

SPHINCSのモデル及び妥当性確認について

1. はじめに

本資料は、設置許可基準規則第8条（火災による損傷の防止）において、2次系冷却材が漏えいした場合に生じる燃焼影響評価に適用する計算コードSPHINCSについて、

- ・燃焼影響評価において重要となる現象の特定
- ・解析モデルに関する説明
- ・妥当性確認

に関してまとめたものである。

2. 重要現象の特定

2.1 評価指標

SPHINCSが適用されるナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼における評価指標について記載する。

ナトリウム燃焼は、ナトリウム配管が何らかの原因で損傷し、漏えいしたナトリウムが空气中の酸素及び水蒸気と化学反応を起こす現象である。ナトリウムの漏えいが想定される場所としては、主冷却系に加え、補助冷却系、ナトリウム純化系等が挙げられる。

一般に、配管内ナトリウムは雰囲気より圧力が高いため、配管より漏えいしたナトリウムは、コラム状又はスプレイ状に噴霧し、床面に落下するまでの間に、直接燃焼する。この燃焼をスプレイ燃焼と呼ぶ。液滴状態でのスプレイ燃焼は反応表面積が大きく、燃焼開始直後に雰囲気の急激な圧力上昇、温度上昇を引き起こす可能性がある。

スプレイ燃焼で燃え残ったナトリウムは、床面でプール状に蓄積、拡大され、その表面で燃焼が発生する。これをプール燃焼と呼ぶ。ナトリウムは高沸点のため一般的な火災源（油等）に比べ飽和蒸気圧が低く、結果としてプール燃焼に伴う火炎面はプール近傍のみに形成される特徴がある。また、スプレイ燃焼、プール燃焼いずれにおいても、反応生成物がエアロゾルとして白煙状に雰囲気に放出され、換気や通気により周辺に移行する。

ナトリウム燃焼による反応熱に伴い、雰囲気圧力及び雰囲気温度は上昇する。同時に周辺構造物や建屋コンクリート等へ対流等により熱が輸送される。また、燃焼部周辺は高温となるため、輻射による周辺構造物等への熱輸送も行われる。建屋構造物であるコンクリートは水分を有しており、コンクリートの温度上昇に伴い水分を放出する。この水分とナトリウムとの反応により水素が発生する。発生した水素は雰囲気中の酸素と燃焼し、雰囲気の圧力や温度を上昇させる可能性がある。

ナトリウム燃焼が長期にわたり継続した場合には、建屋構造物であるコンクリートの機能劣化（熱的影響による材料劣化等）の影響（建屋健全性）、周辺に設置してある機器の機能喪失（熱的影響による損傷、エアロゾル付着による化学的損傷等）の影響（機器健全性）を考慮する必要がある。

建屋健全性では、構造部材であるコンクリートの損傷に伴う強度劣化が重要となる。熱的にはコンクリート温度上昇に伴う材料劣化が要因となる。また、ナトリウムと水分が反応することにより水素が発生するため、水素燃焼に伴う圧力上昇も建屋健全性に重要となる。さらに、ナトリウムの漏えいが想定される場所には、コンクリートとナトリウムが直接接触しないように、ライナ又は受樋（以下「ライナ等」という。）が設置される。このライナ等が損傷した場合には、ナトリウム-コンクリート反応が発生する。ナトリウム-コンクリート反応では、コンクリートの侵食及び水素の発生が生じ、結果として建屋健全性に重要な影響を及ぼす。ライナ等の損傷は、ナトリウム及び燃焼生成物環境下での腐食・減肉に加え、高温による変形が考えられる。このため建屋健全性の評価指標としてライナ等の温度を抽出する。

機器健全性については、火災 PRA^[1]では、火災源に隣接する機器の損傷として、熱的影響（雰囲気温度又は火災源からの熱流束）又は爆発的影響（熱的影響+衝撃波+飛来物）を評価指標としている。ナトリウム燃焼も一般火災と発生源は異なるものの、その後のシーケンスは同様であり、燃焼区画の機器健全性評価も重要となる。中でも、水素の急激な燃焼による影響は特に重要となる。加えてナトリウムや反応生成物（NaOH, Na₂O, Na₂O₂）は化学的に活性であり、機器やケーブルに付着することで化学的に機能を喪失させる可能性がある。

以上より、ナトリウム燃焼時の建屋健全性に関する評価指標をコンクリート温度、水素濃度及びライナ温度、機器健全性に関する評価指標を、水素濃度及びエアロゾル濃度とする。

2.2 ランクの定義

S P H I N C S で評価する事象において考慮すべき物理現象を対象に、**第 1 表**の定義に従って「H」、「M」、「L」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。

2.3 物理現象に対するランク付け

2.1 節で述べた評価指標に関連する物理現象に対して、2.2 節のランクの定義に従い、評価指標への影響に応じてランク付けを行った。物理現象の抽出は、PIRT（Phenomena Identification Ranking Table）の作成プロセスにおいて広く行われているシステムの階層的分類に基づき実施し、関連する物理現象を過不足なく抽出し（**第 1 図** システムの階層的分類）、さらに評価指標を関連付けることで客観的な判断に基づく重要度評価を実施した。ランク付けは**第 2 表**のとおりとなり、「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。

ランク付けに当たっては、ライナ等の温度やコンクリート温度は床面で発生するプール燃焼からの影響を強く受けるため、関連する物理現象を相対的に高いランクとした。水素濃度、エアロゾル濃度に関しては、発生源である燃焼に加え、物質輸送の影響を強く受けるため、関連する物理現象を相対的に高いランクとした。

以下に、物理現象ごとに考え方を示す。

(1) 液滴化 [スプレー燃焼]

液滴化（液滴径の平均及び分布）は、スプレー燃焼において反応面表面積を支配する

物理現象である。雰囲気温度を上昇させ、コンクリート等の温度に影響する。また、反応生成物であるエアロゾル発生量にも強く影響を及ぼす。このため、建屋健全性に対するランクは「M」、機器健全性については「H」とする。なお、液滴径分布は解析では入力条件となる。

(2) 燃焼(含水分との反応) [スプレー燃焼]

ナトリウムと酸素及び水蒸気との燃焼反応は、雰囲気温度やエアロゾル濃度に強い影響を与える。ただし、スプレー燃焼において、コンクリート等の温度への強い影響は比較的短時間となる。このため、建屋健全性に対するランクは「M」、機器健全性については「H」とする。なお、スプレー燃焼が支配的となる燃焼初期においてはコンクリートからの水分放出は少なく、水素濃度への影響は比較的小さい。

(3) 反応熱移行 [スプレー燃焼]

反応熱移行は、燃焼により発生した熱の雰囲気及び液滴への熱輸送割合を支配するが、コンクリート等の温度への直接的な影響は限定的である。このため、建屋健全性に対するランクを「M」とする。また、反応熱の熱移行現象は水素濃度やエアロゾル濃度との直接的な相関が小さいため、機器健全性のランクについては「L」とする。

(4) プール拡大挙動 [プール燃焼]

プール拡大挙動は、プール燃焼における反応面表面積を支配する物理現象であり、エアロゾル濃度に影響を及ぼす。また、プール領域下部のライナ等の温度及びコンクリート温度上昇に影響を与える。以上より、建屋健全性及び機器健全性いずれにおいてもランクは「M」とする。

(5) 燃焼(含水分との反応) [プール燃焼]

ナトリウムと酸素及び水蒸気との燃焼反応は、水素濃度やエアロゾル濃度に影響を与えるが、現象としては比較的緩やかであるといえる。ただし、プール燃焼直下にあるライナ等の温度及びコンクリート温度に対しては強い影響がある。したがって、建屋健全性に対するランクは「H」とし、機器健全性に対するランクは「M」とする。

(6) 反応熱移行 [プール燃焼]

反応熱移行は、燃焼により発生した熱の雰囲気及びプールへの熱輸送割合を支配する。プールへ輸送された熱は、熱伝導によりライナ及びコンクリートへ移行する。このため、反応熱移行では、ライナ等の温度及びコンクリート温度に強い影響を与える。したがって、建屋健全性に対するランクを「H」とする。また、反応熱の熱移行現象は水素濃度やエアロゾル濃度との直接的な相関は小さいため、機器健全性については「L」とする。

(7) 熱伝導 [雰囲気・構造物への熱移行]

熱伝導は、ライナ温度及びコンクリート温度の上昇に強い影響を与える。また、結果としてコンクリートからの水蒸気放出に影響を及ぼすことで、評価指標である水素濃度に影響を与える。以上より、建屋健全性に対するランクを「H」、機器健全性に対するランクを「M」とする。

(8) 対流熱移行 [雰囲気・構造物への熱移行]

対流熱移行は、部屋間の圧力差及び温度差に伴う浮力差による対流現象であり、部屋全体及び部屋（セル）間の熱輸送を支配する。このため、対流熱伝達により隣接する部屋のライナ等の温度及びコンクリートの温度に影響を与える。同様にエネルギー輸送に伴うセル間の浮力差の要因となるため、水素濃度及びエアロゾル濃度に対しても影響を与える。このため、建屋健全性及び機器健全性に対するランクはいずれも「M」とする。

(9) 輻射熱移行 [雰囲気・構造物への熱移行]

輻射熱移行は、燃焼面から輻射により周辺壁、天井及び床面に熱が移行される。このため、ライナ等の温度及びコンクリート温度に影響を与える。したがって、建屋健全性及び機器健全性に対するランクはいずれも「M」とする。

(10) 質量・運動量移行 [雰囲気・構造物への質量・運動量移行]

セル間（部屋間）の質量・運動量移行は、圧力差及び温度差に伴う浮力差を駆動力とした部屋間の運動量輸送現象であり、隣接する部屋のエアロゾル濃度に強い影響を与える。また、運動量輸送の結果水素濃度に対しても影響を与える。したがって、建屋健全性に対するランクは「M」とし、機器健全性に対するランクを「H」とする。

(11) ガス成分濃度移行 [雰囲気・構造物への質量・運動量移行]

ガス成分濃度移行では、酸素の消費に加え水蒸気及び水素の発生、移行が重要な現象となる。ナトリウム燃焼ではコンクリートが昇温されることで水蒸気が放出する。水蒸気はナトリウムと反応することで水素を発生させるため、水素濃度に強い影響を与える。また、エアロゾルについても、酸素とナトリウムとの反応に加え、水蒸気との反応で水酸化物のエアロゾルが生成されるため、エアロゾル濃度にも影響を及ぼす。したがって、建屋健全性及び機器健全性に対するランクは「H」とする。

(12) エアロゾル移行 [雰囲気・構造物への質量・運動量移行]

エアロゾル移行は、エアロゾルの凝集や沈着による部屋内部での堆積及び流動による部屋間の移行であり、エアロゾル濃度に強い影響を与える。また、エアロゾルは雰囲気中の水蒸気と反応するため、水蒸気濃度の変化に伴う水素濃度変化に対し影響を与える。以上より、建屋健全性に対するランクは「M」とし、機器健全性に対するランクは「H」とする。

(13) 化学反応 [その他ナトリウム特有の物理現象]

雰囲気における化学反応は、雰囲気中の水分と反応生成物であるエアロゾルとの反応であり、燃焼熱に比べると雰囲気への温度や圧力に対する影響は比較的小さい。水分と反応生成物との反応では、ナトリウム酸化物が水酸化物に変化するため、水蒸気質量分の濃度変化（単位体積当たりのエアロゾル質量）に影響を及ぼす。また、水素は生成されないものの、水蒸気濃度の低下を伴い、結果として水素濃度に影響を及ぼす。以上より、建屋健全性、機器健全性のいずれにおいてもランクは「M」とする。

(14) ライナ等の腐食・減肉 [その他ナトリウム特有の物理現象]

ライナ等の腐食・減肉は、建屋健全性に影響を及ぼす現象であり、本来ライナ等の温度に対して従属的となるがライナ等の温度と強く結びついている。したがって、建屋健全性に対するランクは「H」とし、機器健全性に対するランクは「L」とする。なお、本現象は、燃焼解析結果より別途評価される。

(15) ナトリウムとコンクリートとの接触 [その他ナトリウム特有の物理現象]

ライナ等の損傷によりナトリウムがコンクリートと直接接触することによりナトリウム-コンクリート反応が発生し、コンクリートを浸食しながら水素を発生させる。このため、建屋健全性及び機器健全性に強い影響を及ぼす。本現象は、ナトリウム-コンクリート反応を伴うシビアアクシデント時の境界条件となる現象であり、ナトリウム燃焼評価の範疇外であるため、ランク付けは行わない。

3. 解析モデルについて

3.1 コード概要

S P H I N C S は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構で開発されたコードであり^[2]、プラント内の各部屋を任意の領域（セル）に分割し、各セルの代表値をもとに質点系でナトリウム燃焼にかかる支配方程式を解く、ゾーン（Zone）モデルを採用している。本コードは、高速炉の安全評価で実績のある計算コードCONTAIN-LMR^[3]で用いられているモデルを参考としていることから、解析モデルには共通部分が多いが、拡大挙動を伴うプール燃焼を機構論的に評価するモデルを導入するなど、ナトリウム燃焼に特化している。

3.2 重要現象に対する解析モデル

本資料の 2 章において重要現象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第 3 表に示す。

3.3 解析モデル

S P H I N C S のモデルは大きく、多セル間の質量（ガス成分種含）、運動量及びエネルギー輸送を評価するフローネットワークモデル、輻射熱移行モデル、スプレイ燃焼及びプール燃焼を評価する燃焼モデル並びにエアロゾル移行に関するモデルに大別される。

3.3.1 スプレイ燃焼

(1) 液滴化

S P H I N C S では、大きさの異なる液滴の燃焼による影響を考慮するため、液滴直径 D の分布式として、以下に示す抜山-棚沢の分布関数^[4]を用いている。

$$\frac{dF}{dD} = \left(\frac{3.915}{D}\right)^6 \frac{D^5}{120} \exp\left(-\frac{3.915D}{D}\right) \quad (1)$$

ここで F はその粒径における体積分率を、 \overline{D} は体積平均直径を示す。解析では体積平均直径を入力で与え、(1)式より体積平均直径における体積分率の 1%となる最小、最大直径を計算し、その間を多群（デフォルトでは 11 群）に分割する。

(2) 燃焼（含水分との反応）

各粒径群におけるスプレー（液滴）燃焼速度は、液滴温度と着火温度の関係により評価式を分けている^[2]。液滴温度が着火温度以下の場合、燃焼速度は熱輸送と物質輸送のアナロジを用い、酸素又は水蒸気の流入フラックスより以下の式で計算される^[4]。

$$\dot{m}_f = \frac{\pi CDd}{i} (2 + 0.6Re^{1/2} Sc^{1/3}) \quad (2)$$

ここで C は反応物（酸素又は水蒸気）の質量濃度、 D は拡散係数、 d は液滴直径、 i は反応量論比（反応により消費されるナトリウムと反応物の質量割合）である。反応量論比は、Gibbs 自由エネルギー極小化法により評価する（3.3.3 雰囲気・構造物への熱移行（4）化学反応で後述）。また、 Re 、 Sc はそれぞれレイノルズ数及びシュミット数である。

着火温度に達した後では、 d^2 則^{[4], [5]}に基づき、

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{\pi \rho K}{4} d, \quad d^2 = d_i^2 - Kt \\ K &= \frac{8\lambda}{C_p \rho} \ln(1+B), \quad B \equiv \frac{1}{h_{fg}} \left\{ C_p (T_g - T_s) + \frac{H_c Y}{i} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

で評価し、強制対流の効果^[6]を考慮した以下の式を用いる。

$$\dot{m}_f = \dot{m} (1 + 0.3Re^{1/2} Pr^{1/3}) \quad (4)$$

ここで、 λ 、 C_p 及び ρ はそれぞれ、ガス成分の熱伝導率、定圧比熱、密度であり、 h_{fg} は蒸発潜熱、 H_c は化学反応熱、 Y は反応物の質量分率である。また、 T_g 及び T_s はそれぞれ周辺ガス温度、液滴温度である。

(3) 反応熱移行

化学反応による発熱量は、

$$Q_{burn} = \sum_j \dot{m}_{fj} H_{c_j} \quad (5)$$

で表される。ここで j は反応物を示す。液滴が沸点よりも低い場合(2)式で用いた相関式を用い、周辺ガスへの熱移行量を以下の式で評価する^[7]。

$$Q_g = \pi d \lambda (2 + 0.6Re^{1/2} Pr^{1/3}) (T_s - T_g) \quad (6)$$

残りの発熱は液滴の昇温に寄与する。液滴が沸点に到達すると、全熱量（(5)式）からナトリウムの蒸発に必要な以下の熱量（顕熱+潜熱）を除いたものが周辺ガスに移行する。

$$Q_v = \sum_j \dot{m}_j \{ C_p (T_b - T_s) + h_{fg} \} \quad (7)$$

ここで T_b はナトリウムの沸点である。

3.3.2 プール燃焼

(1) プール拡大挙動

S P H I N C S独自の機構論的な取り扱いとして、小規模漏えい時のプール燃焼影響評価を詳細に解析するため、ナトリウムプールをプール中心から同心円状に分割し、プールの質量とエネルギーが保存するようにプール面積の過渡変化を計算する^[7]。質量保存に関しては、スプレイから落下するナトリウム量、プール燃焼量、半径方向に移流する量の均衡と総量保存を満足する定式化がなされている。プール厚みは、ナトリウムの表面張力と床面（ライナ等）との接触角をもとに以下の式で計算される^[2]。

$$\delta = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho g}(1 - \cos \varphi)} \quad (8)$$

ここで δ はプール厚み、 σ 及び φ は表面張力及び接触角である。

エネルギー保存に関しては、スプレイ燃焼で過熱されたナトリウムの流入エンタルピー、ナトリウムの蒸発によるエンタルピー、燃焼に伴う発熱によるエンタルピー、ナトリウムの移送に伴い輸送されるエンタルピーを考慮している。

分割された各セル（リング）におけるナトリウム燃焼に伴う質量及びエネルギー輸送は、後述するフレームシート燃焼モデルによりセル単位で評価される。

(2) 燃焼（含水分との反応）及び反応熱移行

プール燃焼における燃焼及び反応熱移行は、フレームシート燃焼モデルにより一括して取り扱われる^{[2], [9]}。本モデルは、高さ方向（一次元的）に、ナトリウムプール、燃焼面（フレームシート）、雰囲気ガスの3つのレイヤーが存在する状況を想定し、それらのレイヤー間における質量及びエネルギーの輸送方程式を解くことで熱移行量を求める、S P H I N C S独自の機構論的なモデルである。経験的なパラメータ（燃焼面からプールと雰囲気へのエネルギー配分比等）は可能な限り排除し、物理的なメカニズムをコード内で計算することから、汎用性が高い。モデルの出発点として、厚さ無限小の燃焼面を仮定し、燃焼面に流入する物質と熱は、下方のナトリウムプール、及び上方の雰囲気から移行する物質と熱の量（それぞれマスフラックス、エネルギーフラックス）の合計で表されるという基本原理を取り入れる。この基本原理は、次式で表される。

$$N_{Na} = \sum_j \frac{N_j}{i_j} \quad (\text{for mass flux})$$
$$q_b = q_g + q_p \quad (\text{for energy flux}) \quad (9)$$

ここで N はマスフラックスであり、 q はエネルギーフラックスである。下付添字 b 、 g 及び p はそれぞれ燃焼、雰囲気ガス、ナトリウムプールを示す。ナトリウム及び反応物のマスフラックスは、

$$N_{Na} = \frac{C_{Na} D_{Na}}{l} \ln \frac{P}{P - P_{Na}^{sat}} \quad (10)$$

$$N_j = \left(\frac{x_j}{1 - x_j} \right) \frac{C_g D_j}{l} Sh_j$$

で表される。ここで、 l はナトリウムプール表面からのフレーム高さであり、 x は反応物のモル濃度である。 Sh はシャーウッド数であり、水平平板における自然対流熱伝達^[10]及び熱輸送と物質輸送のアナログを用い、以下の式で評価する。

$$Sh_j = 0.14(Gr \times Sc_j)^{1/3} \quad (11)$$

ナトリウムプールからフレーム及び雰囲気ガスからフレームへのエネルギーフラックスはそれぞれ、

$$q_g = q_g^{conv} + q_g^{rad} = \frac{Nu\lambda}{d}(T_f - T_g) + \sigma\epsilon_g(T_f^4 - T_g^4) \quad (12)$$

$$q_p = q_p^{cond} + q_p^{rad} = \lambda \left. \frac{dT}{dz} \right|_{flame} + \sigma\epsilon_p(T_f^4 - T_p^4)$$

となる。ここで、 Nu はヌセルト数、 ϵ は輻射率、 σ はStefan-Boltzmann定数である。輻射率は入力条件となる（これまでの知見より $\epsilon_g=0.65$ 、 $\epsilon_p=0.5$ ）。一方、SPHINCSでは、輻射率を内部で評価するオプションがあり、以下の式で評価される。

$$q_g = q_g^{conv} + q_g^{rad} = \frac{Nu\lambda}{d}(T_f - T_g) + (F_{fg}\alpha_g\epsilon_f\sigma T_f^4 - F_{gf}\epsilon_f\epsilon_g\sigma T_g^4) \quad (13)$$

$$q_p = q_p^{cond} + q_p^{rad} = \lambda \left. \frac{dT}{dz} \right|_{flame} + (F_{fp}\epsilon_p\epsilon_f\sigma T_f^4 - F_{pf}\epsilon_f\epsilon_p\sigma T_p^4)$$

ここで、 F は形態係数、 α は吸収率であり、3.3.3(3)で後述する輻射モデルを用いる。

(12)式又は(13)式中の Nu 数は(11)式を用いる（熱輸送と物質輸送のアナログ）。なお、フレームからプールへのエネルギーフラックス(q_p)における熱伝導評価（(12)式又は(13)式の右辺第1項）では、反応により生成されたエアロゾルのプール表面落下に伴うエネルギー輸送も考慮するため、生成されたエアロゾルのプール落下割合が別途必要となる（これまでの知見より落下割合は0.75としている。）。

最終的に(9)式はフレーム高さ l 及びフレーム温度 T_f の関数となり、Newton-Raphson法を用いてこれらを求める。

3.3.3 雰囲気・構造物への熱移行

(1) 熱伝導

SPHINCSでは、部屋の周囲の構造物（壁）、床面に敷設されたライナ等について以下の非定常熱伝導方程式を解くことで熱伝導をモデル化している。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \lambda \nabla T + S \quad (14)$$

ここで S は生成項であるが、コンクリートからの水分放出等で用いられる。

部屋内のガス空間については質点系で代表温度は 1 点のみであるが、構造は別途多次元に詳細化して温度分布を評価することが可能である。

(2) 対流熱移行

部屋間の対流熱移行については、フローネットワークモデルとして質量・運動量とカップリングして評価される。なお、部屋間の温度差に起因する浮力差により発生する対流通気量（部屋間の交換通気量）も Brown 等のモデル^{[11], [12]}をもとに評価している。また、各部屋間の開口は 1 箇所のみであり、複数開口部の場合は Brown 等のモデルより等価な代表開口部を設定する。

部屋内と周辺壁との対流熱伝達については、水平方向（床、天井）では周辺ガス温度 (T_{gas}) と壁面温度 (T_{wall}) との大小関係をもとに、以下の相関式により評価する。

$$\begin{aligned}
 & T_{gas} > T_{wall} \\
 & \quad Nu = 0.067 Ra^{1/3} \\
 & T_{gas} < T_{wall} \\
 & \quad Ra < 10^7 \\
 & \quad \quad Nu = 0.54 Ra^{1/4} \\
 & \quad Ra > 10^7 \\
 & \quad \quad Nu = 0.14 Ra^{1/3}
 \end{aligned} \tag{15}$$

ここで Ra はレイリー数である。また、鉛直方向（側壁等）については以下の式より熱伝達率を評価する^[13]。

$$\begin{aligned}
 & Ra < 10^{10} \\
 & \quad Nu_x = \frac{3}{4} \left\{ \frac{Pr}{5Pr + 4.9\sqrt{Pr} + 2.4} \right\}^{1/4} Ra^{1/4} \square 0.502 \left(\frac{Pr}{Pr + \sqrt{Pr} + 0.5} Ra \right)^{1/4} \\
 & \quad Nu = \frac{4}{3} Nu_x \\
 & Ra > 10^{10} \\
 & \quad Nu = 0.0185 Ra^{0.4}
 \end{aligned} \tag{16}$$

ここで Pr はプラントル数である。

(3) 輻射熱移行

雰囲気ガスと各壁面の輻射フラックスは輻射率を入力で与えた場合、以下の式で評価する。

$$q_{ri} = \sigma \varepsilon_{ri} (T_g^4 - T_i^4) \tag{17}$$

S P H I N C S 内部で輻射率を計算する場合^[2]、(17)式の代わりに以下を用いる。

$$q_{ri} = \sigma \varepsilon_{si} (\varepsilon_m T_g^4 - \alpha_m T_i^4) \tag{18}$$

ここで、下付添字 m はガス成分と反応生成物であるエアロゾルの両方の影響を加味し

た値である。また、(18)式中の ε_s は壁面での反射を考慮した等価輻射率であり、表面での輻射率 ε_i をもとに以下のように計算される。

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_i + 1}{2} \quad (19)$$

本モデルでは、輻射率(ε)と吸収率(α)は等価として扱う。壁面輻射率(ε_i)は入力値で与える。一方、ガス成分とエアロゾルの両方を考慮したガス輻射率(ε_m)は、以下の式で評価される^[14]。

$$\begin{aligned} \varepsilon_m &= \varepsilon_a + \varepsilon_g - \varepsilon_a \varepsilon_g \\ \alpha_m &= \alpha_a + \alpha_g - \alpha_a \alpha_g \end{aligned} \quad (20)$$

ここで下付添字は a がエアロゾルを g がガス成分を指す。エアロゾルの輻射率は、以下に示す Felske and Tien のモデルを用いる^[15]。

$$\begin{aligned} \varepsilon_a &= 1 - \frac{15}{\pi^4} \varphi^{(3)}(y), \quad y = 1 + \alpha_{\lambda_m} L T_g \frac{\lambda_m}{c_2} \\ \lambda_m &= 0.94 \mu\text{m} \\ \alpha_{\lambda_m} &= 4000 \rho_a f_v \end{aligned} \quad (21)$$

ここで $\varphi^{(3)}$ はペンタガンマ関数であり、 L は等価長さとなる。また、 ρ_a 及び f_v はそれぞれエアロゾル密度、エアロゾルの体積分率であり、 c_2 は放射第二定数 (the second radiation constant in Planck's radiation formula) と呼ばれる。

(4) 化学反応 (雰囲気反応及び燃焼反応)

S P H I N C Sにおける雰囲気での化学反応、スプレー燃焼及びプール燃焼での反応量論比の評価はB I S H O Pプログラム^[16]によって行われる。B I S H O Pでは、Gibbs自由エネルギー極小化法をもとに、定圧条件下でNa, O₂, N₂, H₂, H₂O, NaOH, Na₂O, Na₂O₂の平衡状態を化学ポテンシャルである Gibbs 自由エネルギーが極小となる組成をラグランジュ未定定数法により求めている。ナトリウム化合物としては上記のほかに NaH が存在するが、B I S H O Pでの評価により 900K 程度で完全に熱分解する^[16]こと、雰囲気中の水素濃度を保守的に評価することを考慮し、NaH が存在しない状態での平衡としている。

水素(H₂)は平衡状態では酸素(O₂)と共存しない (化学ポテンシャルとしては水(H₂O)の方が低い) が、反応に必要なエネルギー障壁が比較的高いため実現象では共存する。S P H I N C Sでは、水素再結合割合を入力変数にて指定することで、雰囲気内での水素と酸素の共存を模擬している。

雰囲気での化学反応については瞬時平衡を仮定し、平衡前後での変化量を数値計算内でのタイムステップで除すことで反応速度としている。なお、水素再結合割合を 100%未満とした場合、雰囲気中では水素の酸素等との反応は考慮しない。また、燃焼モデル中

では、前後での反応物変化量とナトリウム変化量をもとに量論比を計算している。

3.3.4 雰囲気・構造物への質量・運動量移行（ガス成分濃度移行含む。）

(1) フローネットワークモデル

フローネットワークモデルでは、セル内の質量保存及び運動量保存をもとに圧力方程式を構築し、セル間移流量の過渡変化を計算する。運動量保存はセル間の流量と圧力損失に加え、セル間温度差に起因する浮力差に伴う交換通気量も Brown 等のモデル^{[11], [12]}を用い支配方程式に組み込まれている。

質量保存における生成項は、燃焼に伴う質量変化、反応生成物であるエアロゾルの壁面付着に伴う質量変化及びコンクリートからの水分放出に伴う質量変化を考慮する。

各ガス成分種における支配方程式は、エネルギー保存と同様にセル間の移流に伴う成分種の輸送及び生成項として、燃焼及び雰囲気での化学反応、コンクリートからの水分放出を考慮している。なお、エネルギー保存と異なり、壁面でのガス成分種の放出、吸着は考慮しない（濃度勾配=0 条件）。

(2) コンクリートからの水分放出モデル

コンクリートからの水放出量を自由水と結合水の組み合わせでモデル化し、SPHINC S 上では、表形式により規定され、温度変化に伴う放出量変化より水分放出量（速度）が評価される。

3.3.5 エアロゾル移行

(1) フローネットワークモデル

エアロゾルのセル間移行については、ガス成分濃度移行と同様にセル間の移流及び周辺壁（天井、床含む。）への沈着を生成項としてフローネットワークモデル内で評価される。

(2) 凝集・沈着モデル

SPHINC S では、エアロゾルのセル内での挙動として、粒径分布、ブラウン拡散、熱泳動、重力沈降、凝集、沈着及びナトリウム燃焼に伴うエアロゾルの生成を考慮するため、ABC-INTG プログラム^[17]を組み込んでいる。

各代表粒径におけるエアロゾルの数密度 $n(v, t)$ は Wen 等のモデル^[18]を用い、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial n(v, t)}{\partial t} = & \frac{1}{2} \int_0^v n(v', t) n(v-v', t) \beta(v', v-v') dv' \\ & - n(v, t) \int_0^\infty n(v', t) \beta(v, v') dv' - R(v) n(v, t) + S(v, t) \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、 V は体積、 β, R, S はそれぞれ凝集率、沈着率、生成項であり、Gelbard 等のモデルを用いる^[19]。エアロゾルの粒径については OECD/NEA により推奨されている対数正規分布を用いる^[20]。

4. コードの検証及び妥当性確認

4.1 重要現象に対する妥当性確認方法

S P H I N C S の評価マトリクスを**第 4 表**に示す。**第 4 表**はナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼で評価する全事象を包絡するように、本資料の 2 章で重要現象に分類された物理現象を列挙している。各試験解析の内容について詳細を 4.2 節以降に示すが、それらの要約を 4.1.1 項から 4.1.6 項に示す。総合効果試験としては、実規模体系での大規模なナトリウム漏えい及び燃焼を直接模擬したものはないが、1995 年に「もんじゅ」で発生したナトリウム漏えい及び燃焼を模擬したナトリウム漏えい燃焼実験-II (RUN-D4) を対象とした試験解析を実施する。

ナトリウムが漏えいした場合に生じるナトリウム燃焼では、ライナ等の腐食・減肉及びライナ等の破損後のナトリウムとコンクリートとの接触は重要な物理現象となるが、S P H I N C S では、ライナ部周辺環境（ナトリウム温度、ライナ上のナトリウム及び反応生成物の質量等）を評価し、その評価結果をもとに別途上記物理現象が評価される。したがって、上記 2 つの物理現象を直接的に妥当性評価の対象とすることは不要とした。

4.1.1 単一液滴燃焼実験

単一液滴燃焼実験^[21]の解析により、S P H I N C S で採用されたスプレイ燃焼モデルの妥当性を確認する。

4.1.2 スプレイ燃焼実験 (RUN-E1)

スプレイノズルから噴出されたナトリウム液滴群の燃焼実験^[22]を解析し、液滴群としてのスプレイ燃焼モデル、実験装置内への熱移行の妥当性を確認する。

4.1.3 プール燃焼実験 (RUN-D1)

試験装置内に設置されたナトリウムプールにおけるプール燃焼実験^[23]の解析により、S P H I N C S で採用されたプール燃焼モデル及び雰囲気への熱移行、物質（エアロゾル）移行の妥当性を確認する。

4.1.4 小規模プール燃焼実験 (RUN-F7)

試験装置内で一定高さからコラム状に滴下させプール拡大挙動を伴ったプール燃焼実験^[24]の解析を実施する。これによりプール拡大挙動の妥当性を確認するとともに、雰囲気への熱移行、物質・運動量移行の妥当性を確認する。

4.1.5 マルチセルプール燃焼実験 (RUN-D3)

鉛直断面内に開口部を有した水平 2 室におけるプール燃焼実験^[25]の解析を行い、S P H I N C S における雰囲気への熱移行、物質・運動量移行（フローネットワークモデル）の妥当性を確認する。

4.1.6 ナトリウム漏えい燃焼実験-II (RUN-D4)

総合試験解析として、「もんじゅ」におけるナトリウム漏えいを模擬した燃焼実験^{[26], [27]}解析を行い、S P H I N C S がナトリウム燃焼評価に適用できることを確認する。また、雰

囲気中の水蒸気及びコンクリート加熱により生じる水蒸気の放出に伴う水素発生量の評価を行い、SPHINCSで採用された雰囲気における化学反応モデルの妥当性を確認する。

4.2 単一液滴燃焼実験解析

(1) 単一液滴燃焼実験の概要

本実験は、空気雰囲気におけるナトリウム単一液滴の落下燃焼実験^[21]であり、ナトリウム燃焼解析コードの検証を目的として1997年に原子力機構（当時は動燃）にて実施したものである。

単一液滴燃焼実験装置の概要を**第2図**に示す^[21]。液滴はベータアルミナ板に電位差を与えてナトリウムを一定速度で透過させ内径0.2mm、外径0.5mmのノズルより押し出すことで生成される。押し出しにより生成された液滴は試験容器内を自由落下しつつ燃焼し、2.68m下方にある液滴回収容器中のパラフィン内に滴下する。落下前の液滴径は、供給ナトリウム量をベータアルミナ板の印加電荷量から求め、その真球換算から約3.8mmとなっている^[21]。この評価に基づき、解析での液滴径を3.8mmとした。実験での主な計測項目は、液滴質量変化、雰囲気酸素濃度及び高速度ビデオを用いた液滴落下速度である。実験では、1ケース当たり50個滴下させ、その平均及びばらつきを評価するとともに、計測系の不確かさについても評価している。**第5表**に実験結果概要を示す。

(2) 単一液滴燃焼実験の解析結果

実験結果との比較として**第3図**に燃焼量を示す。化学反応による Na_2O_2 と Na_2O の生成割合を入力値で変化させた場合、 Na_2O_2 との反応割合が大きくなると、より多くの酸素が反応に必要となるため、ナトリウムの燃焼量は低下している。反応割合の計算に量論比モデルBISHOPを用いると、ばらつきの範囲内で燃焼量の実験結果を再現している。**第4図**に落下速度を示す。落下速度も実験結果のばらつきの範囲で再現している。以上により、SPHINCSの単一液滴としてのスプレー燃焼解析の妥当性が確認された。なお、以降の解析ではBISHOPを用いた。

4.3 スプレー燃焼実験(RUN-E1)解析

(1) スプレー燃焼実験(RUN-E1)の概要

RUN-E1は、空気雰囲気における大規模・長時間のナトリウムスプレー燃焼実験^[22]であり、ナトリウム燃焼解析コードの検証を目的として1985年に原子力機構（当時は動燃）にて実施したものである。

スプレー燃焼実験装置を**第5図**に示す^[22]。試験装置は直径3.6mの密閉容器であり、内径8.7mmのスプレーノズルが容器内に設置されている（高さ3.98m）。落下したナトリウムは、下端面での傾斜により燃焼抑制室に流入することで、プール燃焼の影響を除いている。ナトリウム液滴の平均径は体積平均で約2mm（水試験及び当該ノズル（遠心型加圧フルコーンノズル）の液滴径に関する実験式に基づいて決定）^[22]であり、漏えい温度は505℃、漏えい量は510g/s（1,800s）となっている。実験では、容器内圧力、温度、エアロゾル濃度が測定されている。

(2) スプレイ燃焼実験の解析結果

第6図に解析結果と実験結果との比較を示す。ガス温度に関しては、解析体系での平均値となるため、スプレイの内部や高温化した気体の上昇流の通過点で測定された実験結果に比べると低めの評価となっている。実験では熱電対にナトリウム液滴の付着の影響も考えられること、また、後述するガス圧力については概ね実験結果を再現しており、実験領域でのエネルギーの観点も含め実験結果と整合していることが確認された。なお、図中のスプレイノズル下方に設置した熱電対 (TE2082) は 600s 以降で約 400°C となっているが、これは未燃焼の滴下ナトリウム (ノズル出口温度 505°C) の影響を受けているためと考えられる。

ガス圧力については第6図(b)に示すように、実験の後半で若干実験結果よりも低めに推移するものの、圧力の立ち上がり挙動及び最高圧力は実験結果と整合している。

第6図(c)に酸素濃度の実験結果との比較を示す。図中実験で測定された(B)及び(C)のデータは、実験装置から測定装置までのラインが長く、その間の時間遅れを考慮したものとなっている^[22]。ただし、ライン中の酸素濃度の拡散までは考慮していない。図に示すように、解析ではセル全体での平均酸素濃度を評価しているため、酸素濃度の急激な減少は再現できないものの、全体としての減少傾向は実験と整合している。

第7図に壁面への熱流束の解析結果と実験結果との比較を示す。実験ではスプレイノズルと同じ高さに、2つの熱流束計を取り付け、一方を遮蔽体で覆うことで、対流に伴う熱流束(遮蔽体付)と対流に加え輻射による熱流束を測定している。第7図に示すように、実験では比較的対流による熱流束の割合が高くなるが、全体の熱流束のピーク値は実験結果と整合している。対流熱伝達による熱流束については、実験での考察においても想定される自然対流熱伝達に伴う熱流束(約 4,000kcal/hr/m² (4,650W/m²))よりも測定値が高くなっていることが指摘されており^[22]、解析結果の対流熱伝達による熱流束値が最大で約 6,000W/m²であることを考慮すると、解析結果は妥当であるといえる。

以上より、SPHINCSのスプレイ燃焼解析の妥当性が確認された。

4.4 プール燃焼実験(RUN-D1)解析

(1) プール燃焼実験(RUN-D1)の概要

RUN-D1は、空気雰囲気における大規模・長時間のナトリウムプール燃焼実験^[23]であり、ナトリウム燃焼解析コードの検証を目的として1985年に原子力機構(当時は動燃)にて実施したものである。

プール燃焼実験装置を第8図に示す^[23]。実験装置は約4m(W)×4m(D)×3m(H)の空間に1.5m(W)×1.5m(D)×0.5m(H)のプール(燃焼皿)を設けた構造となっている。実験では、505°Cのナトリウムをプール下端から2.56kg/sで215s間供給し、その後約1hr燃焼を継続させている(供給終了時のナトリウムプール高さは約0.3m、総供給量は約550kgである。)。また、実験中の酸素濃度の急激な低下を抑制するために、実験装置上部から酸素を約200l/minで同様に約1hr継続して供給している。

実験では、雰囲気、ナトリウム、コンクリートの各温度履歴、圧力履歴、エアロゾル

濃度を計測するとともに熱流束計を用い、直接計測ではないものの、輻射熱流束の評価を行っている。

(2) プール燃焼実験の解析結果

解析結果と実験結果との比較を**第9図**に示す。ガス温度(**第9図(a)**)については、実験では測定高さ(**第8図**)により約30℃程度違いがあるものの、概ね体系内で同様な温度履歴となっており、解析結果は若干高めとなっているものの実験との整合性は高い。

一方、プール中ナトリウム温度(**第9図(b)**)及びプール下端でのライナ温度(**第9図(c)**)については解析結果では最大値でそれぞれ、約40℃(ナトリウム温度)、約20℃(ライナ温度)と実験よりも過小評価となっているが、概ね実験と整合している。

壁におけるライナ及びコンクリート温度については、**第9図(d)**及び**(e)**に示すように、ライナ温度はガス温度の影響で若干実験結果よりも高めに評価するものの、いずれも実験との整合性は高い。

酸素濃度の比較結果を**第9図(f)**に示す。実験では、酸素供給期間(3,600s(60min))でほぼ一定値(約17mol%)で推移し、酸素供給停止後酸素濃度が低下している。解析では、若干酸素の消費が多いものの、概ね実験結果と整合している。

第9図(g)にエアロゾル濃度分布の比較を示す。図に示すように、解析では実験に比べ約4倍の濃度となっており、エアロゾル濃度を過大評価している。RUN-D1実験では、中心部に設置されたプール周囲壁の高さが約500mmであり、ナトリウムプール液深(約300mm)よりも周囲壁が高い構造となっている。また、実験体系全体の換気も弱く、プール燃焼で生成した反応生成物であるエアロゾルが比較的プールに落下しやすい体系のためと考えられる。

第9図(h)に壁面への熱流束の比較結果を示す。全体の熱流束としては、図中実線で示すように、初期の立ち上がりは実験との整合性は高いものの、約600s以降解析結果は実験結果に比べ約30%程度過大に評価している。なお実験では約2,400sで熱流束計が破損している。

実験では高さ約2,000mmの位置で1箇所計測されたものであること、また、壁ライナ及びコンクリート温度については実験と解析で概ね一致していることより、解析結果は妥当であると考えられる。実験における輻射熱流束(シールド付輻射系測定値との差分、図中点線)は測定期間で約100W/m²であり、実験での考察^[23]においても、輻射熱流束の過小評価の可能性が指摘されている。実験では、ガス温度から推定される自然対流熱流束を全体から差し引いた値(図中の一点鎖線)を輻射熱流束値としており、全体に対する輻射熱流束の割合として約60%と評価している。解析では全体的に熱流束値が実験に比べ高いものの、輻射熱流束の割合は60~80%となっており、実験における考察と整合しており、輻射モデルの妥当性が確認された。

以上より、SPHINCSでは、エアロゾル濃度を実験結果に比べ高めに評価するものの、それ以外については実験を概ね再現しており、プール燃焼モデルの妥当性が確認された。

4.5 小規模プール燃焼実験(RUN-F7)解析

(1) 小規模プール燃焼実験(RUN-F7)の概要

RUN-F7 は、空気雰囲気における小規模のナトリウムプール燃焼実験^[24]であり、ナトリウム燃焼解析コードの検証を目的として 1998 年に原子力機構（当時は動燃）にて実施したものである。

小規模プール燃焼実験装置の概要を第 10 図に示す^[24]。実験装置は直径約 1.3m、高さ約 2.2m の円筒形の容器であり、内部にナトリウム漏えい用のノズルが設けられている。ノズルからはコラム状にナトリウムが滴下し、下端面にナトリウムプールを形成する。ナトリウムプールは漏えい時間とともに拡大する。実験では、漏えい高さを変化させている。

(2) 小規模プール燃焼実験の解析結果

解析結果と実験結果の比較を第 11 図に示す。ガス温度を第 11 図(a)に示す。測定点は床面から高さ 0.5m の位置で、壁から 0.05 mm（ピーク温度の低い 4 点）及び 0.3m（ピーク温度の高い 4 点）にて周方向 90 度毎に配置されている。実験後半で解析結果は実験結果よりも保守的（高温）となり、また、温度低下開始時刻も遅くなっている。本解析におけるナトリウムプール面積は約 0.42m² となり、実験結果（約 0.28m²）よりも約 50% 過大に評価する結果となっている（第 11 図(b)）。

第 12 図に実験開始後 40min (2,400sec) でのプール表面を示す。図に示すように、プール表面にパンケーキ状に反応生成物が付着しており、実験では燃焼が抑制されたものと考えられる。またパンケーキ状の物質は比較的厚く堆積しており、ナトリウムがよりパンケーキ状の物質に捕捉されたと思われる。解析ではこれらの影響は無視しており、結果的にプール面積を過大に評価したのと考えられる。この燃焼抑制効果の影響評価として、単純にプール燃焼量が以下の形で抑制されるモデルを仮定し評価した。評価結果を第 13 図に示す。

$$N_{Na}^* = N_{Na} \frac{\text{計算セル中ナトリウム質量}}{\text{計算セル中プール全質量}} \quad (23)$$

ここで N_{Na} は(9)式から計算される理想的燃焼量である。第 13 図(a)に示すように、燃焼抑制効果を考慮することで、ガス温度は実験への整合性が高くなることが確認された。ただし、実験で見られた燃焼抑制効果は小規模プールで顕著に表れる現象であり、保守性の観点を踏まえ SPHINC S では考慮しないこととする。

第 11 図(c)～(h)に漏えい中心 (r=0m) から各位置におけるプール下端（床面）ライナ温度の時刻歴変化を示す（中心以外は周方向 90 度毎の分布）。実験終了後でのプール半径は約 0.3m であり、第 11 図 実験結果との比較 (RUN-F7-1) (1/4) (c)～(g)におけるライナ温度の急激な上昇はナトリウムの到達時刻となる。解析では r=0.1m まではほぼ実験と同じ時刻に温度が上昇しているが、それ以降（第 11 図 実験結果との比較 (RUN-F7-1) (1/4) (f)～(g)）では実験よりも若干早い時刻でナトリウムが到達している。また、全体的に実験結果に比べ温度を保守的に評価している。第 13 図(b)に示すように、燃焼

抑制効果を考慮すれば、ライナ温度は実験結果と概ね整合する。なお、**第 11 図(c)～(e)**において 1500s 付近で温度上昇が顕著に見られているが、これは未燃焼ナトリウムの供給によりナトリウム温度の上昇が抑制されていたものが、供給停止 (1,505s) ^[24]により緩和されたためである。

雰囲気中の酸素及び水蒸気の濃度変化については、**第 11 図(i)及び(j)**にそれぞれ示すとおり、酸素濃度は実験後半で若干解析の方が低下しているものの、概ね実験結果と整合している。また、エアロゾル濃度の分布も同様に、実験後半で濃度を過大に評価する傾向があるものの、概ね実験と整合している (**第 11 図(k)**)。

以上より、SPHINCSでは、小規模プールに見られるプール表面への反応生成物付着に伴う燃焼抑制効果を考慮していないため、ガス温度やナトリウムプールの広がり(プール面積)を高めに評価する。この結果、ナトリウム燃焼量が増加しプール下端ライナ温度を保守的に評価するものの概ね実験結果を再現しており、ナトリウムプールの広がりを含めたプール燃焼モデルの妥当性が確認された。

4.6 マルチセルプール燃焼実験(RUN-D3)解析

(1) マルチセルプール燃焼実験(RUN-D3)の概要

RUN-D3 は、ナトリウムプール燃焼の隣接する部屋への影響(熱及び物質の移行挙動)を調べるための実験^[25]であり、1994年に原子力機構(当時は動燃)にて実施したものである。

マルチセルプール燃焼実験装置の概要を**第 14 図及び第 15 図**に示す^[25]。実験装置はプール燃焼実験(RUN-D1)と同じものを用い、装置内を図に示すように2枚の仕切り板で分離することで水平方向2セルとしている。プール燃焼もRUN-D1実験と同様に1.5m×1.5mのプール容器に500℃のナトリウムを約0.46kg/sで2min(総量約55kg)供給している。

実験では、両セルの温度、酸素濃度並びにエアロゾル濃度を計測している。

(2) マルチセルプール燃焼実験の解析結果

実験結果とのガス温度の比較を**第 16 図**に示す。燃焼室に関しては、実験ではプールに近い位置では高い温度履歴(図中○(床面から約0.4m)、△(同約1.3m))となっているが、その他の位置では概ね解析結果と一致している。また、連通室についても燃焼室と同様に解析結果が、一部を除き実験結果と整合している。なお、連通室で一部温度の低い領域が見られているが、これは開口部よりも下方であり、温度成層化が見られていると考えられる。

第 17 図にコンクリート温度の実験結果との比較を示す。燃焼室に関しては、解析結果は実験結果の範囲にある。連通室に関しては若干実験結果よりも高めに推移するものの、ガス温度の解析結果と実験結果との整合性も考慮し、解析結果は妥当であるといえる。

第 18 図にナトリウムプール直下にある燃焼皿ライナ温度の比較結果を示す。実験ではナトリウムを120sで充填するため、解析では受皿中心と周辺部での温度変化の時間遅れは概ね充填時間に相当しているものの、実験では温度上昇の時間遅れが大きくなってい

る。実験ではライナ変形等により下端部に傾斜が発生し、その影響で初期のプール広がり及び燃焼が部分的となったことが考えられる。このためかこれまでの妥当性解析と比較すると、解析ではライナ温度を若干低めに評価する傾向が見られる。

第 19 図に解析における、浮力差に伴う対流通気量 (Buoyancy driven) 及び圧力差に伴う対流通気量 (Pressure driven) の比較を示す。実験では通気量全体の測定は行われておらず、また、これらの通気量を分離して計測することは困難であり、直接的な妥当性評価はできないものの、部屋間の対流通気に占める浮力差起因の割合は高く、温度変化は実験結果と整合しており、対流通気モデルは妥当であるといえる。

第 20 図にそれぞれの部屋の酸素濃度並びにエアロゾル濃度の比較結果を示す。酸素濃度については 2,000s 以降で解析結果は若干濃度低下が遅くなる傾向があるものの、概ね実験結果と整合している。なお、解析では燃焼室の方が酸素濃度は低下しているものの、実験では、一部連通室側の酸素濃度の方が低下している傾向が見られるが、連通室側の酸素濃度は図に示すように位置により若干変化しており、明確な違いにはなっていないと考えられる。エアロゾル濃度については、燃焼室及び連通室における濃度上昇の時間遅れは解析と実験で一致しており、対流通気モデルが妥当であることがいえる。また、実験では約 500s~1,000s の間で解析結果よりも高い濃度推移を示しているが、これは受皿ライナ温度 (**第 18 図**) に見られるように、実験初期で比較的燃焼に乱れが生じていた可能性があり、燃焼生成物のプールへの落下割合が変化したことが予想される。また、解析では実験後半で連通室側の濃度の方が若干ではあるが上昇している。これは燃焼室側のガス温度が高く、熱拡散に伴う壁面付着量が増加したことと、若干ではあるが壁面、床面面積が連通室側で小さくなっているためである。

以上より、実験では特に初期において燃焼形態が不明な部分があり、SPHINCS では、燃焼皿ライナ温度やエアロゾル濃度に違いが見られるものの、ナトリウム燃焼を伴わない連通室でのガス温度、コンクリート温度、エアロゾル濃度は概ね実験結果と整合しており、複数部屋間の対流通気を含めた燃焼解析の妥当性が確認された。

4.7 ナトリウム漏えい燃焼実験-II (RUN-D4) 解析

(1) ナトリウム漏えい燃焼実験-II (RUN-D4) の概要

本実験は 1995 年に発生した「もんじゅ」2 次系ナトリウム漏えい及び燃焼の原因究明の一環として、ダクトやグレーチング等の実際の構造物を模擬したモックアップ実験^{[26], [27]}であり、1997 年に原子力機構 (当時は動燃) にて実施したものである。

ナトリウム漏えい燃焼実験-II 実験装置概要を**第 21 図**に示す^{[26], [27]}。ナトリウムの漏えいは実際と同様に熱電対 (**第 21 図**中の温度計) より 480°C、約 40~50g/s で約 220 分間漏えいさせている (総漏えい量約 690kg)。

実験では、各位置での温度分布、水蒸気、水素濃度分布、エアロゾル分布が測定されている。なお、実験では約 3hr 後に床ライナが損傷し、ナトリウムが直接コンクリートと反応しており、本妥当性評価は実験開始後から 3hr 程度までを対象とする。

(2) ナトリウム漏えい燃焼実験-II の解析結果

第 22 図に解析結果と実験結果との比較を示す。ガス温度については第 22 図(a)に示すように解析は室内平均のため実験結果に比べ若干低めの評価となっている。測定点は燃焼影響が比較的大きい箇所に配置されており、その中での代表点をプロットしているが、漏えい点付近でガス温度が高い傾向にある。コンクリート温度(第 22 図(c))は概ね実験と整合している。以上より、解析結果は妥当であると考えられる。

床面におけるライナ温度については第 22 図(b)に示すように、平均値では立ち上がりを実験に比べ穏やかであるものの、漏えい中心では実験結果と同様な立ち上りを示す一方で、全体的な温度は約 100℃程度実験よりも低い結果となっている。実験ではライナ最高温度が約 800℃程度まで上昇しているが、これは他のプール燃焼実験(第 9 図(c)、第 11 図(c)、第 18 図)と比較しても約 100℃以上高い結果となっている。実験では燃焼領域の可視化のためカメラが装置内に組み込まれており、視界を確保するため相当量の空気がカメラから流出している。このため、通常のプール燃焼で見られる自然対流による空気の供給ではなく、強制対流による空気の供給が起こったものと考えられる。

酸素濃度(第 22 図(d))については、解析では初期の酸素濃度低下傾向が緩やかなものの、低下幅は概ね実験結果と整合しており、解析結果は妥当であると考えられる。水蒸気濃度の時刻歴変化を第 22 図(e)に示す。実験では、計測ライン通過中の吸湿が指摘されており^[27]、その影響を補正したデータ(図中△)を併せて示している。解析結果は図に示すように、補正したデータと概ね一致しており、解析は妥当であると考えられる。なお、実験結果では 3hr 以降で水蒸気濃度が上昇しているが、これはライナ破損によるナトリウムとコンクリートとの反応で周辺コンクリートが加熱され、コンクリートからの水分放出が増加したためと考えられる。

水素濃度については第 22 図(f)に示すように、再結合割合を 90%とすることで実験結果を概ね包絡しており、本モデルを用いた解析が妥当であるといえる。なお、3hr 以降で 1,000vol ppm を超える値が実験で計測されているが、これはナトリウム-コンクリート反応で水素が直接生成されたためと考えられる。

雰囲気におけるエアロゾル濃度については第 22 図(g)に示すように、初期時刻歴において解析結果は実験結果よりも若干低目となるが、1hr~3hr の範囲では概ね実験結果の範囲内となっており、本モデルが妥当であることが確認された。なお、初期については、実験では滴下したナトリウムの飛散が観察されており、液滴燃焼に伴うエアロゾル発生がより多くなったためと考えられる。

以上より、SPHINCSにより総合的なナトリウム燃焼現象としてナトリウム漏えい燃焼実験-II (RUN-D4) の解析を行った結果、ライナ温度については、実験装置特有の影響で過小評価となる傾向が見られたものの、その妥当性が確認された。

4.8 重要現象に対する不確かさ

4.2 節から 4.7 節で実施した妥当性確認では別途不確かさ評価を行い、その感度を把握している。第 6 表に不確かさ評価結果概要を示す。

5. 実機解析への適用性

5.1 重要現象への適用性

(1) 液滴化（スプレー燃焼）

液滴化は入力条件となるため妥当性確認は不要であるが、スプレー燃焼実験解析により、液滴形状が予測された条件での妥当性確認及び感度解析を実施した。SPHINCSでは、質点近似モデルを用いているため、ガス圧力値を比較することで実験との整合性を確認し、実験との整合性を確認した。

(2) 燃焼及び反応熱移行（スプレー燃焼）

単一液滴燃焼実験解析により、液滴単体の燃焼量及び着火位置の観察結果について実験結果と整合することを確認した。また、スプレー燃焼実験解析により、スプレー状の燃焼及び周辺ガスへの熱移行について、体系内でのガス圧力挙動を比較することで、実験を精度良く予測することを確認した。

以上より、SPHINCSは、スプレー燃焼に伴うガス圧力増加等の現象を精度よく予測するため、スプレー燃焼に適用できる。

(3) プール拡大挙動（プール燃焼）

小規模プール燃焼実験解析より、SPHINCSは、プール拡大挙動を実験よりも50%高めに評価する。また、実験の後半においても解析ではプール燃焼量を多く評価し、ガス温度、ライナ温度等を高めに評価する。

以上より、SPHINCSは、プール拡大挙動を過大に評価し、また、反応生成物による燃焼抑制効果を加味しないためプール燃焼量を高めに評価するため、プール燃焼に適用できる。

(4) 燃焼及び反応熱移行（プール燃焼）

プール燃焼実験解析により、プール面積が一定の状態においてSPHINCSは、ガス温度や酸素濃度等の熱移行・物質移行を精度良く評価することを確認した。ただし、プール燃焼実験では燃焼皿側壁の影響でプール燃焼による反応生成物がより多くプール側に落下したことが考えられ、エアロゾル濃度は高めの評価となった。

また、同様に、小規模プール燃焼実験、マルチセルプール燃焼実験及びナトリウム漏えい燃焼実験-IIの解析を実施し、実験を精度良く予測できることを確認した。

以上より、SPHINCSは、プール燃焼に適用できる。

(5) 熱伝導（雰囲気・構造物への熱移行）

プール燃焼実験、小規模プール燃焼実験、マルチセルプール燃焼実験及びナトリウム漏えい燃焼実験-IIの解析により、ライナ温度及びコンクリート温度の実験結果を精度良く予測できることを確認した。

以上より、SPHINCSは、構造の熱伝導に適用できる。

(6) 対流熱移行（雰囲気・構造物への熱移行）

小規模プール燃焼実験、マルチセルプール燃焼実験及びナトリウム漏えい燃焼実験-IIの解析より、雰囲気ガス温度、周辺壁のライナ又はコンクリート温度の実験結果を精度良く予測できることを確認した。

以上より、SPHINCSは、対流熱移行に適用できる。

(7) 輻射熱移行（雰囲気・構造物への熱移行）

スプレイ燃焼実験解析により、実験で1箇所計測された全熱流束量と、解析で評価された平均量が概ね整合することを確認した。実験ではカバーをすることで輻射の影響を除いた計測値との比較により輻射と対流熱移行とを分離しているが、カバー経由又は雰囲気エアロゾルを介した輻射の影響が示唆されており、別途実験結果をもとに評価された対流熱移行量は解析と良い精度で一致している。また、プール燃焼実験解析により、解析では約30%程度実験結果よりも過大に全熱流束を評価しているが、実験では同様に1箇所のみで解析では平均値であること、周辺熱流束をもとに評価されたコンクリート温度は実験結果を精度良く予測できることに加え、実験において推定された輻射熱流束の寄与率（約60%）と解析結果は整合していることから、解析における輻射熱移行量は実験と整合している。

以上より、SPHINCSは、直接計測ではないものの周辺への輻射熱流束評価は実験と整合しており、輻射熱移行に適用できる。

(8) 質量・運動量移行及びガス成分濃度移行（雰囲気・構造物への質量・運動量移行）

マルチセルプール燃焼実験解析により、開口部を介した酸素濃度及びエアロゾル濃度について実験結果を精度良く予測できることを確認した。また、ナトリウム漏えい燃焼実験-II 解析により、コンクリートからの水分放出を考慮した水蒸気濃度について実験結果を精度良く予測できることを確認した。

以上より、SPHINCSは、質量・運動量移行及びガス成分濃度移行に適用できる。

(9) エアロゾル移行（雰囲気・構造物への質量・運動量移行）

プール燃焼実験、小規模プール燃焼実験、マルチセルプール燃焼実験及びナトリウム漏えい燃焼実験-IIの解析により、プール面積を一定にするために燃焼皿を設置したプール燃焼実験では、実験に比べ過大にエアロゾル濃度を評価するものの、そのほかの実験解析では実験を精度よく予測することを確認した。

以上より、SPHINCSでは、実験特有の条件により一部実験結果よりもエアロゾル濃度が高めとなるが、それ以外では実験と整合しており、エアロゾル移行に適用できる。

(10) 化学反応（その他ナトリウム特有の物理現象）

ナトリウム漏えい燃焼実験-IIの解析より、水蒸気濃度及び水素濃度について実験を精度良く予測できることを確認した。

以上より、SPHINCSを用いた雰囲気中での化学反応により実験を精度良く予測

するため化学反応に適用できる。

5.2 試験装置のスケーリング

(1) 単一液滴燃焼実験

スプレー燃焼の妥当性確認として実施している単一液滴燃焼実験では、滴下する液滴の燃焼特性を評価するものである。燃焼特性として着火前後の評価が可能な落下高さ及び実機と同程度の液滴径が重要であり、実験では約 2.7m の落下高さ、液滴直径約 4mm であり、本試験装置で得られた結論を実機に適用できる。

(2) スプレー燃焼実験

スプレー燃焼及び周辺への熱移行の妥当性確認として実施しているスプレー燃焼実験では、スプレー燃焼高さが約 4m であり、着火後の液滴燃焼が支配的となる十分な高さを有している。また、熱移行は輻射及び自然対流となり、輻射の観点では温度差が、自然対流の観点ではグラスホフ数 (Gr) 及びプラントル数 (Pr) がスケーリングとして重要となる。温度差及びプラントル数については、実機と同じナトリウムによる燃焼としており、本試験装置で得られた結論を実機に適用できる。また、グラスホフ数で重要となる代表寸法 (装置高さ) は実機に比べ約 1/2~同程度であり、グラスホフ数で最大 1 桁実機よりも小さくなるが、十分に発達した乱流自然対流領域であり、本試験装置で得られた結論を実機に適用できる。なお、実機に比べ容積が小さく、実験では密閉空間としているため、燃焼に伴う圧力上昇は実機に比べ大きく、また、急激に減衰するが、実験初期における最高圧力等を評価対象としているためその影響は比較的小さいといえる。

(3) プール燃焼実験

プール燃焼、周辺への熱移行 (輻射モデル) 及びエアロゾル移行の妥当性確認として実施しているプール燃焼実験では、容器高さを約 3m、プール燃焼領域を 1.5m×1.5m としている。スプレー燃焼実験装置と同様に、温度差、プラントル数及び実験装置高さの観点では本試験装置で得られた結論を実機に適用できる。また、プール燃焼における代表寸法である等価直径については、実機における大規模漏えいに対してはグラスホフ数が 2 桁以上小さくなるものの、十分に発達した乱流自然対流領域であり、本試験装置で得られた結論を実機に適用できる。

(4) 小規模プール燃焼実験装置

プール燃焼 (プール拡大挙動)、周辺への熱移行及びエアロゾル移行の妥当性確認として実施している小規模プール燃焼実験は、小規模漏えいを対象としており、漏えい条件が同じであれば実機と同様となる。したがって、本試験装置で得られた結論を実機に適用できる。

(5) マルチセルプール燃焼実験装置

プール燃焼、周辺への熱、質量、運動量移行及びエアロゾル移行の妥当性確認として実施しているマルチセルプール燃焼実験装置はプール燃焼実験装置を改良したものであり、本試験装置で得られた結論を実機に適用できる。

(6) ナトリウム漏えい燃焼実験-II 試験装置

総合的な妥当性確認として実施しているナトリウム漏えい燃焼実験-II 試験装置は、「もんじゅ」におけるナトリウム漏えい及び燃焼を模擬したものであり、全体容積は実機と異なるものの、漏えい部近傍としては実機と同条件となっている。したがって、本試験装置で得られた結論を実機に適用できる。

6. まとめ

以上より、ナトリウム燃焼に係る重要現象に関するSPHINCSの解析モデルは各試験の結果と比較して妥当であることを確認するとともに、各解析モデルの不確かさを把握した。把握した不確かさを考慮することによりSPHINCSは、ナトリウム燃焼の影響を適切に評価できる。

7. 参考文献

- [1] AESJ-SC-RK007 : 2014 原子力発電所の内部火災を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準 附属書 L.1 (NUREG/CR-6850 からの抜粋)
- [2] Yamaguchi, A., and Tajima Y., "Validation study of computer code SPHINCS for sodium fire safety evaluation of fast reactor", Nuclear Engineering and Design, 219, p.19-34, 2003.
- [3] K. K. Murata, et al., "CONTAIN/1B-Mod.1, A Computer Code for Containment Analysis of Accidents in Liquid-Metal-Cooled Nuclear Reactors", SAND91-1490 UC-610, Jan. 1993.
- [4] S. S. TSAI, "The NACOM Code for Analysis of Postulated Sodium Spray Fires in LMFBRs," NUREG/CR-1405, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1980.
- [5] J. R. Richard, R. Delbourgo, P. Laffitte, "Spontaneous Ignition and Combustion of Sodium Droplets in Various Oxidizing Atmospheres at Atmospheric Pressure", 12th Symposium (International) on Combustion, pp.39-48, (1968).
- [6] Ranz, W.E., and W.R., Marshall, "Evaporation from drops", Chemical Engineering Progress, 48, 3, p.141-146, 1952.
- [7] 山口彰, 田嶋雄次, "SPHINCS コードのスプレイ燃焼モデルの開発と検証 液滴燃焼実験解析と技術課題の摘出", JNC TN-9400 99-059, 1999.
- [8] 山口彰, 田嶋雄次, "SPHINCS コードによるナトリウムプール燃焼実験 (Run-F7) の検証解析", PNC TN9410 98-070, 1998.
- [9] Akira Yamaguchi and Yuji Tajima, "A numerical study of radiation heat transfer in sodium pool combustion and response surface modeling of luminous flame emissivity", Nuclear Engineering and Design, 236, p.1179-1191, 2006.
- [10] Fishenden, M., Saunders, O.A., "Introduction to Heat Transfer", Clarendon Press, p.180, 1959.
- [11] W. G. Brown and K. L. Solvason, "Natural Convection through Rectangular

- Opening in Partitions-1 Vertical Partitions”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 5, p. 859-868, 1962.
- [12] W. G. Brown, “Natural Convection through Rectangular Opening in Partitions-2 Horizontal Partitions”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 5, p. 869-878, 1962.
- [13] 日本機械学会, “伝熱工学資料 改訂題 5 版”, ISBN-13: 978-4888981842, 日本機械学会, 2009.
- [14] Modak, A. T., “Radiation from products of combustion”, *Fire Res.* 1, p. 339-361, 1979.
- [15] Felske, J. D. and Tien, C. L., “Calculation of the emissivity of luminous flames”, *Combust. Sci. Technol.* 7, p. 25-31, 1973.
- [16] 岡野靖, “ナトリウム化学反応平衡解析手法の開発-Gibbs 自由エネルギー極小化法に基づく Na-O-H 系化学反応平衡解析プログラム(BISHOP)の開発と検証-”, JNC TN9400 99-071, 1999.
- [17] S. Miyahara, N. Mitsutuka and H. Obata, “Development and Validation of ABC-INTG code”, PNC TN943 84-08, 1984.
- [18] Wen, C. S., “The Fundamentals of Aerosol Dynamics”, World Scientific, p. 228, 1996.
- [19] F. Gelbard and J. H. Seinfeld, “Simulation of Multicomponent Aerosol Dynamics”, *J. of Colloid and Interface Science*, 78, 2, p. 485-501, 1980.
- [20] OECD/NEA, “Nuclear Aerosols in Reactor Safety”, CSNI/SOAR, 1979.
- [21] 宮原信哉, 荒邦章, “ナトリウム液滴落下燃焼実験-予備的実験の評価-”, PNC TN9410 98-065, 1998.
- [22] 森井正他, “大規模ナトリウム漏洩燃焼実験(III)”, PNC TN9410 86-124, 1986.
- [23] 宮原信哉他, “大規模ナトリウム漏洩燃焼試験(I) -空気雰囲気におけるナトリウムプール燃焼試験, Run-D1”, PNC TN9410 87-081, 1987.
- [24] 二神敏他, “ナトリウムプール燃焼実験 Run-F7 (中間報告)”, PNC TN9410 98-074, 1998.
- [25] 大野修司, “2セル体系ナトリウム燃焼実験における熱影響の評価”, 日本機械学会 2015年度年次大会予稿集, S0820105, 9.13-16, 札幌, 2015.
- [26] 内山尚基他, “もんじゅナトリウム漏えい事故の原因究明 -ナトリウム漏えい燃焼実験-II-”, PNC TN9410 97-051, 1997.
- [27] 中桐俊男, “ナトリウム漏えい燃焼実験-II の水分移行挙動の評価”, JNC TN9400 2000-030, 2000.

第1表 ランクの定義

ランク	ランクの定義	本資料での扱い
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。

第2表 SPHINCSコードにおける物理現象のランクテーブル

分類	評価指標 物理現象	建屋健全性	機器健全性
		コンクリート温度 水素濃度 ライナ温度	水素濃度 エアロゾル濃度
スプレイ燃焼	(1) 液滴化	M	H
	(2) 燃焼(含水分との反応)	M	H
	(3) 反応熱移行	M	L
プール燃焼	(4) プール拡大挙動	M	M
	(5) 燃焼(含水分との反応)	H	M
	(6) 反応熱移行	H	L
雰囲気・構造物 への熱移行	(7) 熱伝導	H	M
	(8) 対流熱移行	M	M
	(9) 輻射熱移行	M	M
雰囲気・構造物への 質量・運動量移行	(10) 質量・運動量移行	M	H
	(11) ガス成分濃度移行	H	H
	(12) エアロゾル移行	M	H
その他ナトリウム特有 の物理現象	(13) 化学反応	M	M
	(14) ライナ腐食・減肉	H	L
	(15) Naとコンクリートとの接触	-	-

第3表 重要現象に対する解析モデル

分類	重要現象	必要な解析モデル
スプレイ燃焼	液滴化	抜山-棚沢分布モデル
	燃焼 (含水分との反応)	液滴燃焼モデル
	反応熱移行	
プール燃焼	プール拡大挙動	未燃焼ナトリウム質量保存則モデル
	燃焼 (含水分との反応)	フレイムシート燃焼モデル
	反応熱移行	
雰囲気・構造物への熱移行	熱伝導	非定常熱伝導方程式
	対流熱移行	フローネットワークモデル ・エネルギー保存 ・周辺構造物との(自然)対流熱伝達
	輻射熱移行	輻射モデル
雰囲気・構造物への質量・運動量移行	質量・運動量移行	フローネットワークモデル ・質量、運動量保存 ・ガス成分種質量保存 ・圧力勾配に伴う運動量交換 ・浮力差に伴う運動量交換 コンクリートからの水分放出モデル
	ガス成分濃度移行	
	エアロゾル移行	フローネットワークモデル 凝集・沈着モデル
その他ナトリウム特有の物理現象	化学反応	化学平衡モデル
	ライナ腐食・減肉	NaFeO型/溶融塩型腐食速度モデル (コード上での直接評価は無)
	ナトリウムとコンクリートとの接触	—

第4表 重要現象に対する妥当性確認方法

分類	重要現象	必要な解析モデル	スプレイ燃焼		プール燃焼		マルチセル燃焼	総合実験
			単一液滴燃焼実験	スプレイ燃焼実験(RUN-E1)	プール燃焼実験(RUN-D1)	小規模プール燃焼実験(RUN-F7)	マルチセルプール燃焼実験(RUN-D3)	ナトリウム漏えい燃焼実験-II(RUN-D4実験II)
スプレイ燃焼	液滴化	抜山-棚沢分布モデル	-	-	-	-	-	-
	燃焼(含水分との反応) 反応熱移行	液滴燃焼(NACOM)モデル	4.2	4.3 4.3	(4.5) ¹ (4.5) ¹	(4.5) ¹ (4.5) ¹	(4.7) ¹ (4.7) ¹	(4.7) ¹ (4.7) ¹
プール燃焼	プール拡大挙動	未燃焼ナトリウム質量保存則モデル				4.5		4.7
	燃焼(含水分との反応) 反応熱移行	フレイムシート燃焼モデル		(4.3) ¹ (4.3) ¹	4.4 4.4	4.5 4.5	4.6 4.6	4.7 4.7
雰囲気・構造物への熱移行	熱伝導	非定常熱伝導方程式		(4.3) ²	4.4	4.5	4.6	4.7
	対流熱移行	フローネットワークモデル エネルギー保存 周辺構造物との(自然)対流熱伝達 輻射モデル		(4.3) ²	(4.4) ²	4.5	4.6	4.7
雰囲気・構造物への質量・運動量移行	輻射熱移行	輻射モデル		4.3	4.4	(4.5) ²	(4.6) ²	(4.7) ²
	質量・運動量移行	フローネットワークモデル 質量・運動量保存 圧力勾配に伴う運動量交換 浮力差に伴う運動量交換 コンクリートからの水分放出モデル					4.6	
雰囲気・構造物への質量・運動量移行	ガス成分濃度移行	フローネットワークモデル(同上)					4.6	4.7
	エアロゾル移行	凝集・沈着モデル ブラウン拡散、熱泳動、重力沈降、凝集、沈着			4.4	4.5	4.6	4.7
その他ナトリウム特有の物理現象	化学反応	瞬時平衡モデル						4.7
	ライナ腐食・減肉	NaFeO型/溶融塩型腐食速度モデル (コード上での直接評価は無)	-	-	-	-	-	-
	Naとコンクリートとの接触	-	-	-	-	-	-	-

-: 4.11に記載の理由により、妥当性確認が不要である重要現象
 ()¹: 現象としては実験に含まれるが影響が小さく妥当性確認の対象外
 ()²: 直接の計測値は無いが温度分布評価で総合的に検証可能

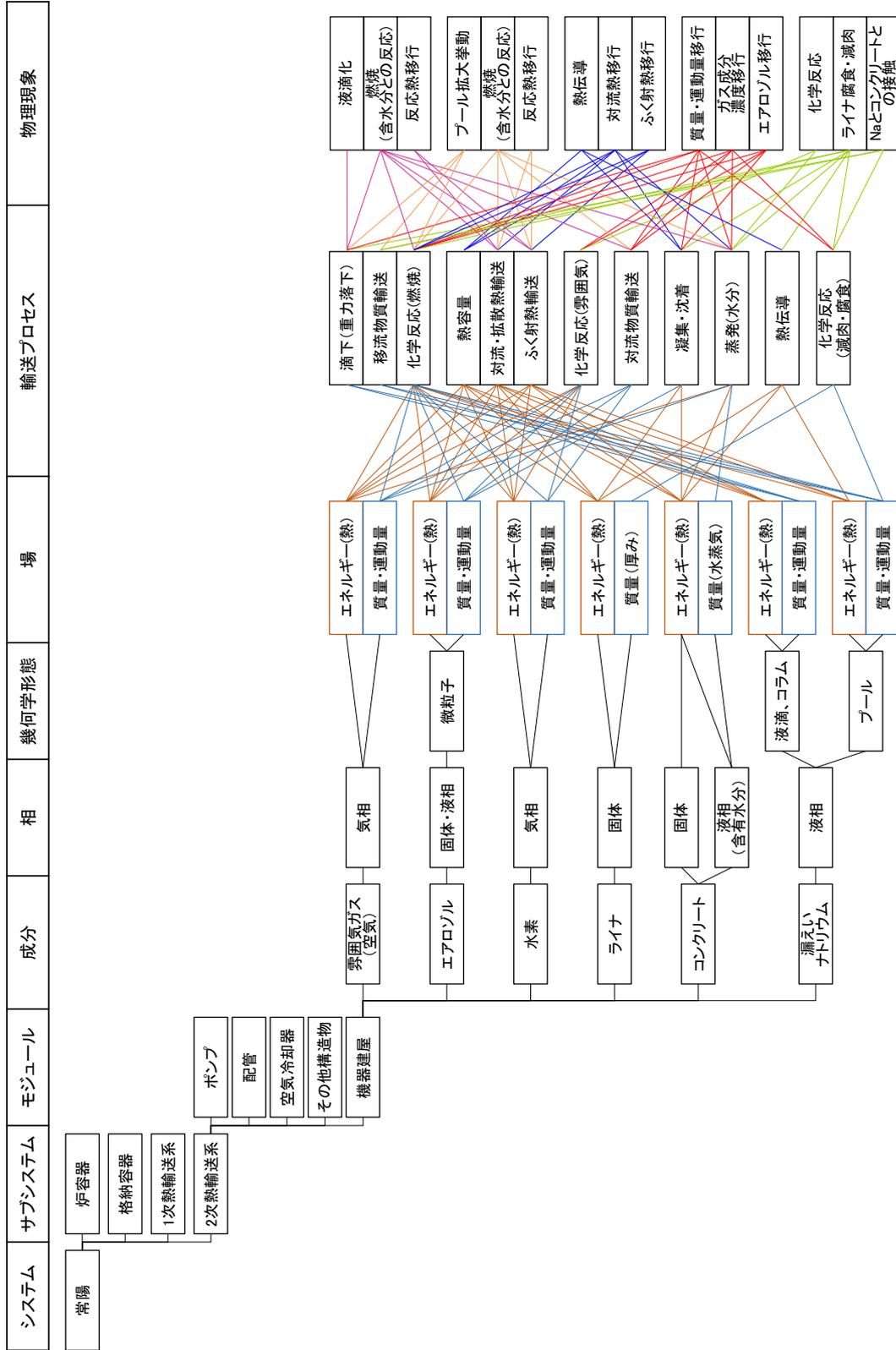
第5表 単一液滴燃焼実験結果概要

	単位	1回目		2回目		3回目	
		1	2	1	2	1	2
雰囲気酸素濃度	vol%	約21 ^{*1}	18~15 ^{*1}	約21 ^{*2}			
雰囲気露点	℃	-3.5	-7.5	-0.5~-0.7		2~4.5	
滴下時の液滴温度	℃	493				502	
電荷量評価液滴質量 ($m_c \pm \sigma_1$)	mg/滴	24.80±0.75	24.37±0.45	27.53±0.42	26.44±0.66	26.26±0.92	24.87±0.46
ノズル部での蒸発量 ($m_v \pm \sigma_2$)	mg	1.88±0.58					
初期液滴質量 ($m_c - m_v$)	mg	22.92±0.95	22.49±0.73	25.65±0.72	24.56±0.88	24.38±1.09	22.99±0.74
初期液滴直径	mm	3.74	3.72	3.89	3.83	3.83	3.75
分析液滴質量 ($m_a \pm \sigma_3$)	mg/滴	20.65±0.24	21.40±0.27	22.35±0.32	21.50±0.31	20.02±0.34	20.22±0.31
分析評価液滴直径 (881℃仮定)	mm	3.76	3.81	3.86	3.81	3.72	3.74
液滴燃焼量 ($m_b = m_c - m_v - m_a$)	mg	(2.27)	(1.09)	3.30	3.06	4.36	2.77
標準偏差 ($\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}$)	—	(±0.97)	(±0.78)	±0.78	±0.93	±1.14	±0.80
相対誤差 ((標準偏差/ m_b)×100)	%	—	—	23.6	30.4	26.1	28.9
上部測定位置での平均落下速度	m/s	1.4±0.33	1.3±0.33	1.3±0.33	—	—	—
下部測定位置での平均落下速度	m/s	5.5±0.48	5.6±0.48	5.6±0.48		5.5±0.48	
液滴落下時間	s	—	—	—		0.81	
平均燃焼速度	g/s	—	—	—		5.38×10 ⁻³	3.42×10 ⁻³
平均蒸発係数	cm ² /s	—	—	—		2.49×10 ⁻²	1.57×10 ⁻²

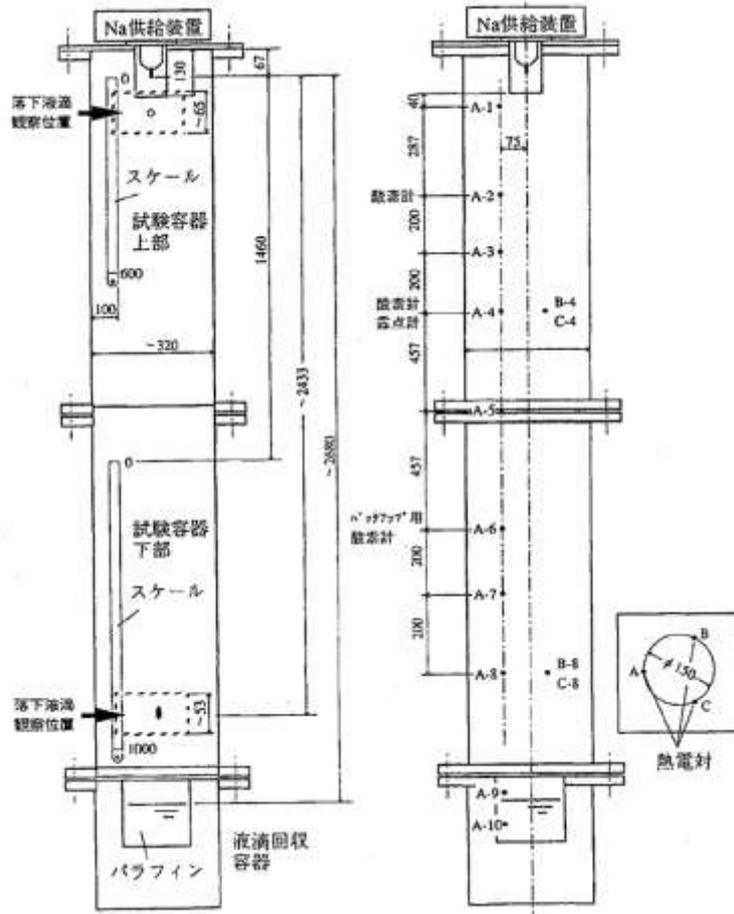
注) *1: 試験容器下部の上部計測ポート位置、*2: 試験容器上部の下部計測ポート位置
 () 内数値は実験中に雰囲気酸素濃度が低下したため、参考値とする

第6表 重要現象に対する不確かさ

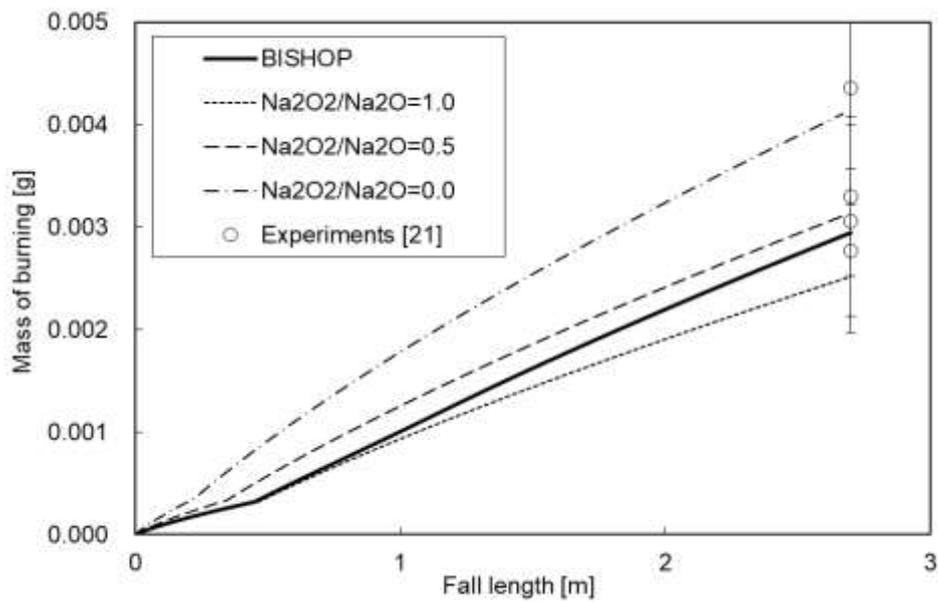
分類	重要現象	必要な解析モデル	妥当性確認	不確かさ	感度評価
スプレイ燃焼	液滴化	抜山-棚沢分布モデル	スプレイ燃焼実験	-	平均液滴径: -10%で最高圧力約+5%
	燃焼(含水分との反応) 反応熱移行	液滴燃焼(NACOM)モデル	単一液滴燃焼実験 スプレイ燃焼実験	入力値に含まれる	着火温度: -100°C(500°C)で燃焼量約+20%
プール燃焼	プール拡大挙動	未燃焼ナトリウム質量保存則モデル	小規模プール燃焼実験	入力値に含まれる	プール高さ: 約+50%でプール面積約-20%
	燃焼(含水分との反応) 反応熱移行	フレイムシート燃焼モデル	プール燃焼実験 小規模プール燃焼実験 マルチセルプール燃焼実験 ナトリウム漏えい燃焼実験-II	入力値に含まれる	燃焼面~ガス輻射率: 約±20%でガス温度約±10°C、プール下端ライナ温度約-20°C~+30°C
雰囲気・構造物への熱移行	熱伝導	非定常熱伝導方程式	プール燃焼実験 小規模プール燃焼実験 マルチセルプール燃焼実験 ナトリウム漏えい燃焼実験-II	入力値に含まれる	-
	対流熱移行	フローネットワークモデル エネルギー保存 周辺構造物との(自然)対流熱伝達	小規模プール燃焼実験 マルチセルプール燃焼実験 ナトリウム漏えい燃焼実験-II	入力値に含まれる	-
雰囲気・構造物への質量・運動量移行	輻射熱移行	輻射モデル	スプレイ燃焼実験 プール燃焼実験	入力値に含まれる	ガス~周辺壁輻射率: 約±30%で輻射熱流束約±10%、ガス温度約±10%、ガス圧力約±6%
	質量・運動量移行 ガス成分濃度移行	フローネットワークモデル 質量、運動量保存 圧力勾配に伴う運動量交換 浮力差に伴う運動量交換 コンクリートからの水分放出モデル	ナトリウム漏えい燃焼実験-II	浮力差に伴う運動量交換 (定数C: -20%~+30%) その他入力値に含まれる	定数C: 約-20%~+30%で対流通気量約-18%~+22% コンクリート水分放出量: +10%で水蒸気濃度約+7%、水素濃度約+9%
その他ナトリウム特有の物理現象	エアロゾル移行	フローネットワークモデル(同上) 凝集・沈着モデル ブラウン拡散、熱泳動、重力沈降、凝集、沈着	プール燃焼実験 小規模プール燃焼実験 マルチセルプール燃焼実験 ナトリウム漏えい燃焼実験-II	入力値に含まれる	反応生成物エアロゾルのプール落下割合: 0.75→0.95で最大エアロゾル濃度約-60%
	化学反応	瞬時平衡モデル	ナトリウム漏えい燃焼実験-II	入力値に含まれる	水素再結合割合: 0.90→0.95で水素濃度約50%



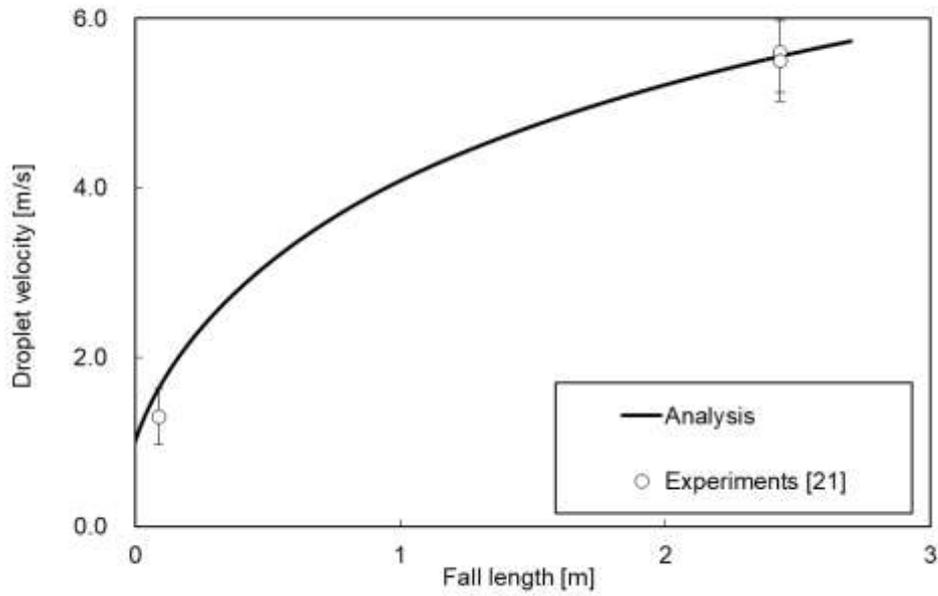
第1図 システムの階層的分類



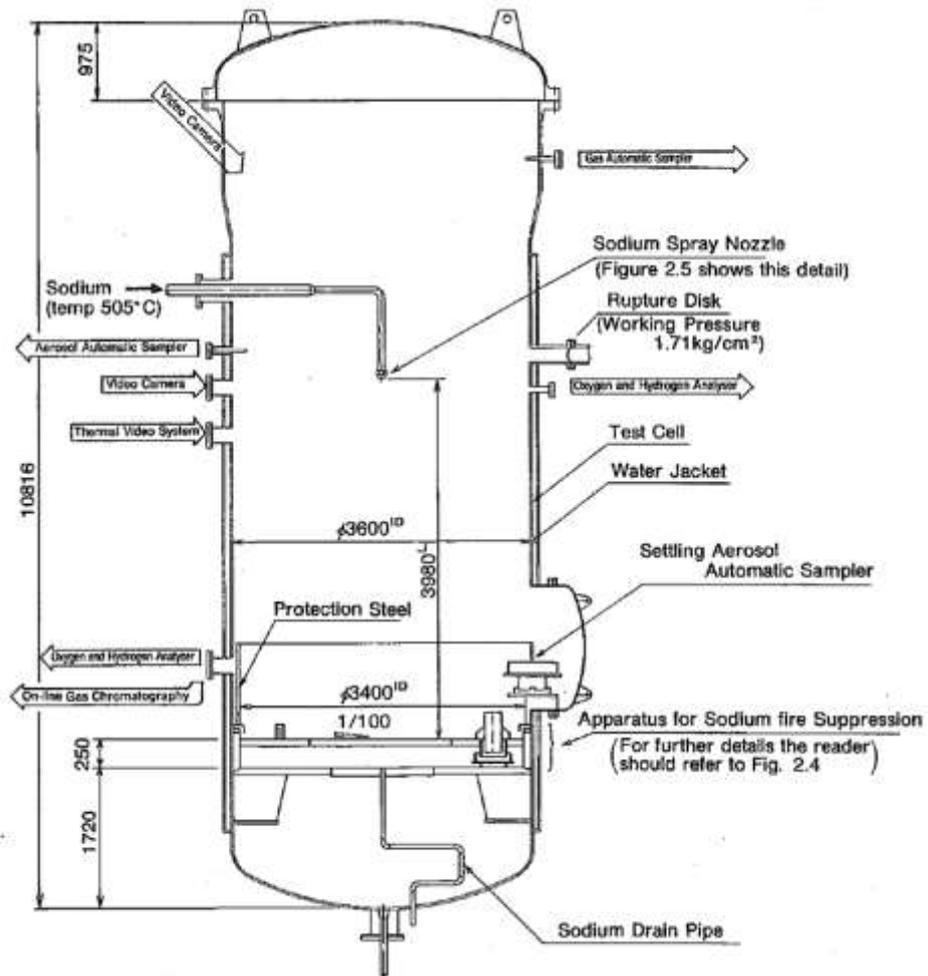
第2図 単一液滴燃焼実験装置



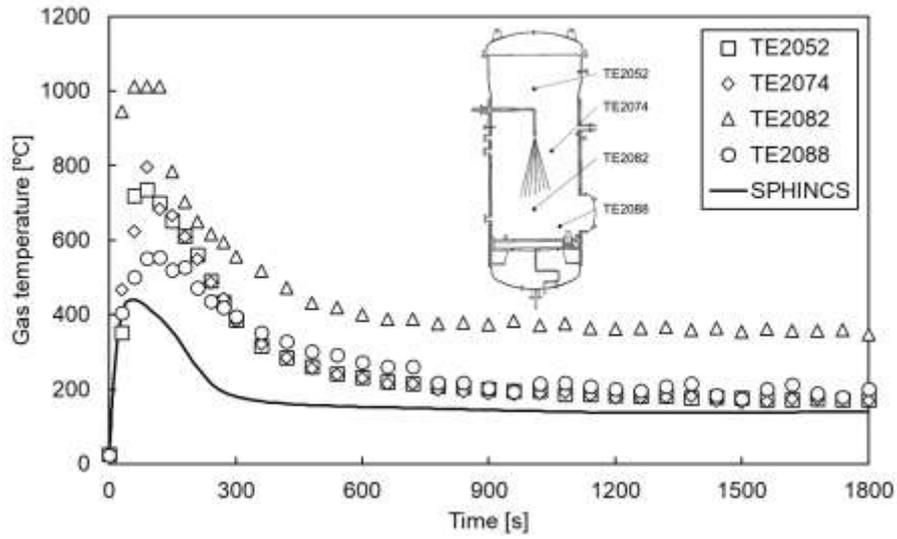
第3図 燃焼量の比較 (単一液滴燃焼実験)



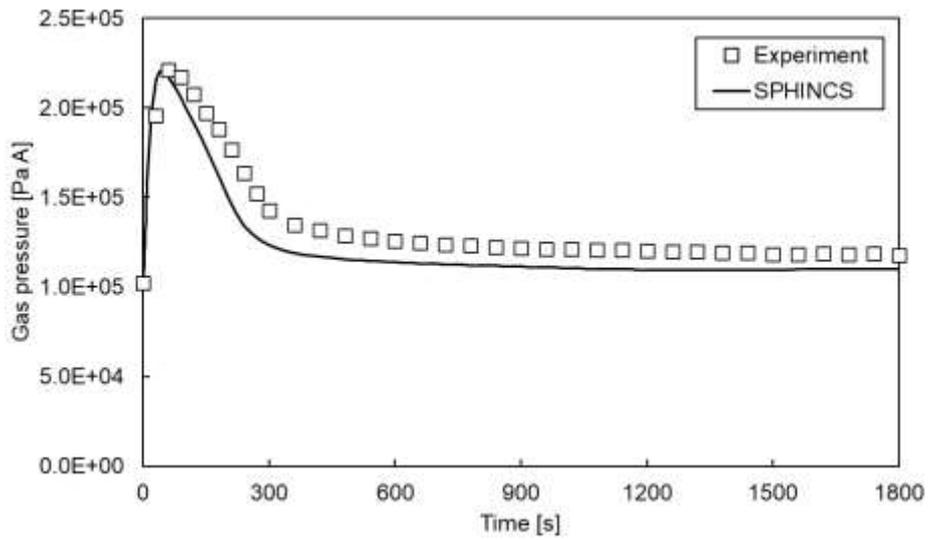
第 4 図 液滴落下速度の比較（単一液滴燃焼実験、化学反応モデル：B I S H O P）



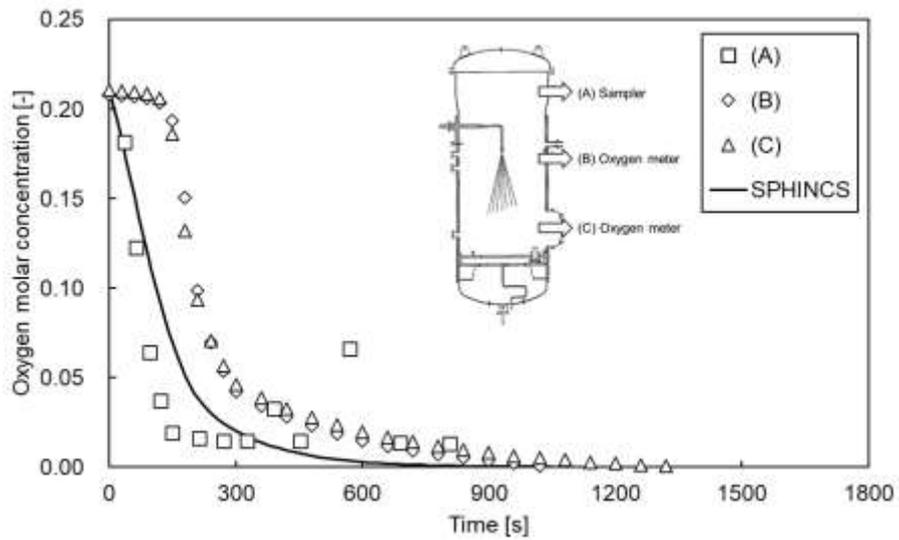
第 5 図 スプレー燃焼実験装置



(a) ガス温度時刻歴変化

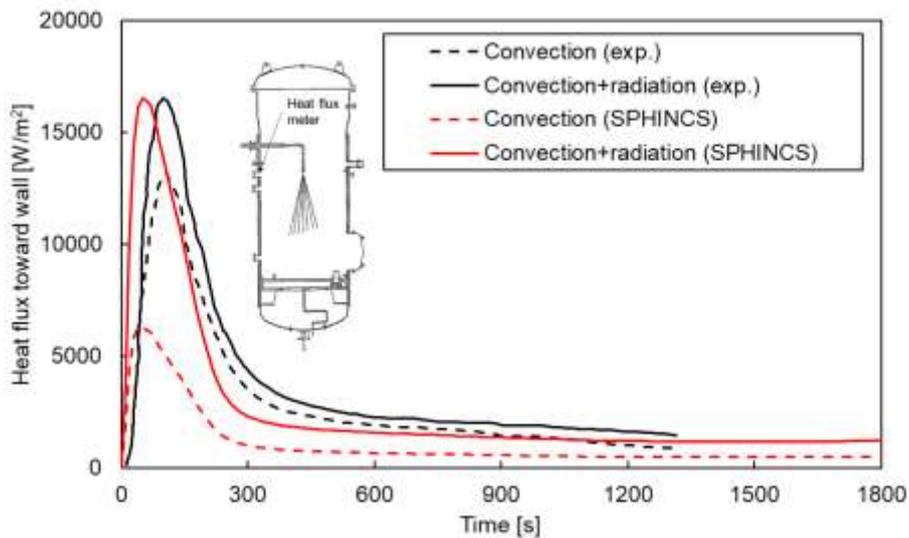


(b) ガス圧力時刻歴変化

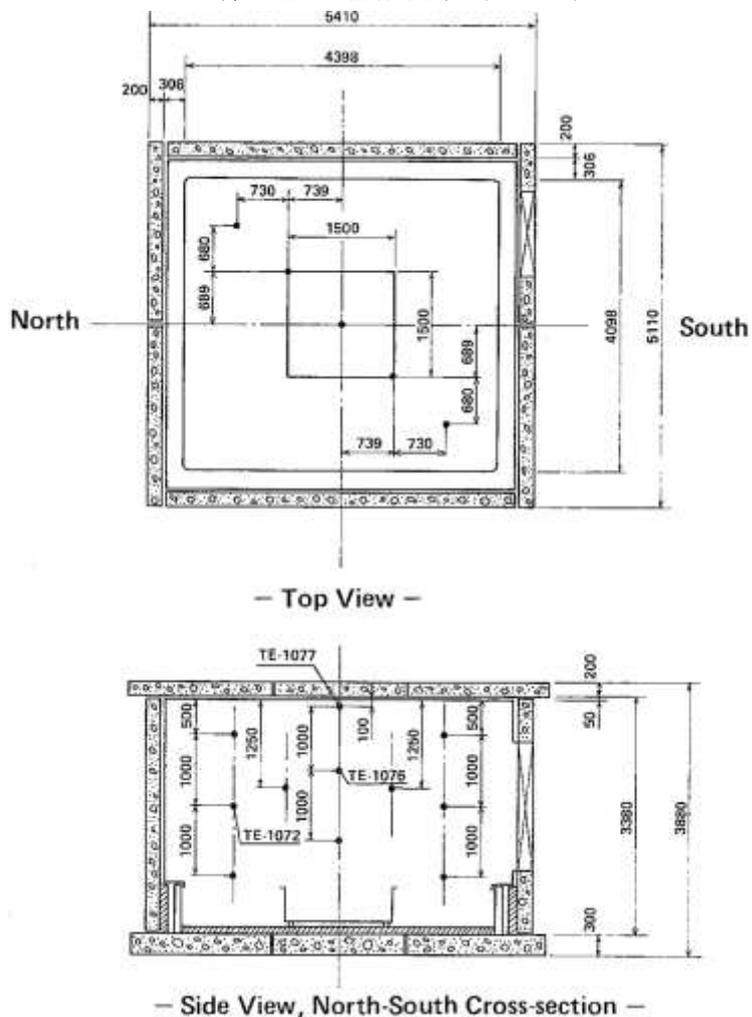


(c) 酸素濃度時刻歴変化

第6図 実験結果との比較 (RUN-E1)

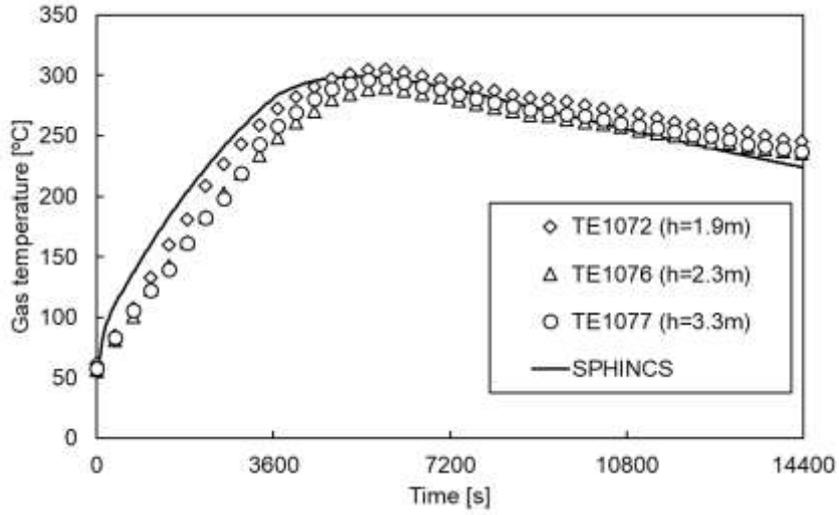


第7図 壁面熱流束 (RUN-E1)

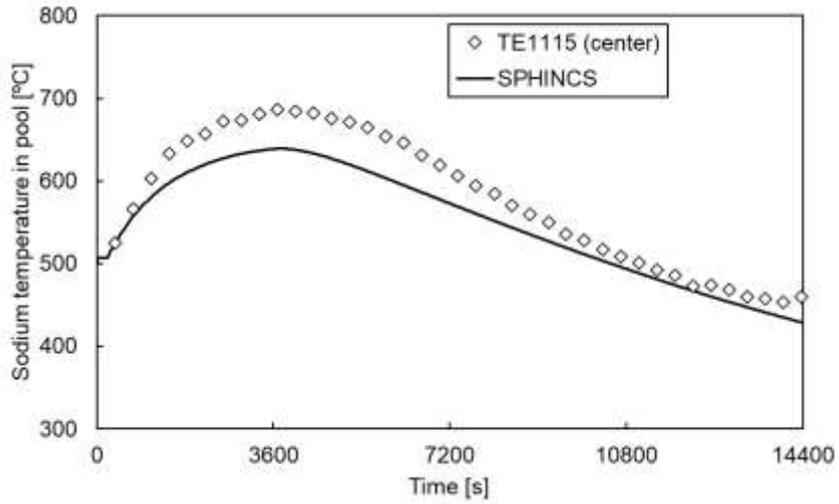


unit : mm

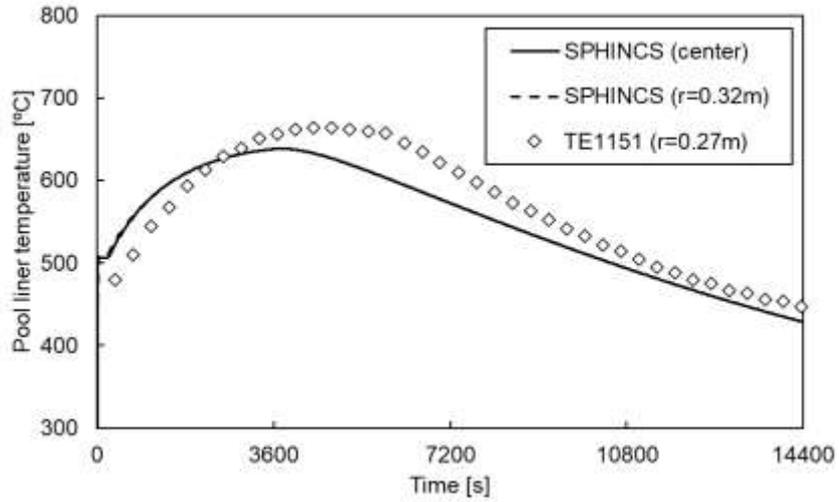
第8図 プール燃焼実験装置



(a) ガス温度時刻歴変化

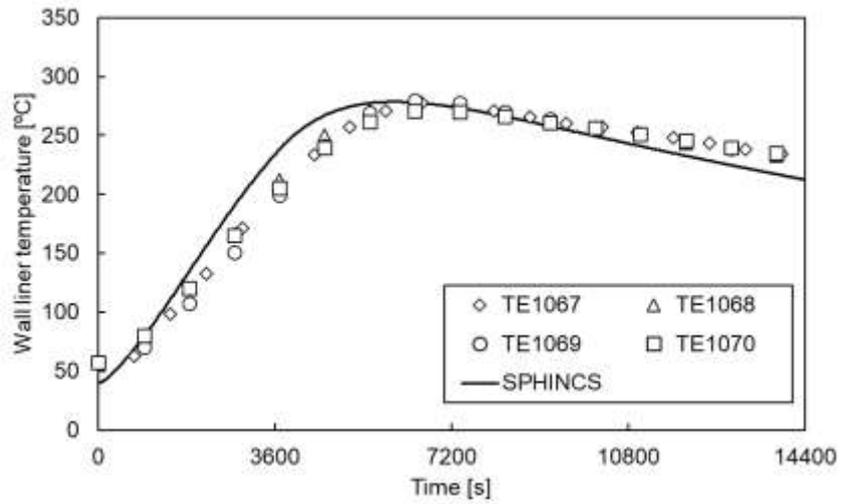


(b) ナトリウムプール温度時刻歴変化

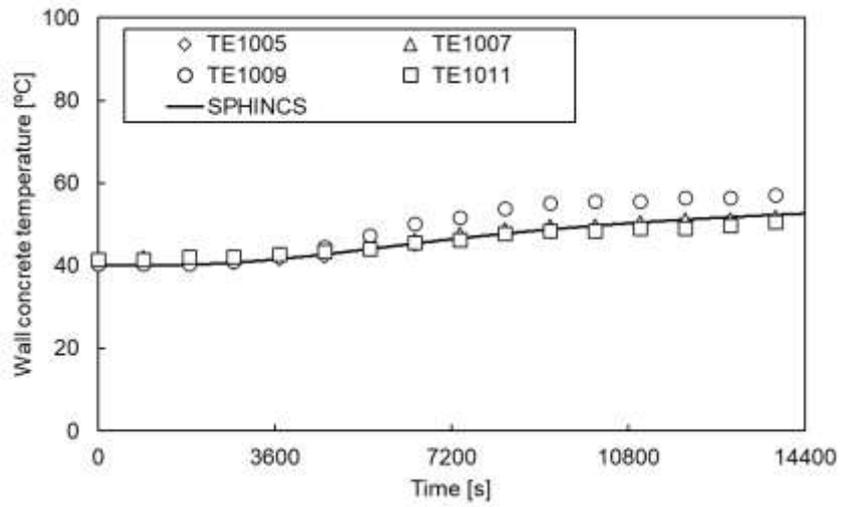


(c) プール下端ライナ温度時刻歴変化

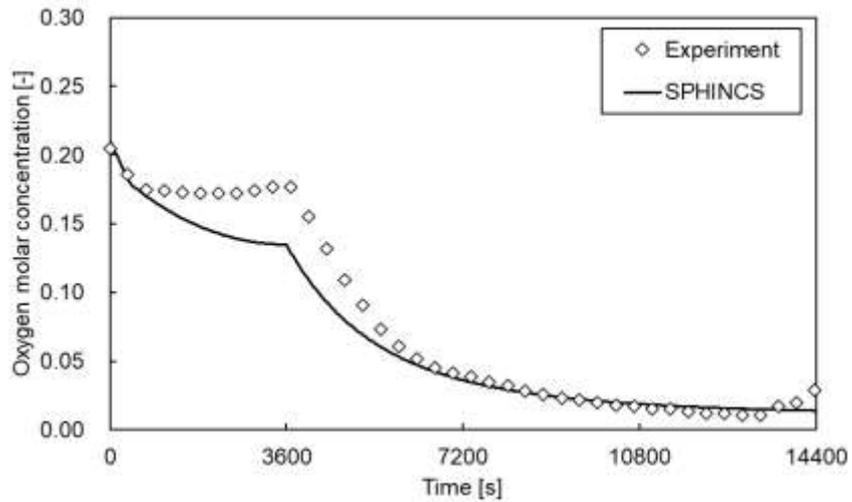
第9図 実験結果との比較 (RUN-D1) (1/3)



(d) 壁ライナ温度時刻歴変化

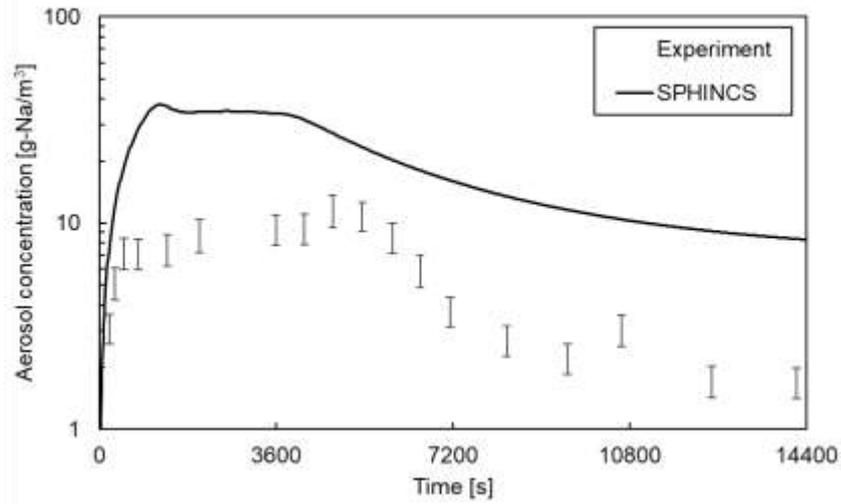


(e) 壁コンクリート温度時刻歴変化

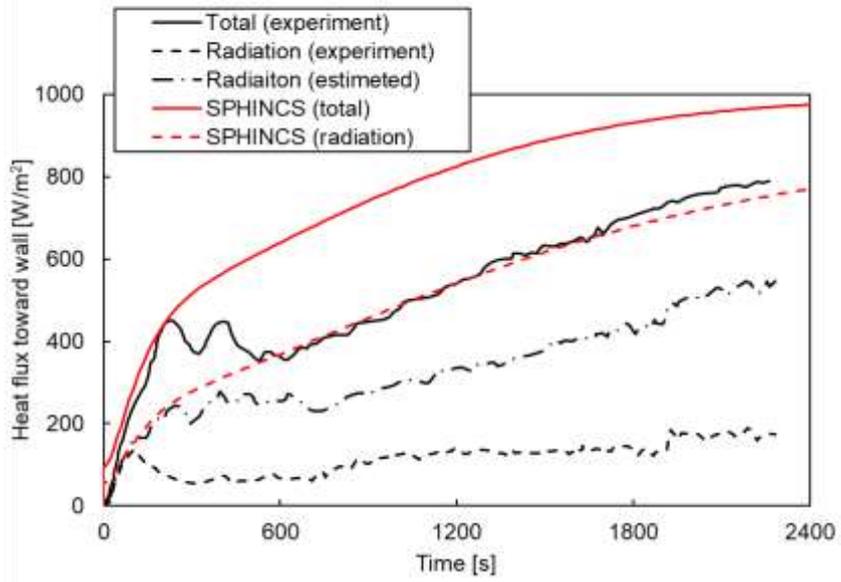


(f) 酸素濃度時刻歴変化

第9図 実験結果との比較 (RUN-D1) (2/3)



(g) エアロゾル濃度時刻歴変化

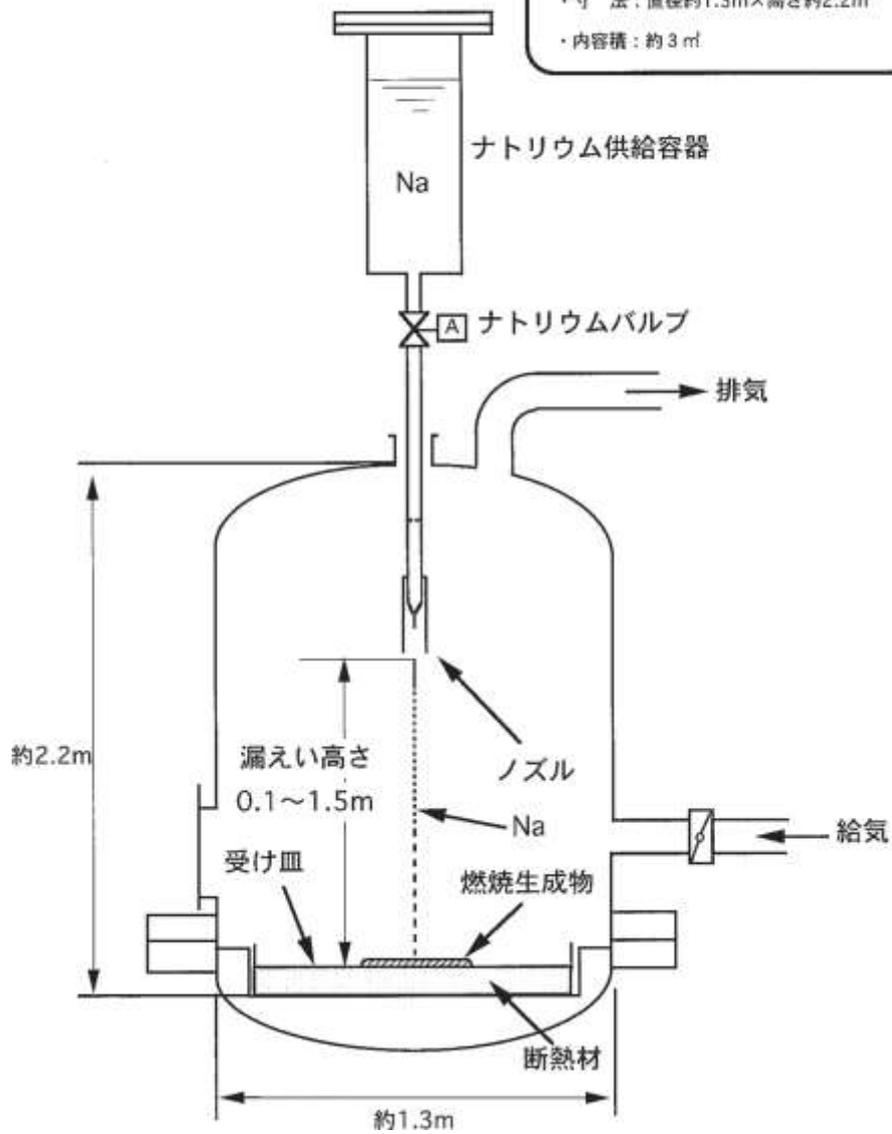


(h) 壁面熱流束時刻歴変化

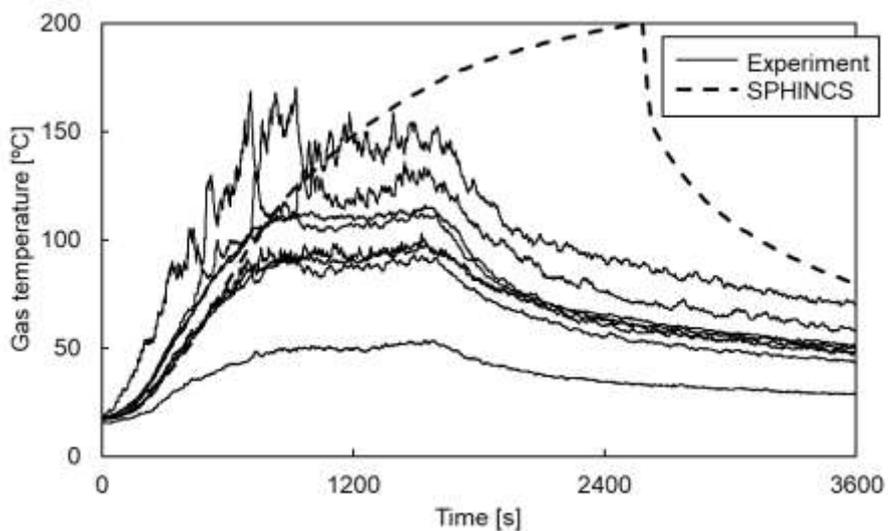
第9図 実験結果との比較 (RUN-D1) (3/3)

試験装置の仕様

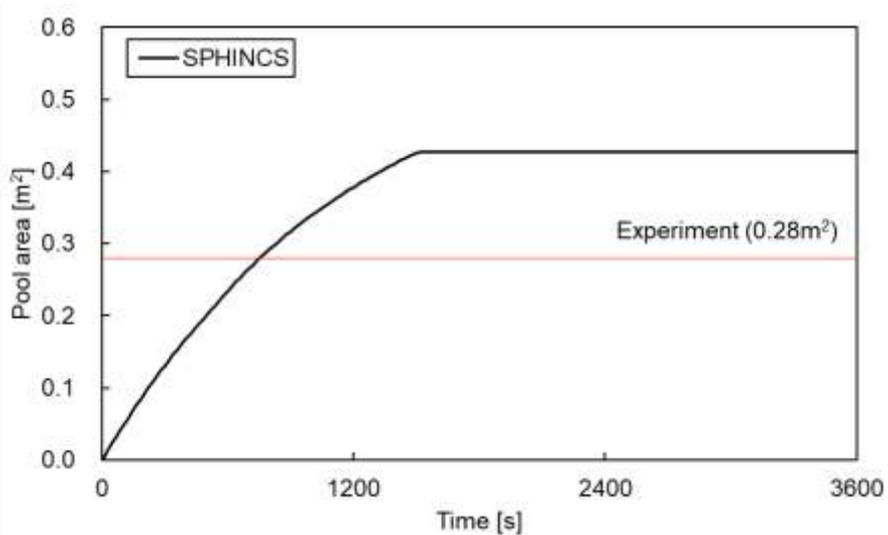
- ・試験装置名：小型密閉試験装置 (FRAT-1)
- ・寸法：直径約1.3m×高さ約2.2m
- ・内容積：約3 m³



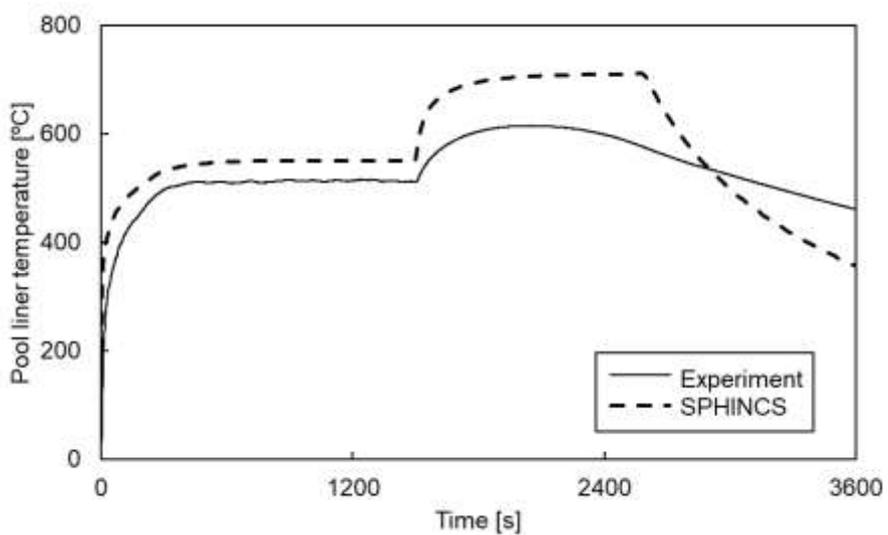
第10図 小規模プール燃焼実験装置



(a) ガス温度時刻歴変化

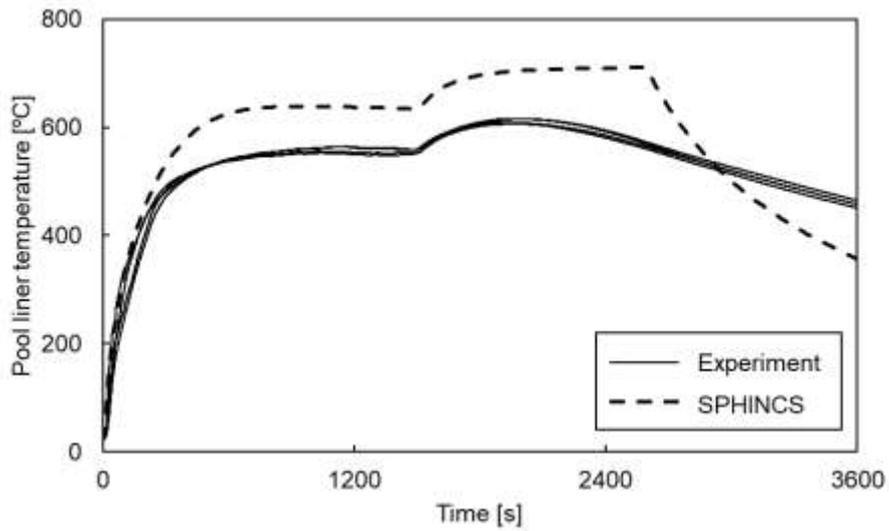


(b) ナトリウムプール面積時刻歴変化

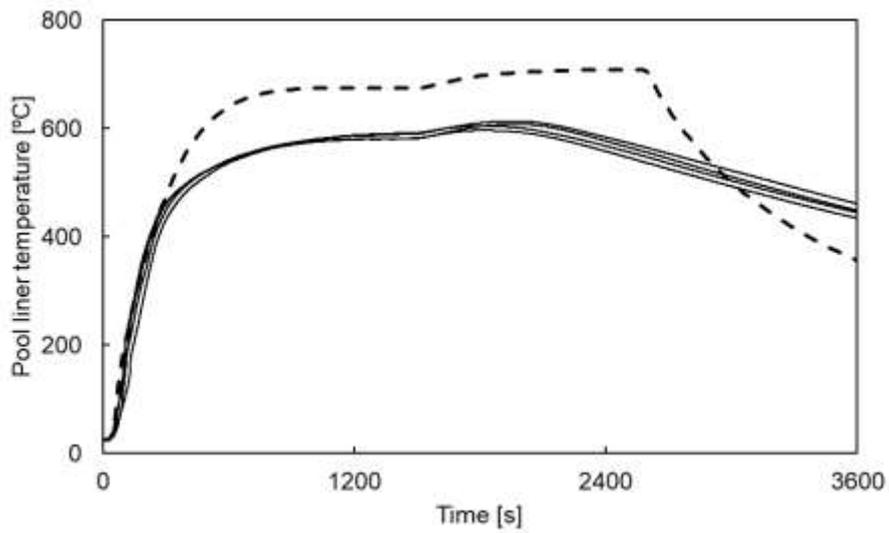


(c) プール下端ライナ温度時刻歴変化 (r=0.0m (center))

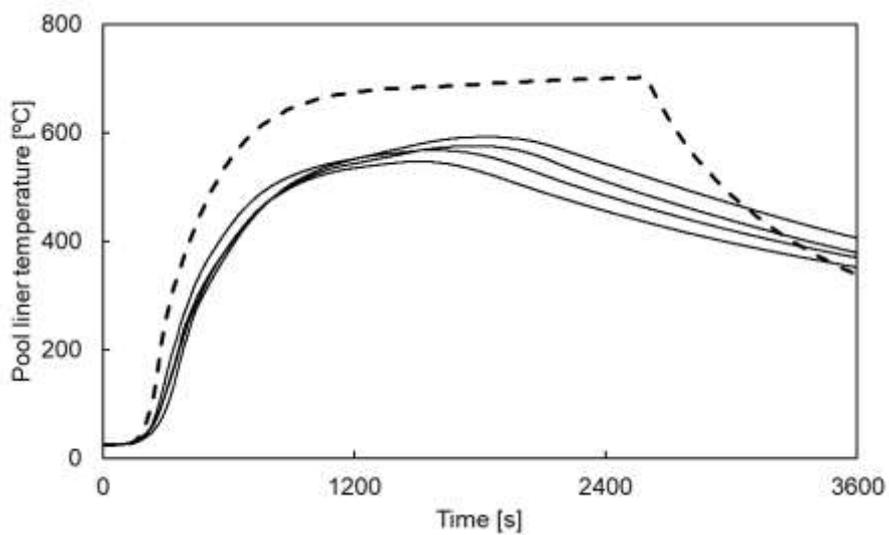
第11図 実験結果との比較 (RUN-F7-1) (1/4)



(d) プール下端ライナ温度時刻歴変化 ($r=0.05\text{m}$)

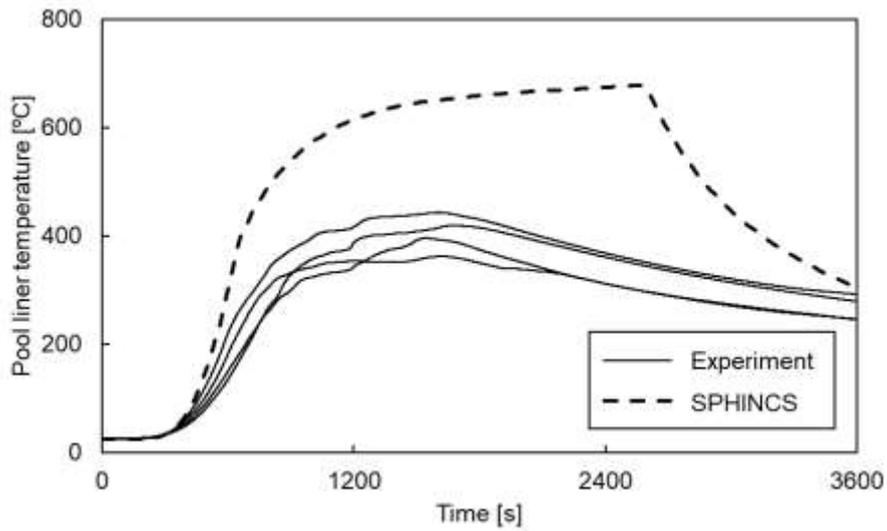


(e) プール下端ライナ温度時刻歴変化 ($r=0.1\text{m}$)

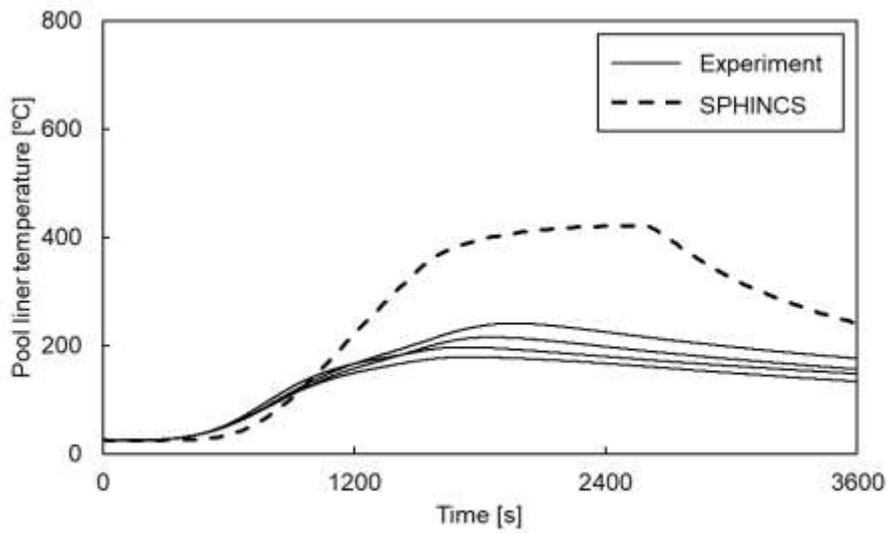


(f) プール下端ライナ温度時刻歴変化 ($r=0.2\text{m}$)

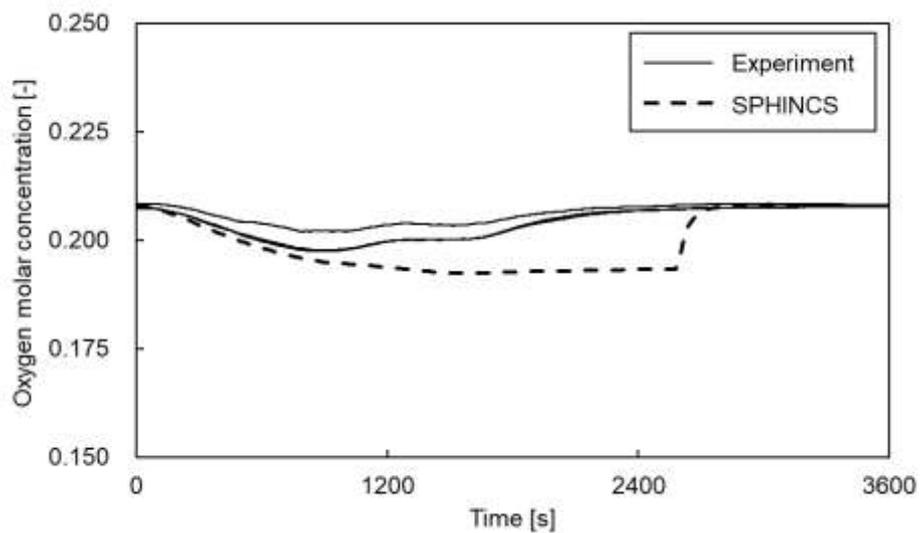
第11図 実験結果との比較 (RUN-F7-1) (2/4)



(g) プール下端ライナ温度時刻歴変化 (r=0.28m)

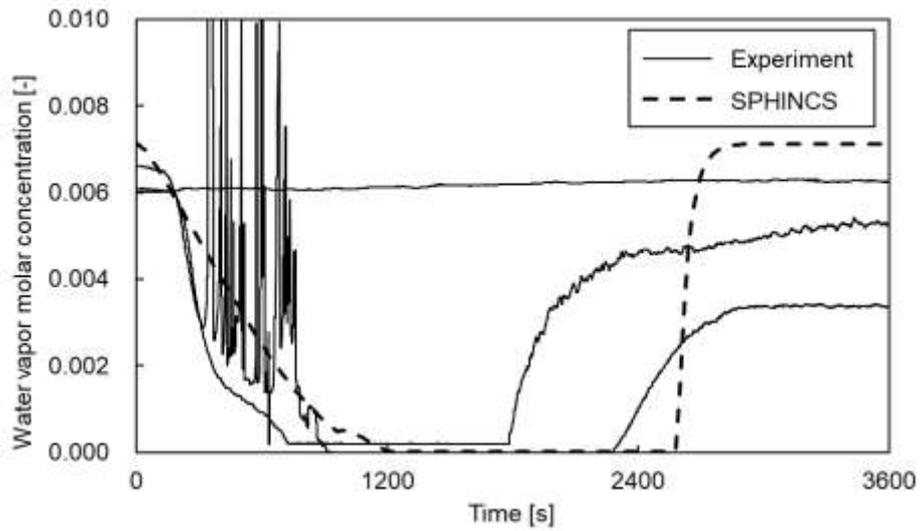


(h) プール下端ライナ温度時刻歴変化 (r=0.4m)

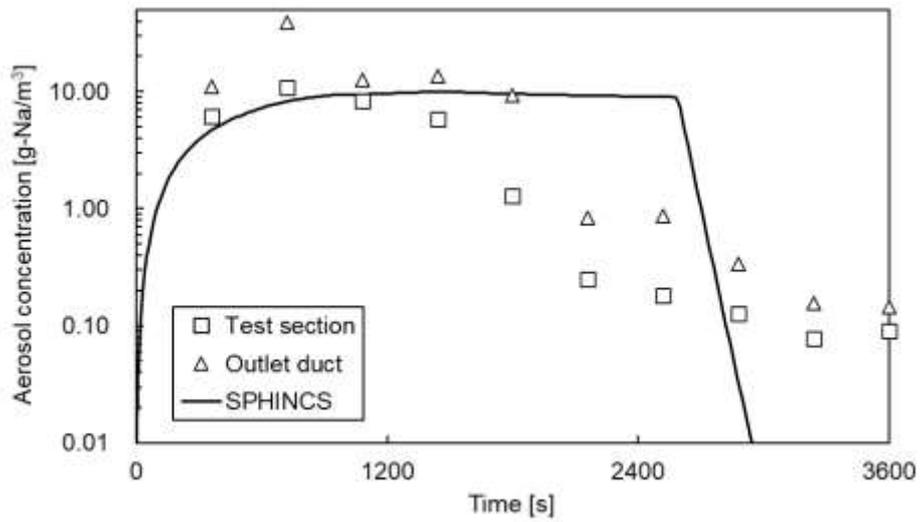


(i) 酸素濃度時刻歴変化

第 11 図 実験結果との比較 (RUN-F7-1) (3/4)

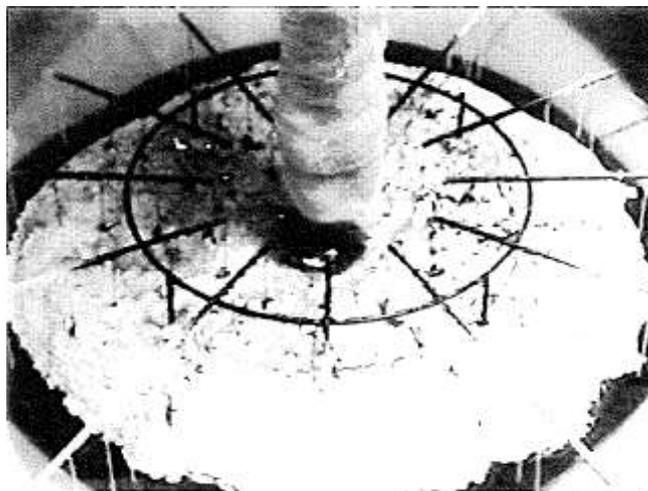


(j) 水蒸気濃度時刻歴変化



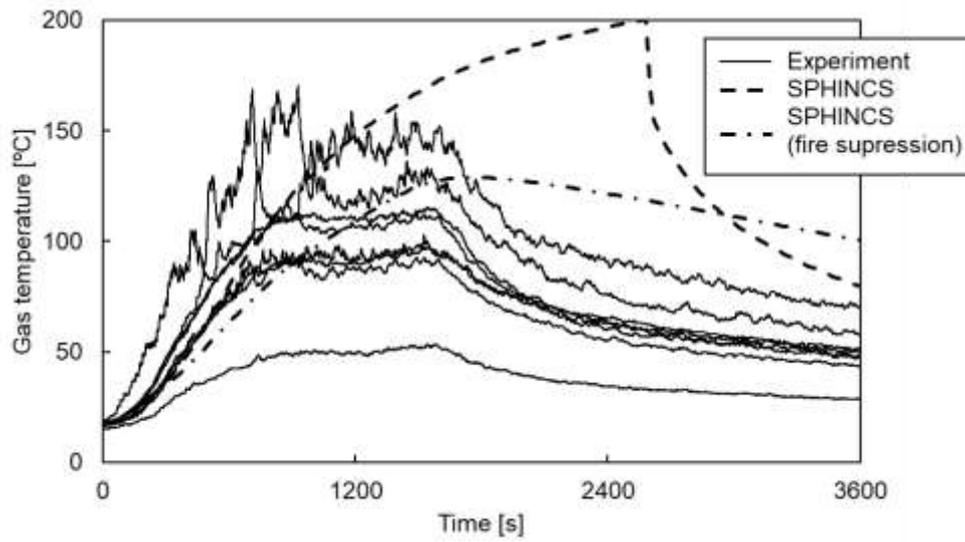
(k) エアロゾル濃度時刻歴変化

第 11 図 実験結果との比較 (RUN-F7-1) (4/4)

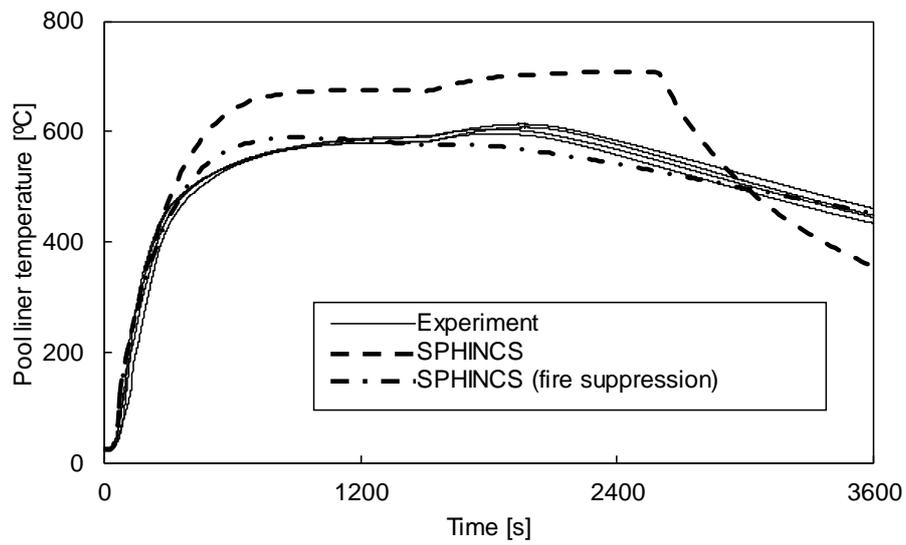


ナトリウム漏えい開始から 40 分後

第 12 図 漏えい終了後のプール表面 (RUN-F7-1) [24]

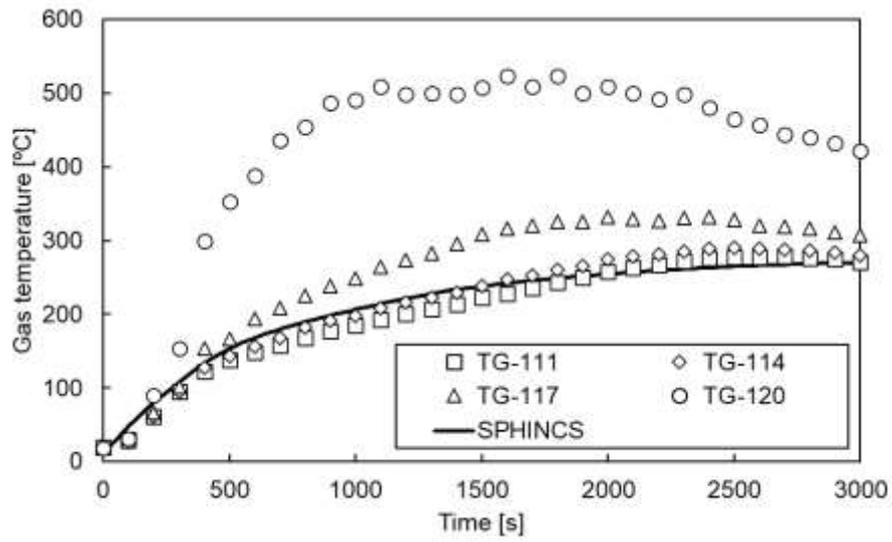


(a) ガス温度時刻歴変化

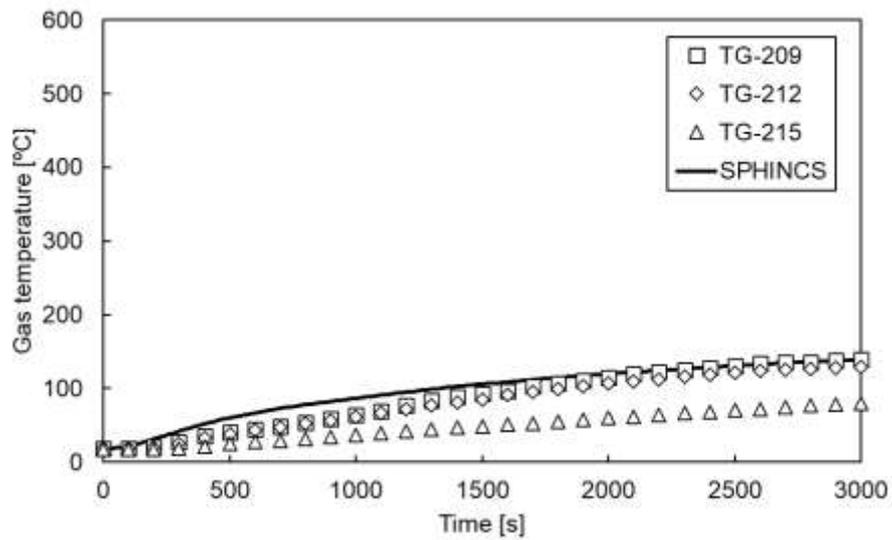


(b) プール下端ライナ温度時刻歴変化 (r=0.1m)

第 13 図 プール燃焼抑制効果 (RUN-F7-1)

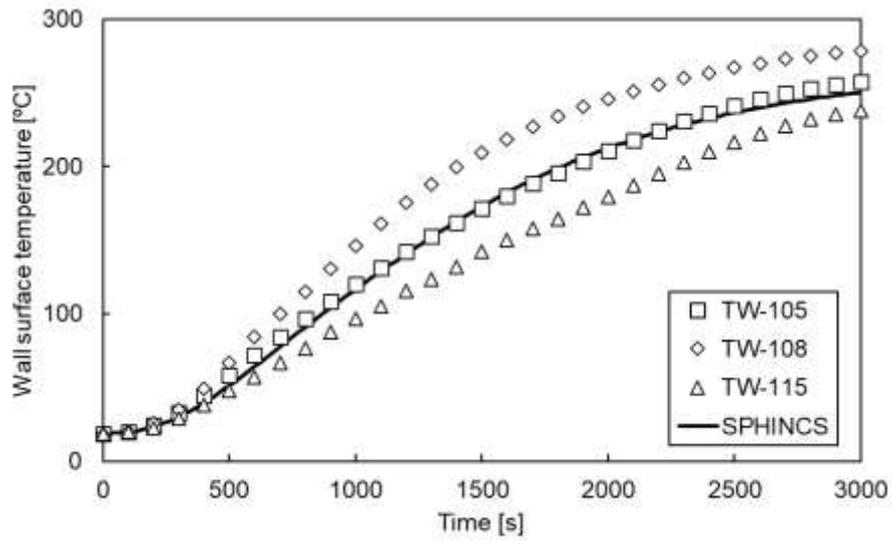


燃焼室 (combustion room)

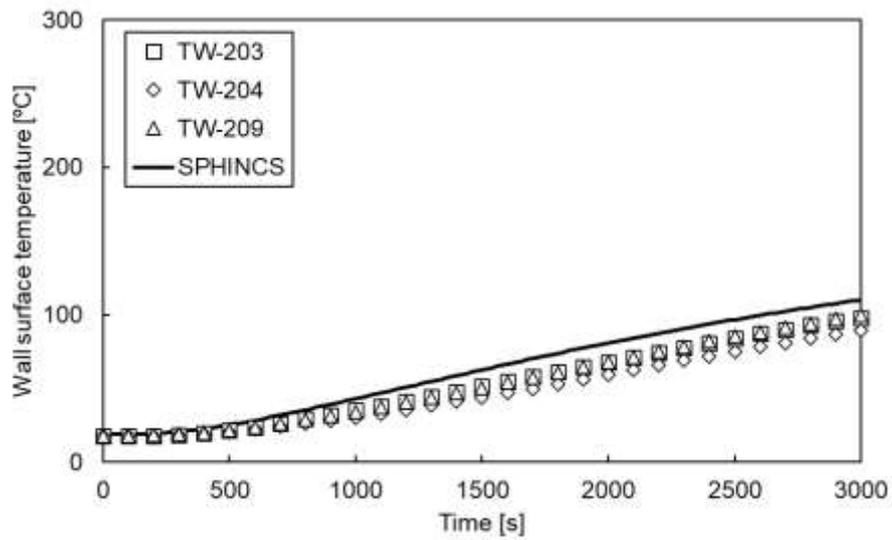


連通室 (adjacent room)

第 16 図 実験との比較 (ガス温度、マルチセルプール燃焼実験)

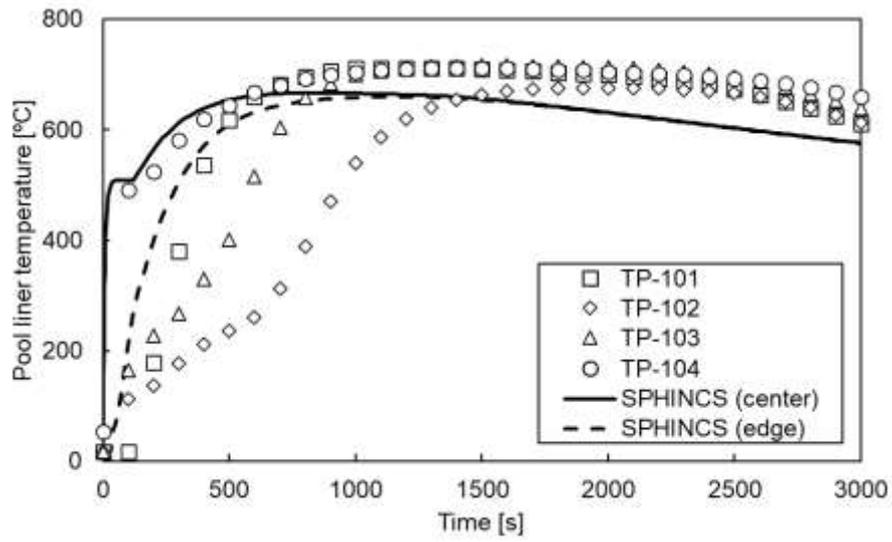


燃焼室 (combustion room)

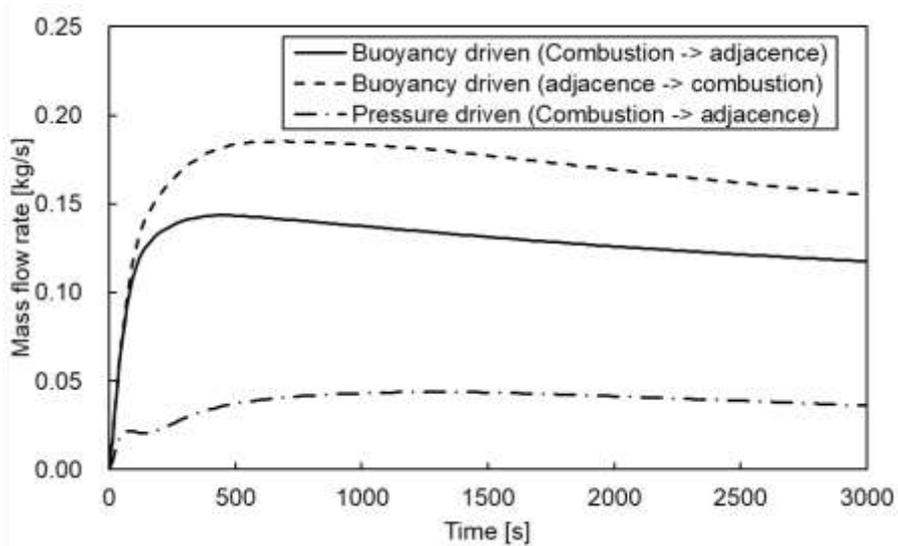


連通室 (adjacent room)

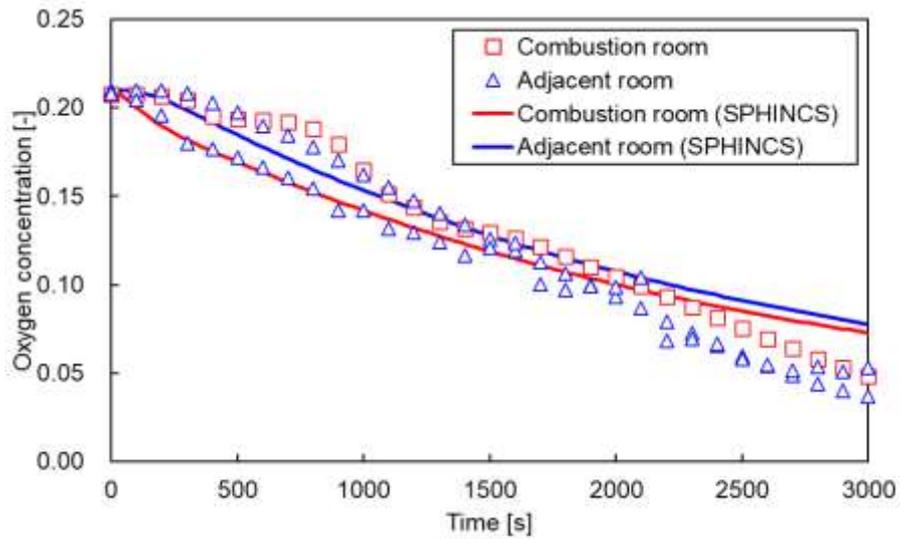
第 17 図 実験との比較 (コンクリート温度、マルチセルプール燃焼実験)



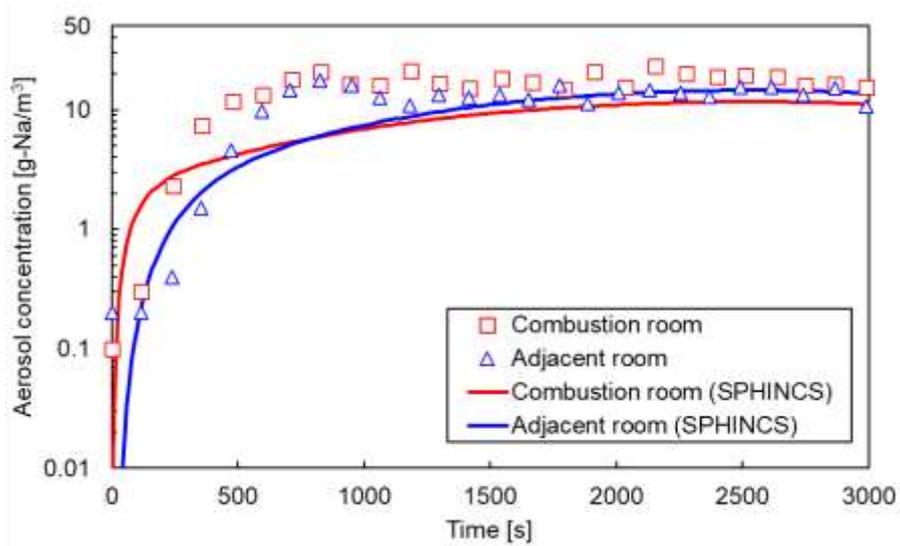
第 18 図 実験との比較 (燃焼皿ライナ温度、マルチセルプール燃焼実験)



第 19 図 部屋間通気量 (マルチセルプール燃焼実験)

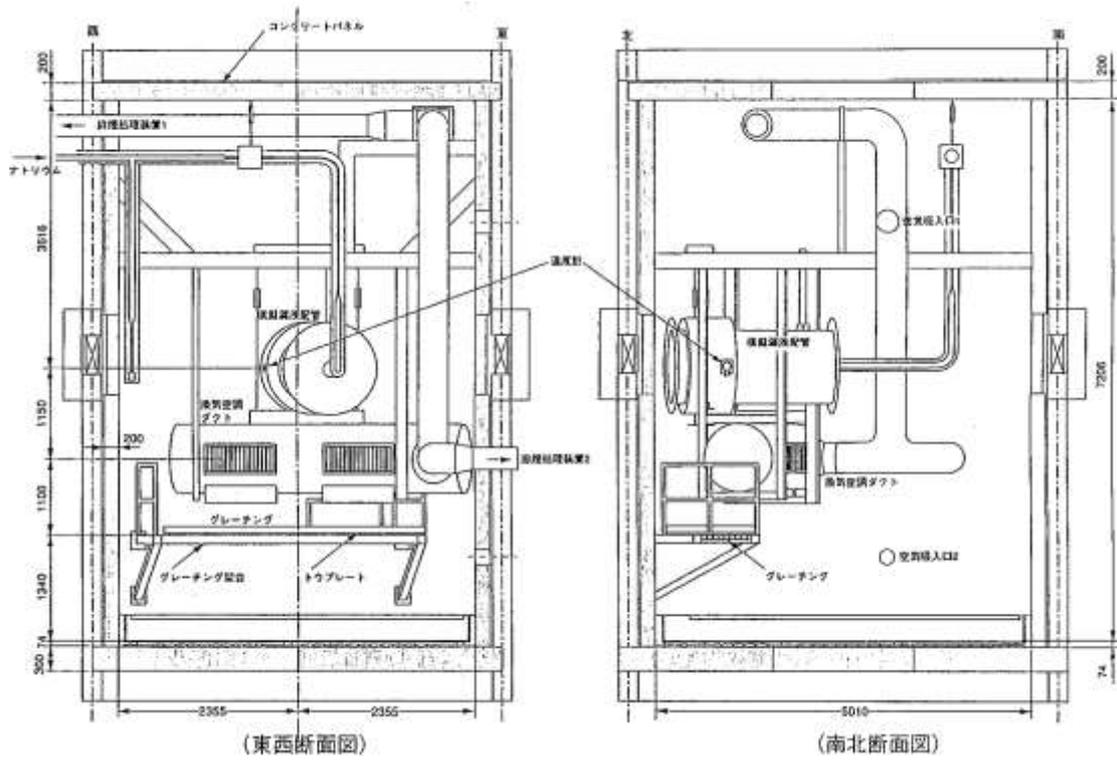


酸素濃度

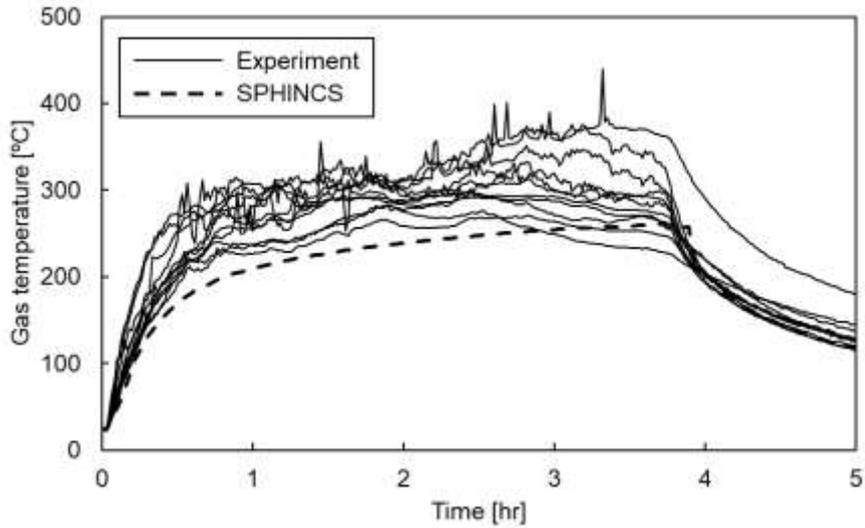


エアロゾル濃度

第 20 図 実験結果との比較 (酸素、エアロゾル濃度、マルチセルプール燃焼実験)

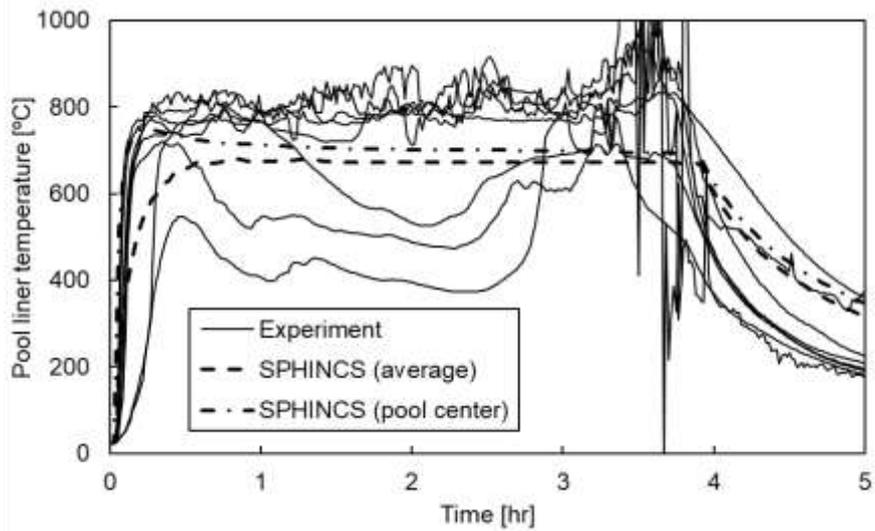


第 21 図 ナトリウム漏えい燃焼実験-II 実験装置

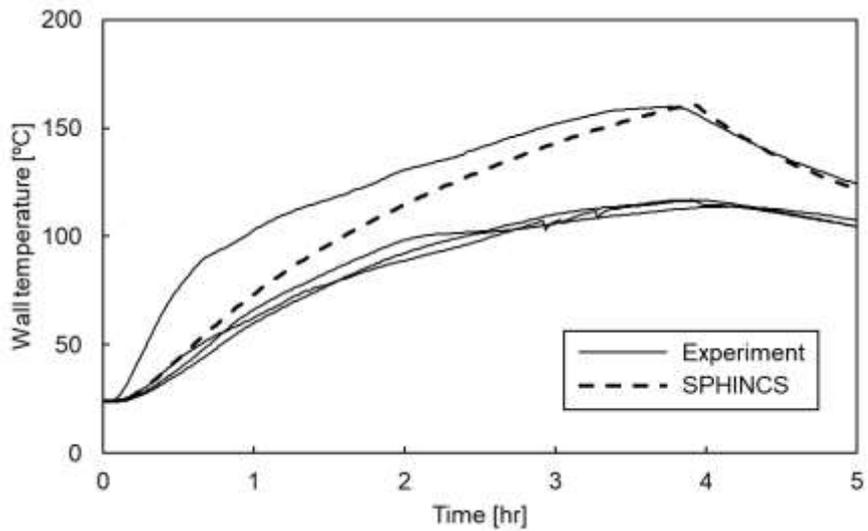


(a) ガス温度時刻歴変化

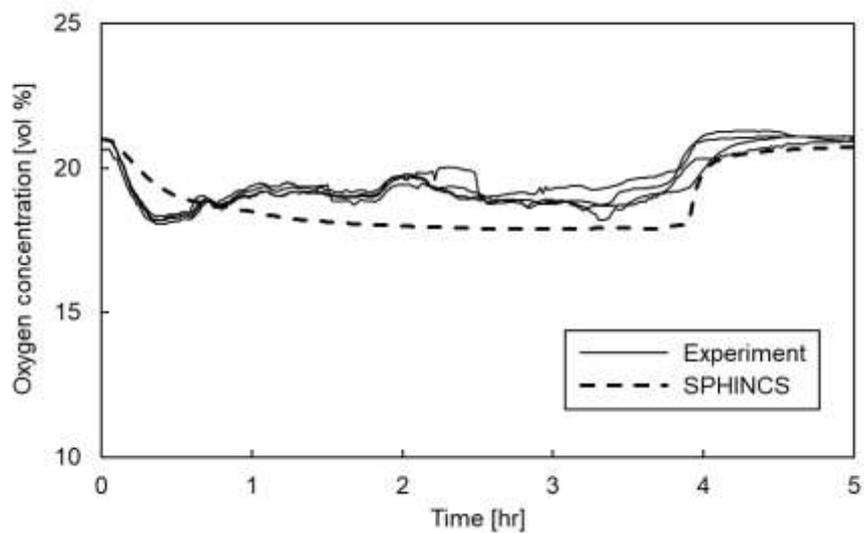
第 22 図 実験結果との比較 (ナトリウム漏えい燃焼実験-II) (1/3)



(b) 床面ライナ温度時刻歴変化

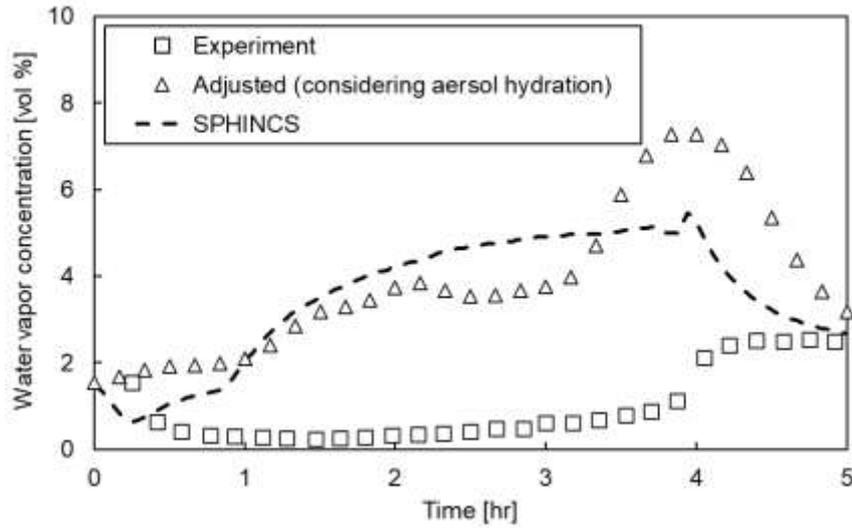


(c) コンクリート温度時刻歴変化 (表面から 15mm)

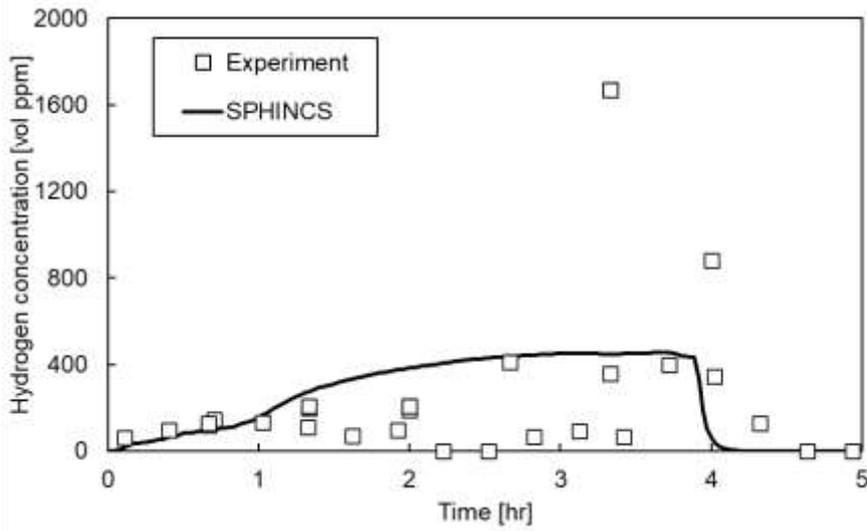


(d) 酸素濃度時刻歴変化

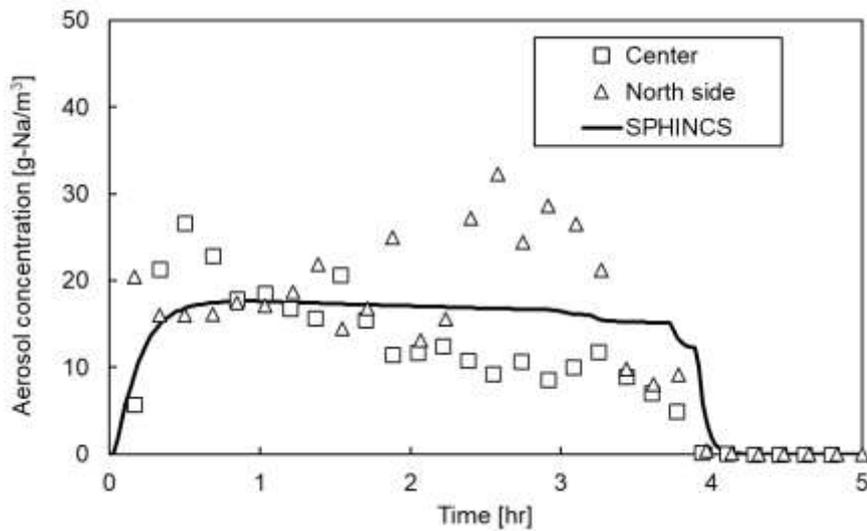
第 22 図 実験結果との比較 (ナトリウム漏えい燃焼実験-II) (2/3)



(e) 水蒸気濃度時刻歴変化



(f) 水素濃度時刻歴変化



(g) エアロゾル濃度時刻歴変化

第 22 図 実験結果との比較 (ナトリウム漏えい燃焼実験-II) (3/5)