放出が著しく増加する、また、スプレイ停止が生じた場合の直後等、構造材と雰囲気が熱的に非平衡な状態に遷移する一時的な期間、熱伝達モデルの差異が現れてくる。特に、実機プラント解析に適用する凝縮熱伝達を大きく評価するモデルでは、蒸気凝縮が進み、ウェット換算の水素濃度が大きく評価される傾向になる。

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。

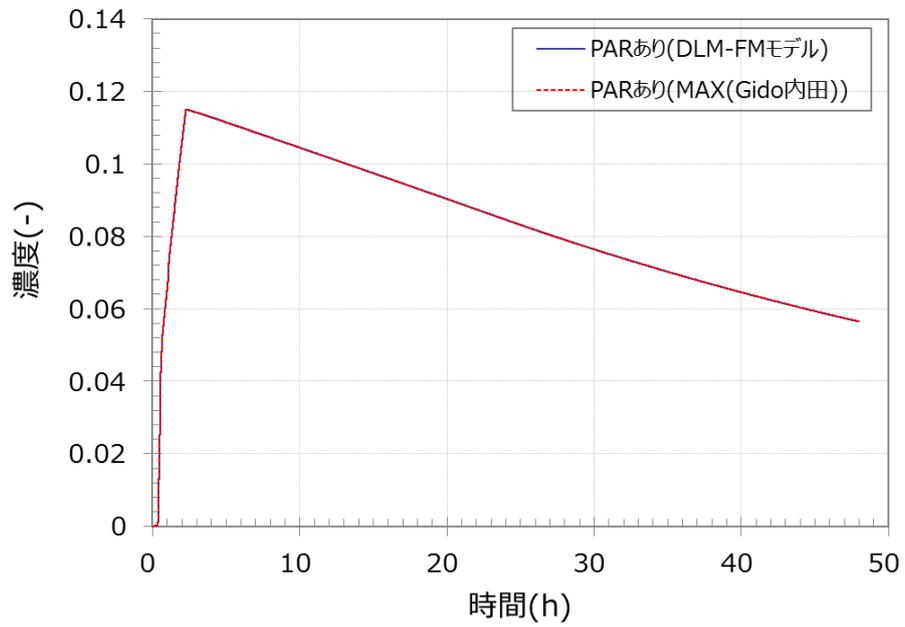
枠囲いの内容は、商業機密に属しますので公開できません。



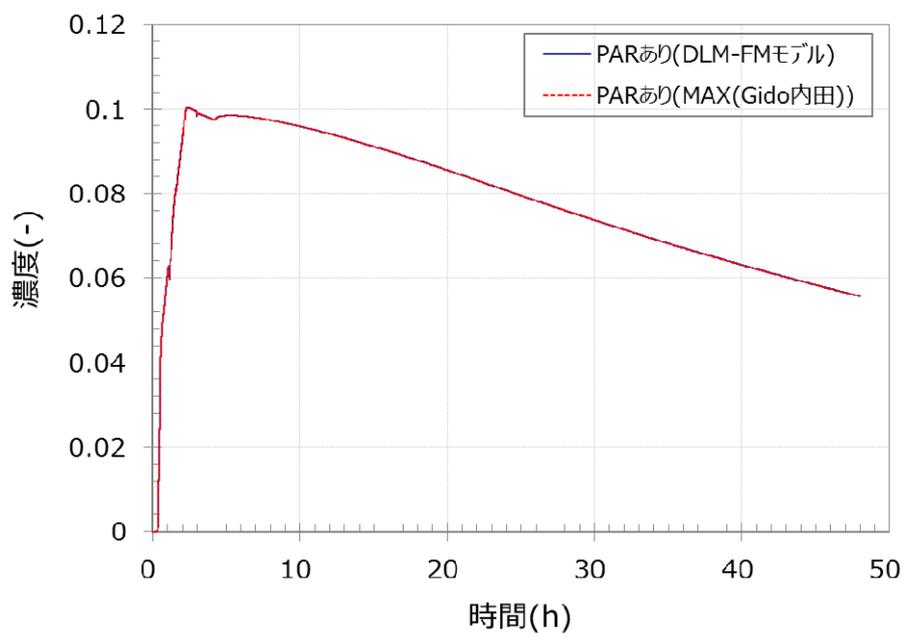
付図 3-1 構造材凝縮熱伝達モデル感度 (格納容器圧力)



付図 3-2 構造材凝縮熱伝達モデル感度 (格納容器雰囲気温度)



付図 3-3 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）



付図 3-4 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）

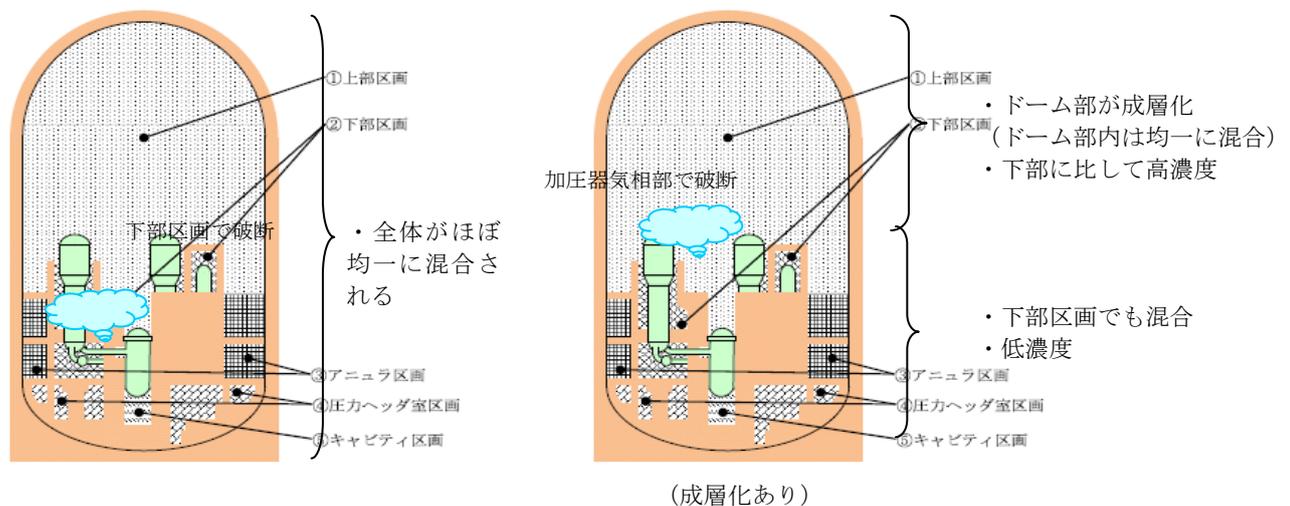
添付 4 水素分布挙動に関する整理

重大事故時に発生する水素の混合挙動については、PWR プラントの構造上、格納容器内の循環流によって濃度が均一化すると考えられているが、水素は分子量も小さいことから循環流がない場合は格納容器ドーム部の上層部で局所的に高濃度の領域が生じることが考えられる。NUPECの可燃性ガス濃度分布・混合挙動試験では、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特殊なケースで試験が行われた (Test M-8-1)。その結果、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とその他の区画に濃度差が生じるという濃度成層化現象が起こった。一方、ドーム部内においては均一に混合した (付図 4-1 参照)。

このような上下区画間の有意な水素濃度差の発生が実機プラントでも生じ得るか検討を行った。検討の結果、格納容器スプレイが機能喪失した場合でも、混合促進に寄与する対策として①代替スプレイや②自然対流冷却を整備しており、濃度差が生じる可能性は十分低い。更に、③静的触媒式水素再結合装置 (PAR) 発熱による流体の上昇流、④溶融炉心の下部キャビティ落下後の発生蒸気による上昇流、さらに⑤蒸気発生器からの放熱等による上昇流により格納容器全体での大きな循環流が形成されることにより、NUPEC試験で観測された有意な区画間の水素濃度差が起こることはないと考ええる。

付表 4-1 水素濃度の成層化及び区画間分布に対する混合の効果

混合の要素	効果	備考
①スプレイ	スプレイあるいは自然対流冷却の単独で格納容器全体が混合	NUPEC 報告、有効性評価
②自然対流冷却		
③PAR	混合に寄与	
④蒸気流	破断口からの蒸気流もしくは原子炉キャビティにおけるデブリによる沸騰による蒸気流によって格納容器全体が混合	NUPEC 報告
⑤SG からの放熱等	混合に寄与	



付図 4-1 格納容器内の水素濃度の成層化

付 4-1 NUPEC 試験で得られた知見の概要

財団法人原子力発電技術機構(NUPEC)において可燃性ガス濃度分布・混合挙動試験が行われ、格納容器内での混合挙動に関する試験結果が報告されている。M-8-1 試験は、加圧器室上部破断を想定し、ヘリウム(水素の代替として使用)ガス・水蒸気の放出を模擬、格納容器スプレイ不作動の試験であり、ドーム部と、ループ室・一般部の間に生じた温度差によりドーム部と、ループ室・一般部で対流が生じず、ドーム部で熱成層が生じた結果、ドーム部の濃度が高くなったとされている。しかし、この成層化は、格納容器内壁が過熱されたことによってドーム部と、ループ室・一般部の間に発生した温度差に起因したものとされている。また、ドーム部内では高さ方向で均一に混合し、その他の区画はドーム部より低濃度を維持している。

一方、M-8-1 試験と同様の試験条件においてスプレイを作動させた場合(M-8-2 試験)や破断箇所としてループ室や一般部下部を想定した試験では、格納容器全体として良好な対流が発生し、成層化は認められていない。各試験条件を付表 4-2 に整理する。

付 4-2 実機での成層化に係る考察

NUPEC 試験体系と実機の比較を付表 4-3 に示す。NUPEC 試験 M-8-1 では上下区画間の水素濃度差が生じたが、NUPEC による報告書では、蒸気によりドームの上部壁が過熱され下部との温度差が発生し、対流効果が期待出来なくなったと考察している。すなわち、M-8-1 で濃度差が生じた原因は、当該試験装置では実機において混合にも寄与する主要なヒートシンクを模擬しておらず、また、外気の影響を受けない断熱された熱成層が生じやすい体系であったことが考えられる。実機の格納容器の構造としては熱容量が大きいため、加圧器室上部からの蒸気の放出や外気への放熱によってもドーム部のみでの温度の上昇は想定されず、また、ドーム部と、ループ室・一般部との温度勾配が小さい場合には混合気体の浮力が減少し、ドーム部で成層化が生じる可能性は低い。

このため、仮にNUPEC 試験のような濃度差が生じたとしてもその程度は小さく、ドーム部の水素濃度は低く維持される。更に、格納容器スプレイが不作動の場合においても、恒設代替低圧注入ポンプによる代替スプレイあるいは再循環ユニットによる自然対流冷却による循環流によって格納容器全体での混合に寄与することとなる。

また、NUPEC 報告書においても実炉のアクシデントマネージメント対策への提言として、以下の趣旨での整理もされており、これは上述の考察の結果とも一致している。

- ・水素混合挙動が問題となるシビアアクシデント時には水素とともに大量の水蒸気が放出され、格納容器内は自然循環による対流が促進されるため水素が均一に混合。
- ・格納容器スプレイや再循環ファン投入はより混合を促進。

- ・加圧器上部の破断を想定した場合、水素・水蒸気の混合ガスが成層化する可能性はあるが、大量の水蒸気の存在により爆轟等による格納容器への脅威とはならない。
- ・水素放出後の長期的な安全確保のため格納容器スプレイ、再循環ファンによる混合、間欠スプレイ等が有効。

付表 4-2 NUP E C 試験条件比較

試験条件	NO	試験条件									成層化	
		CV 初期温度 ℃	He 放出		水蒸気放出			スプレイ水				He、水蒸気放出位置
			流量 kg/s	時間 min	流量 kg/s	時間 min	He、水蒸気 温度(℃)	温度 ℃	流量 kg/s	時間 min		
放出水蒸気による 濃度分布・混合試験	M-4-3	RT	0.027	30	0.04	30	68	—	—	—	S G 基礎部	なし
スプレイによる He 濃度分布・混合 試験	M-7-1	RT	0.0 ↓ 0.03 ↓ 0.0	0 ↓ 15 ↓ 30	0.08 ↓ 0.03	0 ↓ 30	115	40	19.4 ↓ 19.4 (70m ³ /h)	0 ↓ 30	S G 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 ↓ 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

付表 4-3 NUPEC 試験体系と実機体系の比較

	NUPEC 試験	代表 3 ループプラント	備考
使用ガス	ヘリウム	水素	
格納容器体積	約 1600m ³	約 67400m ³	
内径	約 10m	約 40m	
ヒートシンク	格納容器(鋼製) 鋼製隔壁	格納容器(鋼製) 外部遮蔽建屋(鉄筋コン クリート製) 隔壁・ループ基礎部(鉄筋 コンクリート製) 燃料取替キャビティ(鉄 筋コンクリート製) アニュラ(鉄筋コンク リート製)	格納容器の熱容量は、 実機の方が試験よりも 大きく、格納容器内の 温度差に伴う成層化の 形成は緩和される。
格納容器の外気断 熱性	有り(硬質ウレタン)	なし	実機では試験に対して 外気への放熱があるた め、格納容器内の温度 差は付き難く、格納容 器内の温度差に伴う成 層化の形成は緩和され る。
スプレイ	18m ³ /h、70m ³ /h	約 940m ³ /h (2 台の場合) (NUPEC 試験体系の 大きさでは約 60m ³ /h に 相当) (恒設代替低圧注水ポン プによるスプレイの場合 140 m ³ /h)	実機でのスプレイによ る混合促進効果は大き いため、温度差が解消 されることから成層化 の形成は緩和される。