

原子炉格納容器内の水素濃度分布及び 燃焼解析法の開発と検証

Development and Validation of Analytical Approach of Hydrogen Mixing,
Distribution and Combustion in Nuclear Reactor Containment

技術本部 緒方潤司*¹ 藤本哲郎*²
万代重実*³ 鷗飼修*⁴

原子炉格納容器の健全性評価の一つのアイテムとして、水素発生時の格納容器内の局所的な濃度分布や燃焼による圧力上昇などを評価する手法の確立が必要となっている。当社では、水素を含む多成分ガスの過渡的な熱流動や拡散及び燃焼を解析し、水蒸気の影響や格納容器スプレーなどの安全システムの影響も評価できる解析コード MAPHY-BURN を開発した。さらに、このコードを使用して、(財)原子力発電技術機構の委託により実施した大規模かつ多区画の模擬格納容器内の水素混合実験や燃焼実験など、幾つかの内外の実験の解析を行い、コードの妥当性を確認し、かつ実機の安全性評価コードとしての信頼性を高めることができた。

It is one of the key issues for nuclear safety to evaluate hydrogen behavior in nuclear plants. A transient lumped-parameter code named MAPHY-BURN has been developed in order to evaluate not only hydrogen mixing and distribution, but also combustion in a containment vessel under the condition of steam blowdown and containment spray actuation. Several large-scale hydrogen mixing and distribution tests and combustion tests with multi-compartments such as NUPEC tests have been analyzed. The MAPHY-BURN analyses were in good agreement with these test results, which shows that MAPHY-BURN has a high reliability for safety analyses of hydrogen problems in nuclear plants.

1. はじめに

原子力の安全設計では、多重防護 (Defence in depth) という設計理念の下に幾層にもわたっている安全システムを設けており、原子炉は放射能の最終的障壁である原子炉格納容器 (CV) 内に設置されている。CV は、原子炉事故時の温度・圧力の上昇に耐えるよう設計されているが、設計を超えたシビアアクシデントに対しても設計裕度で対応できることを確認することが望まれている。ここではシビアアクシデントの一つである設計想定外事象時に発生する水素の格納容器内での燃焼に対し、その混合及び燃焼挙動を模擬する MAPHY-BURN コードの開発及び検証について述べる。

2. MAPHY-BURN コードについて

CV 内は多区画に分かれており、各区画は幾つかの流路で連結されているが、水の放射線分解や冷却材喪失事故 (LOCA) 後に発生する水素が CV 内に蓄積すると、水素濃度分布に偏りが生じる可能性があり、燃焼のおそれもある。燃焼が起これば高い圧力が発生することが懸念される。したがって、CV 内の水素の挙動を把握することは安全評価上重要である。このため、世界各国で様々な大規模実験が行われ、また解析評価コードも開発されてこれらの実験データにより検証されてきたが、まだ十分とは言えず安全評価に関する水素関連の検討課題の一つとして残されている。このような状況の下で当社では、MAPHY-BURN コードを開発し、実験により検証して多区画内の水素濃度分布、及び燃焼による圧力上昇などを解析できるようにした。

2.1 解析コード概要

MAPHY-BURN コードは、混合解析ルーチン MAPHY (Mixing Analysis Program of Hydrogen) と、燃焼解析ルーチン

ン BURN (Burning Analysis Program of Hydrogen) とから構成されている。このコードでは、水素の発生量や位置などを入力することにより、格納容器内の水素の濃度及び温度分布を求めるとともに、発火源を与えることにより燃焼が可能か否かを判定し、燃焼が生じた場合の発熱、それに伴う圧力上昇や温度上昇を中心とする燃焼挙動を現象に忠実に計算する。また、水蒸気や格納容器スプレーなどの燃焼挙動への影響も評価することができる。

2.2 計算コードの機能

2.2.1 混合モデル⁽¹⁾

多区画に分かれた CV 内の全体的な熱流動を解析するために、集中定数系に基づいた手法を採用した。本コードでは、以下の熱流動について評価する。

- (1) CV 内の区画間の全圧差に基づく気相の流れ
- (2) 区画間の成分気体 (水素、酸素、窒素、水蒸気等) の分圧差による拡散
- (3) CV 構造物の熱容量による熱吸収
- (4) CV 外への放熱を考慮した各区画の濃度、温度、及び圧力の評価

以下に解析における仮定を示す。

- (1) CV の区画はノードパスモデルとする。
- (2) 水素、酸素、窒素、水蒸気等の気体は、各区画内で一様に混合しているものとする。
- (3) 気液混在している場合は、液相中への気相の溶解に対してヘンリーの法則が成立つとする。
- (4) 液の流動は取扱わない。

これらの仮定に基づき、各区画の濃度、温度、圧力などを求めるため運動量方程式、各気相成分ごとに拡散方程式、各気相成分及び液相について質量保存式、さらにエネルギー方程式を解いている。

*1 高砂研究所燃焼・伝熱研究室主務 工博 *3 高砂研究所燃焼・伝熱研究室主査
*2 高砂研究所燃焼・伝熱研究室長 *4 基盤技術研究所基礎工学研究室主務

表1 MAPHY-BURNの燃焼モデル
Combustion model of MAPHY-BURN

項目	基本的考え方	基準値
可燃限界 (水素濃度)	低濃度側の値を採用	・上方伝ば $H_2 \geq 4.0\%$ ・水平伝ば $H_2 \geq 6.0\%$ ・下方伝ば $H_2 \geq 8.0\%$
可燃限界 (酸素濃度)		・酸素濃度 $O_2 \geq 5.0\%$ ・不活性成分濃度 $H_2O + CO_2 \geq 55\%$
発火条件	発火対象コンパートメントに発火温度以上の機器、スパーク発生の可能性で判断	自己発火温度 550℃
燃焼速度	層流燃焼速度を基準火炎面の揺らぎ、拡大による発熱率を Flame shape factor で補正、又は Williams の式による。	・(実燃焼速度) = 層流燃焼速度 × (Flame shape factor)
火炎速度	燃焼速度に体積膨張の影響を加味したものが、火炎速度となる。これに、上方、下方については浮力速度を実験データから増減する。	・火炎速度 = 層流燃焼速度 × ρ_u / ρ_b ・上下火炎伝ば速度 = 火炎速度 ± 浮力速度
火炎位置	火炎速度と時間を乗じたものを積分して求める。	火炎位置 = \sum 火炎速度 × 時間
燃焼時間	区画長を火炎速度で割る。	燃焼完結時間 = 区画長 / 火炎速度
燃焼効率	燃焼領域の全容積に占める比率 $H_2 = 6 \sim 8\%$ は成層比、 $H_2 = 4 \sim 6\%$ は火炎伝がり角度を設定。	・ $H_2 \geq 8\%$ では燃焼効率 100% ・ $H_2 < 8\%$ のとき、燃焼効率を考慮する。
化学反応	燃焼によるモル数変化を考慮する。	$2 H_2O + 1.20 \times 10^5 \text{ kJ/kg} H_2$
火炎温度	エネルギーバランスから計算する。	$[(\sum M_i c_p) T_i + Q] / \sum M_b c_p$
その他	燃焼量は、区画内初期混合気量 - 燃焼完結までの隣接区画への流出混合気量	(記号) c_p : 比熱 (J/kgK), M : 質量 (kg) Q : 熱量 (J/s), T : 温度 (℃) (添字) b: 既燃ガス, i: ガス成分 u: 未燃ガス

2.2.2 燃焼モデル

以上の混合解析で得られた圧力、濃度及び温度分布を初期条件として、燃焼が可能か否かを判定して、燃焼が可能となった場合に燃焼計算を開始する。表1に、MAPHY-BURNの燃焼モデルを示す。

燃焼に伴う化学反応モデルには、総括反応モデルを採用した。

可燃限界の水素濃度として、火炎の伝ば方向により3通りに分けている。また、酸素濃度の可燃限界値として5%を採用し、さらに水蒸気や二酸化炭素の濃度も考慮している。火炎の伝ばは水素の自己発火温度で判断し、それ以上になれば燃焼が伝ばするとした。燃焼速度は、層流燃焼速度に火炎面の揺らぎや拡大を考慮した Flame shape factor と呼ばれる補正係数を乗じている。この層流燃焼速度は米国 NRC で開発された MAAP コードのものを使用し、また Flame shape factor はサンディア国立研究所の VGES 実験⁽²⁾で得られた値を使用している。乱流燃焼速度については、Williams の式を使っている。

このコードにより評価する項目として、①可燃性気体と不燃性気体の各濃度、容器内の区画間の接続部の位置、及び火炎伝ば方向を考慮した可燃限界、②自己発火等による発火条件、③燃焼速度、④火炎速度、⑤火炎位置、⑥燃焼効率、⑦燃焼による気体の成分、モル数変化、⑧火炎温度、⑨発熱量等を考慮した平均気体圧力上昇、及び温度上昇、などがある。

3. MAPHY-BURN コードの検証結果

3.1 水素混合試験

これまで世界の主要な研究機関で水素混合試験が実施されているが、それらのうち 100 m³ を超える容積の大きな模擬格納容器で行われた試験は五つあり、データを入力できたものについて解析した。以下にそれらのうち二つの試験について概要と検証結果を示す。

3.1.1. 米国: HEDL テスト (EPRI) (1979~1982)

この HEDL テストは、図1(a)に示すようにアイスコンデンサ型の格納容器内の水素混合挙動を調べるために行われた。この実験は、上部区画と下部区画に分かれた容積 750 m³ の模擬 CV 内の濃度分布を調べたもので、上下区画の強制混合装置としてファ

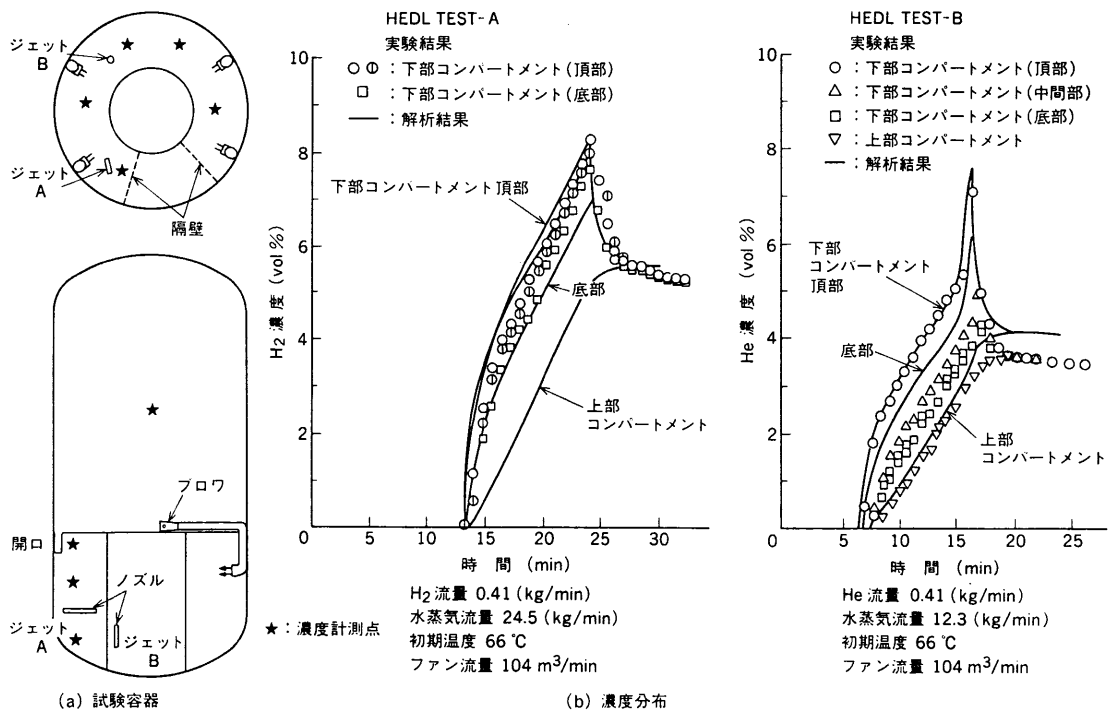


図1 HEDL 混合試験結果と解析結果の比較 試験装置及び濃度分布の実験結果と解析結果を比較した図。
Comparison of concentration between experiment and analysis (HEDL)

ンが設置されている。この試験では、下部区画内に水平方向、及び垂直方向の放出管が設置され、水蒸気及び水素又はヘリウムを放出する場合の周方向と高さ方向の濃度分布の把握に主眼が置かれている⁽³⁾。図1(b)に、OECDの国際標準問題に取上げられた試験条件二つ（水平方向放出試験 TEST-A、及び垂直方向放出試験 TEST-B）について得られた試験結果を示す。

解析に当たっては、容器内部を上部21、下部15の計36区画に分け、各区画ごとに容積、面積、高さ、ヒートシンクの体積や伝熱面積などを算出して入力した。基礎式における係数のうち、流れに影響を与える各区画間の流路の形状損失係数があるが、急拡大、急縮小とみなせる部分は1.5、本来1区画とみなしてもよいが、流れを考慮して複数区画に分割した部分は0.0を与えた。また、ファンの取扱いは境界ノードの取扱いとした。図1(b)には試験結果と比較するために解析結果も示しているが、二つのケースともかなり良く一致していることが分かり、水素の代わりにヘリウムを使用することの妥当性やファンによる強制対流効果などもMAPHY-BURNで良く評価できることが分かった⁽⁴⁾。

3. 1. 2. 日本：NUPEC テスト [(財)原子力発電技術機構] (1986～1994)

この試験は“可燃性ガス濃度分布・混合挙動試験”と呼ばれ、当社が(財)原子力発電技術機構の委託を受けて実施したものであり、図2(a)に示すようにPWRプラントの内部区画を模擬して25区画に分割した1/4スケールモデルの内容積1300m³の模擬格納容器内で、水素の代わりにヘリウムを使用して試験を行った。試験では、空气中にヘリウムを注入した場合の濃度分布から、水蒸気や格納容器スプレーを付加し、その流量や温度を変化させた場合の混合に及ぼす影響などをパラメトリックに調べた。また、容器内の初期温度の影響や、水蒸気やスプレーを複合させた場合

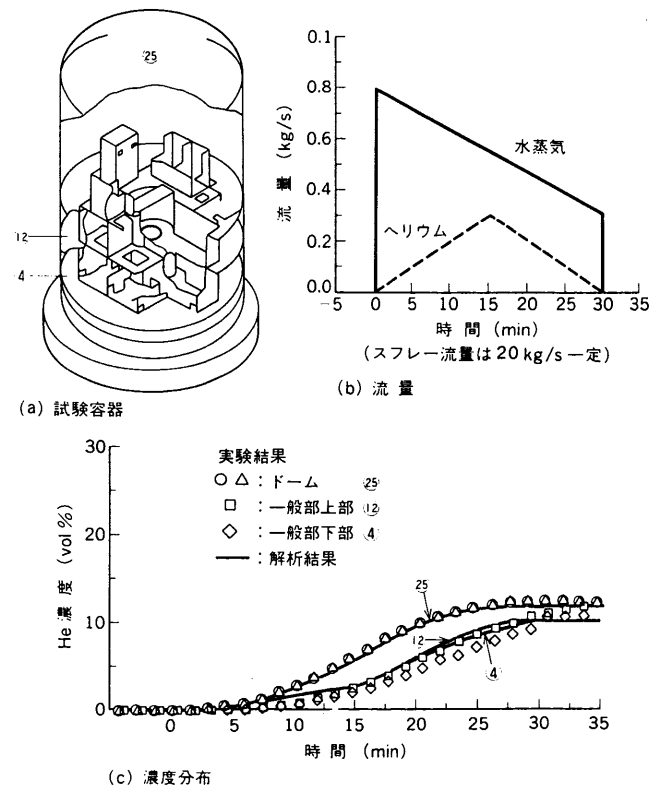


図2 (財)原子力発電技術機構の混合試験結果と解析結果の比較試験装置及び濃度分布の実験結果と解析結果を比較した図。 Comparison of concentration between experiment and analysis (NUPEC)

の影響なども調べ、合計35通りの試験を行った。このうちの1ケースは国際標準問題 (ISP-35) に採用され、10箇国14機関で種々の解析コードの検証が行われた。この試験は、図2(b)に示すようにヘリウム、水蒸気及びスプレーが同時に作動して、かつヘリウム及び水蒸気の流量が時間変化するなど、複雑な実機事象を考慮して実施したものである。試験の結果、図2(c)に示すようにスプレーの強制混合効果により、注入終了後の短時間内に格納容器内の濃度分布はほとんど均一になることが分かった。

この試験の解析に当たっては、容器内部を27の区画に分け、各区画間の流路の形状損失係数は上述と同様とした。また、ドームから落下するスプレーが下部区画に流下する際には、開口面積比で流量を与え底部の区画で外部に流出するとした。さらに、容器壁の断熱材の外表面温度は計測値を与えた。この試験では初期温度を約70℃に設定するために水蒸気による予備加熱を行っているため、すべての区画での物理量の初期値は飽和状態にあるとした。図2(c)には、各区画における試験結果と解析結果との比較も示している。この結果は、ヘリウムの注入開始から終了までの30min間とその後の5min間までの比較を示しているが、一般的に両者は良く一致していることが分かる。この一連の試験においては、パラメトリックに解析を行って両者の比較を行ったが、いずれも解析による結果は試験結果をかなり良く表現できており、この例に示す結果が最も複雑な試験の検証例である⁽⁵⁾。

以上の二つの試験の検証結果に代表されるように、MAPHY-BURNコードは解析対象の試験が大きく異なるにもかかわらず、それらの試験結果をかなり高い精度で評価できることが分かり、実機の複雑な形状の水素混合解析コードとしての信頼性を有することが分かった。

3. 2 水素燃焼試験

水素の燃焼試験については、これまで1区画での試験が多くなされており、混合試験のように多区画での試験は少なかった。以下に、複数区画での試験のうちの2ケースについて、試験概要と解析結果を示す。

3. 2. 1 2区画における燃焼試験⁽⁶⁾

図3(a)は東工大で行われた2区画での水素の小規模燃焼試験で、二つの区画の間はオリフィスで区切られており、下部コンパートメントで点火した場合の両区画での圧力変化が計測されている。試験条件は、初期圧力22kPa、水素濃度30%である。図3(b)に各区画における圧力の試験結果と解析結果の比較を示す。同図より、点火後約10msで着火し、圧力が急激に上昇しピーク圧力に達していることが分かる。また、ピーク圧力は上部のコンパートメントの方が下部コンパートメントより高くなっており、オリフィスによる火炎加速の影響が現れている。

試験では点火後各区画での着火まで約10msの時間遅れがあるのに対して、解析では点火とほぼ同時に着火している点、及びピーク圧力が試験結果よりやや高くなっている点などが異なっているが、上部コンパートメントの圧力が点火区画の下部コンパートメントより高くなっている点や圧力の低下傾向など試験結果と良く合っていることが分かる⁽⁷⁾。

3. 2. 2 (財)原子力発電技術機構における大規模水素燃焼試験⁽⁸⁾

この試験も(財)原子力発電技術機構から当社が委託を受けて実施中のもので“可燃性ガス燃焼挙動試験(大規模)”と呼ばれ、図4(a)に示すようにPWRプラントの内部区画を簡略化して模擬した直径8mの球形の模擬格納容器内で水素を燃焼させ、そ

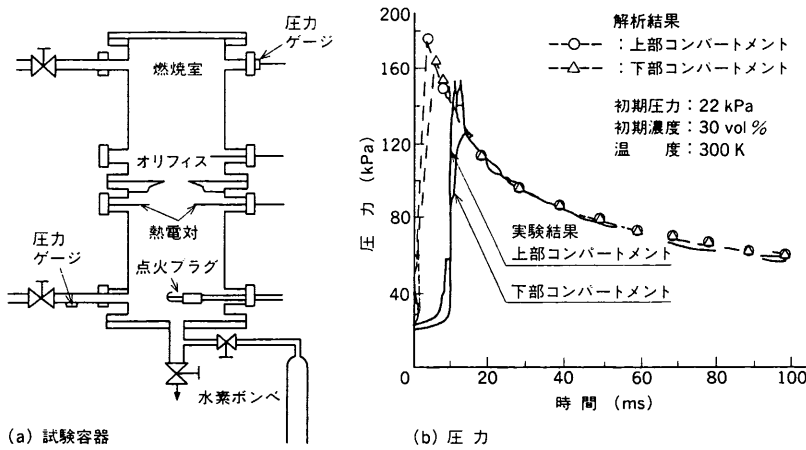


図3 2区画の燃焼試験(東工大)結果と解析結果の比較 試験装置及び圧力の実験結果と解析結果を比較した図.
Comparison of results between experiment and analysis (TIT combustion test in two compartments)

れに伴う圧力や温度の上昇, 火炎の伝ば状況などを調べている. 模擬格納容器の内部は, 蒸気発生器室に相当する二つの円筒や一般部に相当する上下二つのドーナツ状の構造物を配置し, 円筒内部には数段のグレーティング, 上下のドーナツ内部に各4個のオリフィスを設置している. また, 外部には水蒸気やスプレー, 窒素供給装置を併設しており, 燃焼に及ぼす水蒸気やスプレー, さらには酸素濃度などの影響も調べることができる. また, 点火位置は3箇所あるが, 各試験においては1箇所をみの点火としており, 点火位置の違いによる燃焼の差異も調べている. イグナイタはスパーク式で, 点火エネルギーは約16Jである. この試験は現在継続中であり, 解析コードの検証も同時に進行中である. 試験における水素濃度は5%から18%を計画している. 図4(b)には, その一例として濃度10%の水素を空気中で燃焼させた場合の圧力上昇の試験結果を示す. このほか, 水蒸気やスプレーなどが混入した場合の水素の燃焼に伴う圧力上昇は, 水素のみの燃焼の場合と変わらないか, それよりも小さくなるのが試験の結果明らかになっている.

本装置では, 試験の前提となる水素の容器内均一混合を達成するために, 容器内部にファンを設置せずに, 円筒外周部の蒸気加熱と容器壁の冷却による自然対流を利用しているが, その妥当性の評価を混合挙動解析ルーチンを用いた予備解析により行い, 試験により均一混合を確認している.

燃焼試験の解析に当たっては, 内部構造物が複雑に配置されているために区画の分割に当たって, 二つの円筒部について各3区画, 二つのドーナツ部についてオリフィスごとに各4区画, その他をドームの分割に割当て, 全体の区画数を64とした. 図4(b)には燃焼後の圧力の解析結果も示している. この結果は着火からの圧力の変化を比較したものであるが, 両者のピーク圧力及びそれまでの傾向は極めて良く一致していることが分かる. また, 試験の結果では火炎の伝ば状況は詳細に判断できないが, 解析により着火後の火炎が円筒底部からドーム部に上昇していくものと, 水平に伝ばし, 一般部下部に伝ばしていくものがあること, そしてこの一般部での着火により容器内圧力の上昇が急激になることが明確に示されている.

以上により, MAPHY-BURNコードは, 燃焼の解析においても特にピーク圧力の値は試験結果と良く一致することが分かり, 燃焼による格納容器の内部圧力の評価コードとして高い信頼性を

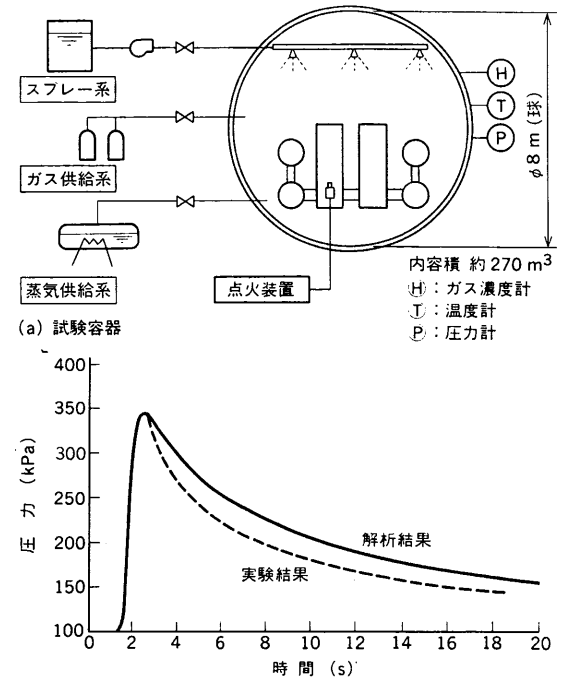


図4 (財)原子力発電技術機構の燃焼試験結果と解析結果の比較 試験装置及び圧力の実験結果と解析結果を比較した図.
Comparison of concentration between experiment and analysis (HEDL)

有することが分かった.

4. あとがき

多区画に分かれた原子炉格納容器内で発生した水素の濃度分布や温度分布, 及び燃焼挙動を評価するため, MAPHY-BURNコードを開発し, 大規模の水素混合試験や多区画の水素燃焼試験などの解析により検証した. これらの検証結果は良好であり, 格納容器内の水素濃度分布及び燃焼による圧力上昇など, 実機における安全評価コードとして信頼性を高めることができた.

参考文献

- (1) Morimoto, K. et al., MAPHY-Transient Analysis Code for Hydrogen Mixing in Subcompartmented Containment Vessel after a LOCA-and Verification Test, 2nd Int. Topical Meeting on Power Plant Thermal Hydraulics and Operations. Tokyo (1986)
- (2) William, B. B. et al., Combustion of Hydrogen : Air Mixtures in the VGES Cylindrical Tank, NUREG/CR-3273
- (3) Bloom, G. R. et al., Hydrogen Mixing and Distribution in Containment Atmosphere, EPRI NP-2669 (1983)
- (4) 緒方ほか, 原子炉格納容器内の水素混合挙動, 第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1992)
- (5) 緒方ほか, MAPHY-BURNによる解析結果, 平成6年度日本原子力学会秋の大会予稿集
- (6) 三神, 水素-空気-水蒸気系内の伝播火炎と物体の相互作用に関する研究, 昭和59年度科学研究費補助金研究成果報告書 (昭和60年3月)
- (7) 辻倉ほか, 容器内可燃性気体の混合・燃焼挙動解析コード (MAPHY-BURN) の開発, 日本原子力学会年会予稿集 (1989)
- (8) (財)原子力発電技術機構, 溶接部等熱影響部信頼性実証試験 (原子炉格納容器) 成果報告書 (平成4, 5年)