



# ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS の開発と検証

大野 修司 松木 卓夫\*

大洗工学センター 要素技術開発部

\*検査開発株式会社

Development and Validation of Sodium Fire Analysis Code ASSCOPS

Shuji OHNO

Takuo MATSUKI\*

Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center

\*Inspection Development Company

高速増殖炉の冷却材である液体ナトリウムが漏えいした場合の建物への熱的影響を評価するために、ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS Version 2.1を開発した。本報告は、ASSCOPS コードの計算モデル、ナトリウム燃焼試験の解析によるコードの検証についてまとめたものである。

ASSCOPS コードは、ナトリウムの液滴状(スプレー状)及びプール状の燃焼とそれに伴う熱・物質の移行を計算する。本解析コードを使用してスプレー状又はプール状ナトリウム燃焼試験を対象に解析した結果、適切な解析パラメータを使用することでナトリウム燃焼とそれに伴う熱的影響の評価を妥当な形で実施できることを確認した。

*A version 2.1 of the ASSCOPS sodium fire analysis code was developed to evaluate the thermal consequences of a sodium leak and consequent fire in LMFBRs. This report describes the computational models and the validation studies using the code.*

*The ASSCOPS calculates sodium droplet and pool fire, and consequential heat/mass transfer behavior. Analyses of sodium pool or spray fire experiments confirmed that this code and the parameters used in the validation studies gave valid results on the thermal consequences of sodium leaks and fires.*

## キーワード

ナトリウム漏えい燃焼，スプレー燃焼，プール燃焼，エアロゾル，解析コード，計算モデル，サファイア施設，実験検証

*Sodium Leak and Fire, Spray Combustion, Pool Burning, Aerosols, Computer Code, Analytical Model, SAFIRE Facility, Validation by Post-test Analysis*



大野 修司

熱化学安全試験グループ ナトリウム燃焼チーム所属  
副主任研究員  
ナトリウム漏えい燃焼実験及び解析評価に従事



松木 卓夫

熱化学安全試験グループ ナトリウム燃焼チーム所属  
主にナトリウム漏えい燃焼解析評価に従事

### 1. はじめに

高速炉で空気雰囲気中にナトリウム漏えいが発生した場合、ナトリウムの燃焼に伴う発熱で雰囲気や構造材の温度が上昇し、部屋の内圧も上昇する。また、「もんじゅ」2次系ナトリウム漏えい事故後に実施したナトリウム漏えい燃焼実験<sup>1)~3)</sup>では、ナトリウムの漏えい規模が比較的小さいことと燃焼熱で加熱されたコンクリートからの放出湿分が影響して、床の鋼板(床ライナ)の局所的な高温状態や腐食減肉が確認された。これらのことから、空气中でナトリウム漏えいがかかる可能性のある施設については、その漏えい規模や環境条件などを広範囲に想定してナトリウム漏えい時の熱的影響を評価しておくことが重要である。

漏えいナトリウムの燃焼挙動を評価する解析コードとしては、大洗工学センターの大規模ナトリウム漏えい燃焼試験施設(SAPFIRE施設)等で実施したナトリウム燃焼試験データを活用して1980年代から開発整備されてきたASSCOPS<sup>4)</sup>、また近年は機構論的解析モデルを取り入れたSPHINCS、AQUA SF、COMET、MPS 3D、BISHOP等の詳細解析コード<sup>5)</sup>が挙げられる。本報告では、そのうちASSCOPSコードについて、計算モデルの概要を紹介するとともに、過去のナトリウム燃焼実験の解析による検証<sup>6)</sup>の結果をまとめたものである。

ASSCOPS\*コードは、米国のAtomics Inter-

national社で開発されたナトリウムプール燃焼計算コードSOFIRE II<sup>7)</sup>と、同じく米国のHanford Engineering Development Laboratoryで開発されたスプレイ燃焼計算コードSPRAY II<sup>8)</sup>をベースとして両者を結合し、さらに、各種ナトリウム燃焼実験で得られた知見を反映して改良を加えた解析コードである。現在は、小規模のナトリウム漏えいや湿分挙動の計算機能等を追加したバージョン(ASSCOPS Version 2.1)<sup>9)</sup>として整備され、「もんじゅ」のナトリウム漏えい対策を検討するためにも使用されている<sup>9)</sup>。

### 2. ASSCOPS コードの計算モデル

#### 2.1 コード構成、特徴

ASSCOPSコードは、ナトリウム漏えい時の建物への熱的影響を評価するために、ナトリウム燃焼、熱及び物質の移行を計算する解析コードである。ナトリウムの漏えい燃焼形態としてはスプレイ状及びプール状の形態を解析対象とし、二つのセル(部屋等の領域)について雰囲気ガスの状態量(温度、圧力、成分濃度)を一点近似、構造物は深さ方向の一次元で扱う。

図1にASSCOPSコードの主な計算機能を示す。ナトリウム漏えい燃焼時に着目すべき現象を考慮し、以下の挙動を扱う工学的な計算モデルで構成している。

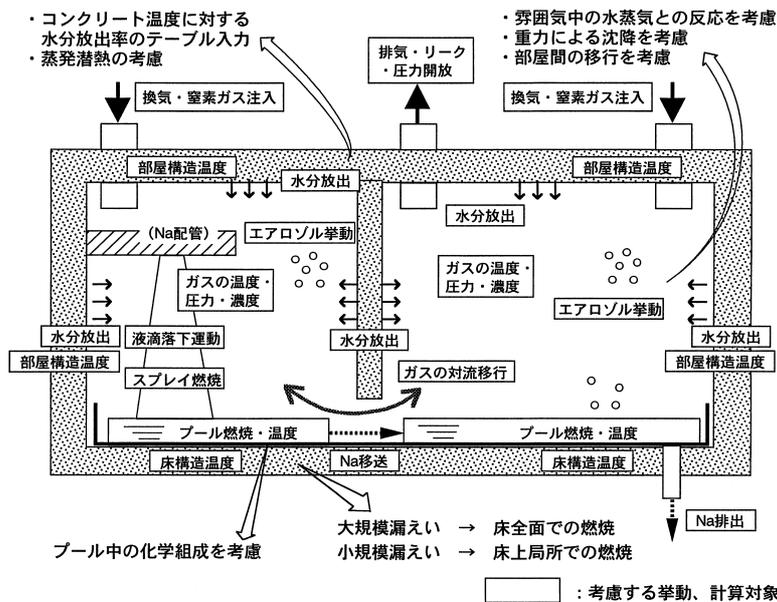


図1 ASSCOPSコードの計算機能

\* ASSCOPS : Analysis of Simultaneous Sodium Combustion in Pool and Spray

ナトリウムのスプレイ燃焼及びプール燃焼  
(湿分との反応, 水素の生成と再結合を含む。)  
熱の移行(対流, 輻射, 熱伝導)による各部  
温度変化

物質の移行と収支

- ・ガス成分の収支(酸素, 湿分, 水素)
- ・加熱コンクリートからの湿分放出
- ・ナトリウム化合物の収支  
( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}_2$ ,  $\text{NaOH}$ )
- ・セル間相互及びセル内と外気における上記各  
物質の移行

熱の移行と物質の移行による各部屋の圧力変  
化

解析の入力データとしては, スプレイやプールの  
条件(初期温度, 量, 液滴径, 物性値等), 雰囲気  
気ガス条件(初期の温度と成分濃度), 構造物条件  
(初期温度, 材質, 厚さ, 面積等)のほかに, 物  
理的・化学的挙動を計算する工学モデルに付随す  
る解析パラメータを必要とする。また, 解析で得  
られる出力は, 各部温度, 雰囲気圧力, ガス成分  
濃度等である。

2.2 計算モデルの概要

(1) ナトリウム燃焼計算モデル

1) プール燃焼計算モデル

プール燃焼計算モデルの概念を図2に示す。ナ  
トリウムのプール状燃焼は, 自然対流を駆動力と  
してプール表面へ供給される酸素のフラックスか  
ら計算する<sup>7)</sup>。

$$B_{r, O_2} = H_{g, O_2} \cdot \rho_g \cdot C_{O_2} \cdot \chi_{Na, O_2} \quad \dots\dots(1)$$

$$H_{g, O_2} = (D_{O_2}/l) \cdot Sh \quad \dots\dots(2)$$

ここで,

$B_{r, O_2}$  : ナトリウム燃焼速度 [kg-Na/( $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )]

$H_{g, O_2}$  : プールへの酸素の物質伝達係数 (m/s)

$\rho_g$  : ガス密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$C_{O_2}$  : 酸素濃度 (mass-fraction)

$\chi_{Na, O_2}$  : 化学量論比 (kg-Na/kg- $\text{O}_2$ )

$D_{O_2}$  : 酸素の拡散係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$l$  : 代表長さ (m)

$Sh$  : シャーウッド数 ( )

(2)式の  $Sh$  数は, 次に示すように水平平板の自然  
対流熱伝達相関式 (Fishenden-Saunders の式) を  
物質伝達に適用して求める。

$$Nu = 0.14 (Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad \dots\dots(3)$$

$$Sh = 0.14 (Gr \cdot Sc)^{1/3} \quad \dots\dots(4)$$

ここで,

$Nu$  : ヌッセルト数 ( )

$Gr$  : グラスホフ数 ( )

$Pr$  : プラントル数 ( )

$Sc$  : シュミット数 ( )

ナトリウムと湿分の反応についても上述のナト  
リウムと酸素の反応と同様に計算する。

2) スプレイ燃焼計算モデル

スプレイ燃焼(液滴燃焼)は, プール燃焼と同  
様に雰囲気から液滴への酸素又は湿分のフラク  
スに基づいて計算する。プール燃焼との相違点  
は, 液滴を球と近似するために計算式が球座標  
で表現されること, 及びナトリウム蒸気と酸  
素のフラックスが化学量論的に一致する位置  
に燃焼面を仮定することである。また, 酸素  
等のフラックスは, 入力で指定した直径の球  
を対象として, 次に示す軸対象物体周りの強  
制対流熱伝達の相関式 (Ranz Marshall の式)  
を物質伝達に適用して計算する<sup>8)</sup>。

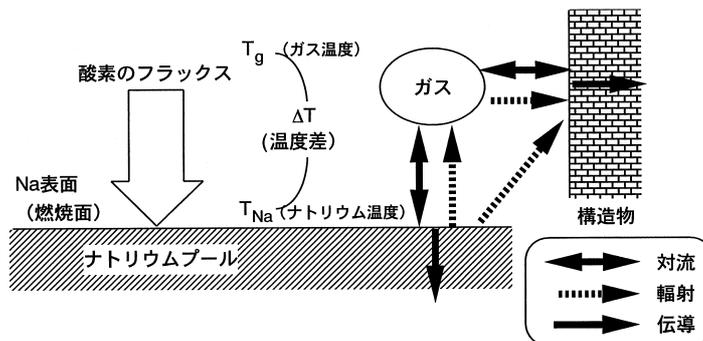


図2 プール燃焼計算モデルの概念図

$$Nu = 2 + 0.6 (Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}) \quad \dots\dots(5)$$

$$Sh = 2 + 0.6 (Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3}) \quad \dots\dots(6)$$

ここで、

Re : レイノルズ数 ( )

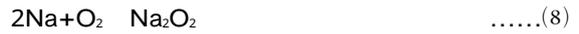
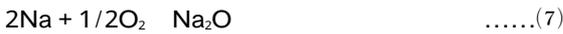
スプレー燃焼モデルの概念を図3に示す。

なお、(6)式を基に物質伝達量を計算するには液滴の速度が必要となるが、これには鉛直方向にメッシュ分割したスプレー領域内における液滴とガスの相対速度計算値を使用する。液滴の落下速度は重力と抗力から、スプレー領域内ガスの速度は浮力、液滴による抗力及び流体摩擦力から計算する。

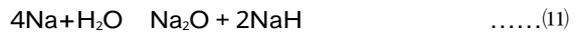
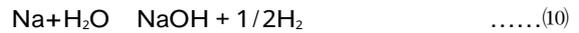
3) 化学反応

ASSCOPS で考慮する化学反応は、上述のナトリウム燃焼を含め、以下のものである。

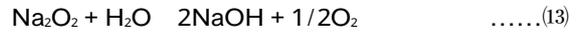
ナトリウムと酸素の反応



ナトリウムと湿分の反応



ナトリウム酸化物と湿分の反応



水素と酸素の再結合



ナトリウムと酸素又は湿分との反応( ) については、それぞれ反応の割合を入力データで指定する。ナトリウム酸化物と湿分の反応( ) はプール表面での反応と雰囲気での反応(浮遊エアロゾルと湿分の反応)に分けられるが、前者はプール面への湿分フラックスから、後者はエアロゾル粒子を球と仮定して湿分の拡散フラックスから計算する。また、水素と酸素の再結合( ) については、その割合(9)式や(10)式で発生した水素

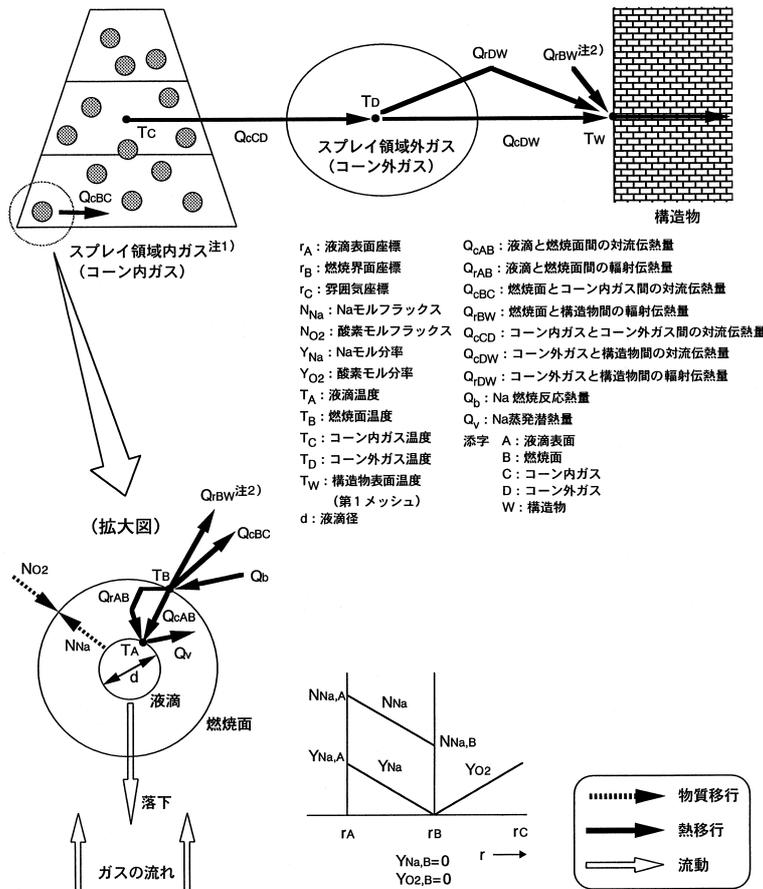


図3 スプレー燃焼計算モデルの概念図

注1) スプレー領域内ガスのメッシュの分割は、各メッシュ内の液滴数が等しくなるように設定。  
 注2) 初期酸素濃度が5%以下(エアロゾル濃度が低い)場合に考慮される。

が再結合する割合)を入力で指定する。

## (2) 伝熱計算モデル

燃焼ナトリウム(液滴, プール), 雰囲気ガス, 構造物等との間の伝熱は, 以下のように計算する。

燃焼ナトリウムについては, 図2及び図3に矢印で示した伝熱パスについて対流伝熱, 輻射伝熱, 熱伝導を計算する。計算に必要な入力データは, 液滴燃焼面から液滴への輻射伝熱の係数, プールからガスや構造物への輻射伝熱の係数等である。なお, 液滴燃焼面から液滴及びガスへの対流伝熱は, 前述の<sup>(5)</sup>式から求められるNu数を基に計算する。

ガスと構造物等との間の伝熱としては, 対流伝熱と輻射伝熱が計算される。取り扱う伝熱パスは図2及び図3に示したとおりである。対流伝熱については, 室内でのスプレイ燃焼の有無に応じて計算式が切り替えられる。スプレイ燃焼が生じている場合には表1で求められるNu数に基づいて計算し, スプレイ燃焼がない場合には<sup>(3)</sup>式(ただし係数0.14は幾何学的条件等に応じて適切な値を使用するように入力で指定)で求められるNu数から計算する。

表1 Sparrow-Gregg のクライテリア

0.225Re <sup>2</sup> > Gr (強制対流)		0.225Re <sup>2</sup> < Gr (自然対流)	
層流	乱流	層流	乱流
Re < 4 × 10 <sup>5</sup>	Re > 4 × 10 <sup>5</sup>	Ra < 10 <sup>9</sup>	Ra > 10 <sup>9</sup>
Nu = 0.664 · Re <sup>0.5</sup> Pr <sup>1/3</sup>	Nu = 0.037 · Re <sup>0.8</sup> Pr <sup>1/3</sup>	Nu = 0.555 · Ra <sup>0.25</sup>	Nu = 0.021 · Ra <sup>0.4</sup>

構造物等については, 深さ方向に一次元メッシュ分割した体系において熱伝導の計算を行うほか, 構造物間の輻射伝熱, 構造物内部のガスギャップを介した熱伝導・輻射伝熱の計算も可能である。プール領域の下の床ライナは, プールに接した構造物としてモデル化することが可能であり, その場合プールからの熱伝導及び床ライナと同一面積の一次元構造物への熱伝導が考慮できる。

## (3) 物質収支計算モデル

### 1) ガス成分収支

ガス成分としては酸素(O<sub>2</sub>), 湿分(H<sub>2</sub>O), 水素(H<sub>2</sub>), 窒素(N<sub>2</sub>)を考慮し, 前述の化学反応に伴う質量変化, 後述のコンクリートからの湿分放出やセル間移行又はセル内外間移行に伴う質量変化を考慮する。

### 2) 加熱コンクリートからの湿分放出

加熱されたコンクリートからの湿分放出は, 深

さ方向に1次元分割した各コンクリート計算メッシュごとにその温度上昇に応じて計算する。この計算モデルは以下の条件に基づくものである。

コンクリート(メッシュ)温度に対する質量減少割合(湿分放出割合と等価)を入力データとする。

湿分は, コンクリート表面からの深さによらず, コンクリート表面温度と同温度のガス(水蒸気)として雰囲気へ瞬時に放出されるものとする。

湿分の蒸発潜熱を考慮する。

## 3) ナトリウム化合物の収支

反応により生成した酸化ナトリウム(Na<sub>2</sub>O), 過酸化ナトリウム(Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)及び水酸化ナトリウム(NaOH)は, 一部は雰囲気へ移行して浮遊エアロゾルとなり, 残りはプール中へ移行して堆積物を形成する。ASSCOPSではこのエアロゾルとプールの両方において, 反応による化学組成変化, 物質移行による収支(後述のガス通気に伴う増減, エアロゾル生成や沈降に伴う増減, プールのセル間移行やセル外排出に伴う増減)を計算する。このうちエアロゾルの生成については, スプレイ燃焼の生成物は全量が浮遊エアロゾルとなり, プール燃焼の生成物は入力データで指定した割合で浮遊エアロゾルとなるように扱い, エアロゾルの沈降については, 粒子がその終端速度で沈降するとのモデルで計算する。

## 4) セル間相互及びセル内外の移行

ガスやエアロゾルについてはセル間相互及びセル内外間の通気による移行を計算できる。この通気としては以下の3種類を考慮することが可能である。

### ガス漏えい通気モデル

ガス漏えい通気モデルは, 基準圧力及びその圧力差におけるガス漏えい率を入力データとし, それに基づいてガス漏えい流量を計算する。

### 対流通気モデル

二つのセルの位置関係が垂直方向にある場合と水平方向にある場合について, セル間の対流通気を計算する。セル間の通気部の断面積, 厚さ, 直径からガス流速を求め, これに基づいてセル間を移動するガスの流量を計算する。

### 圧力均衡通気モデル

圧力均衡通気モデルは二つのセルの圧力が常に等しくなるようにガスが流れるように通気量を扱う。例えば, 二つのセルj, kの圧力の関係がP<sub>j</sub> > P<sub>k</sub>の時は, P<sub>j</sub>=P<sub>k</sub>となるようにガスがjからkに流れる。

また、このほかにセル内外への強制的なガスの給排気、セル内への窒素ガス注入、圧力開放機能によるセル内外へのガスの移行を扱う計算機能を有している。

### 3. ASSCOPS コードの検証

ASSCOPS コードのナトリウム燃焼や伝熱の計算モデル及び「もんじゅ」2次系ナトリウム漏えい事故以降に追加した湿分挙動にかかわる計算モデルの妥当性を調べるために、以下の試験を対象とした解析を実施した。

- ・スプレイ燃焼試験 (Run E 1)
- ・プール燃焼試験 (Run D 1)
- ・ナトリウム漏えい燃焼実験 II
- ・小規模プール燃焼実験 (Run F7 2)

以下では、まず解析条件の概要を述べた後に、各試験ごとの解析結果を示す。

#### 3.1 ナトリウム燃焼解析条件

ASSCOPS コードでは、2. に示したとおり種々の物理・化学的挙動を計算するために工学的な計

算モデルを多く採用している。このため、本コードでナトリウム燃焼試験の解析を行うに当たっては、ナトリウムの漏えい条件や周囲の環境条件など試験条件に依存するものが試験と合致するように設定するとともに、化学反応、伝熱、エアロゾル挙動など種々の挙動を計算するための解析パラメータを適切に設定することが必要である。

上述の解析パラメータについては、異なる体系に対して統一した値を使用できることが望ましい。このため、本報告書においては、これまでのナトリウム関連実験で得られてきた知見や解析的検討を参考に、表 2 に示すような統一された値を使用した。この表には、解析で使用したパラメータ値とその根拠ないし考え方を示す。

#### 3.2 検証解析

##### (1) スプレイ燃焼試験 (Run E 1) の解析

Run E 1 試験は、SAPFIRE 施設の円筒型鋼製容器 (SOLFA2 装置) を使用したスプレイ燃焼試験である。図 4 に示すように、試験は内容積100m<sup>3</sup>の試験容器を空気雰囲気 (密閉条件) とし、床に燃

表 2 解析に使用した各種パラメータ

項目	使用値	根拠, 考え方
小規模漏えい時のプール面積	$W(1 - fspray)/R$ W: Na 漏えい速度 f spray: スプレイ燃焼割合 R: プール広がり相関 (= 25kg/m <sup>2</sup> h)	ナトリウム漏えい燃焼実験 I の解析 <sup>10</sup> で使用した相関。小規模プール燃焼実験の解析に適用しても保守的である。 <sup>6)</sup>
輻射伝熱式の係数 (プール ガス)	0.65	既往実験研究 <sup>11)</sup> プール燃焼実験の解析 <sup>12)</sup>
輻射伝熱式の係数 (ガス 壁)	0.5~0.9	壁内面の材料の放射率を使用 (試験に依存して異なる。)
コンクリートからの水分放出	燃焼実験 II の過渡加熱条件を模擬した「コンクリートからの放出水量測定」結果を基に、コンクリート温度と水分放出率の相関を作成	
ナトリウムと酸素の反応	$4Na + O_2 = 2Na_2O$ $2Na + O_2 = Na_2O_2$ ここで、Na <sub>2</sub> O : Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub> = 60 : 40 (酸素10%以上) = 100 : 0 (酸素10%未満)	既往実験研究 <sup>13)</sup> 化学熱力学的検討 <sup>1)</sup>
ナトリウムと水分の反応	$2Na + H_2O = Na_2O + H_2$	文献 (Na 過剰条件での反応) <sup>4)</sup> 化学熱力学的検討 <sup>1)</sup>
ナトリウム酸化物と水分の反応	$Na_2O + H_2O = 2NaOH$ $Na_2O_2 + H_2O = 2NaOH + 1/2O_2$ エアロゾルの場合は、反応速度係数 = 1.0E-10 mol H <sub>2</sub> O/個/s (感度解析より)	
水素の再結合割合	90% (酸素5%以上) 0% (酸素5%未満)	水素の燃焼限界に関する知見 燃焼実験に関する感度解析
エアロゾル発生割合	スプレイ: 100% プール: 25%	既往実験研究 <sup>15),16)</sup>
エアロゾル落下高さ	部屋高さの半分	エアロゾル粒子が空間に均一分布すると考えた場合の、 粒子の落下距離の平均値
エアロゾル密度	2130kg/m <sup>3</sup>	主成分である NaOH の物性
エアロゾル粒径	1.0E-5 m	粒径測定結果を参考 <sup>17)</sup>

焼抑制板を設置した体系で実施された。ナトリウム漏えい速度は510g/s、スプレー漏えい継続時間は30分間、スプレーノズルの設置高さは床から約4mの位置、スプレーノズルにより生成する液滴の大きさは2.2mm(水を用いた試験で測定された質量平均径)である。

本試験は密閉体系で行われた試験であるため、内圧と酸素濃度の変化を比較することでスプレー燃焼時の熱的影響計算の妥当性を確認することができる。ASSCOPSコードによる本試験の解析結果を図5に示す。燃焼に伴う試験容器内の酸素濃度の推移は解析結果と測定値がおおむね一致し、圧力ピーク値は解析結果と測定値が10%以内で一致している。スプレー燃焼に関する計算モデルの精度、液滴の扱いなど解析条件における仮定を考慮すれば、本実験の解析結果から、スプレー状漏えい時のナトリウム燃焼に関するASSCOPSの計算は適切であると判断される。

(2) プール燃焼試験 (Run D1) の解析

Run D1 試験は、SAPFIRE 施設の鉄筋コンクリート製の矩形試験装置 (SOLFA 1 装置) の1階部分を使用したプール燃焼試験である<sup>18)</sup>。図6に示すように、試験では内容積73.4m<sup>3</sup>の矩形コンクリートセル(内面全体を鋼板でライニング)を空気雰囲気(開放条件)とし、面積2.25m<sup>2</sup>の受け皿へ550kgのナトリウムを供給した。

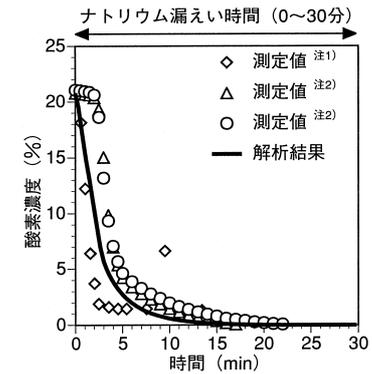
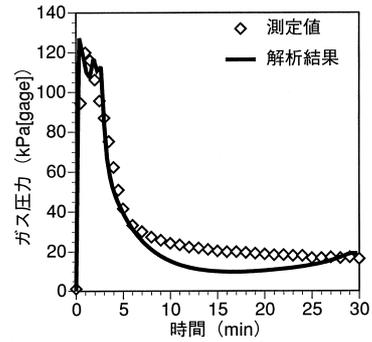


図5 スプレー燃焼試験 (Run E1) の解析結果

注1) サンプリング方式

注2) 磁気式酸素濃度計 (試験容器から測定器までガスラインで接続)

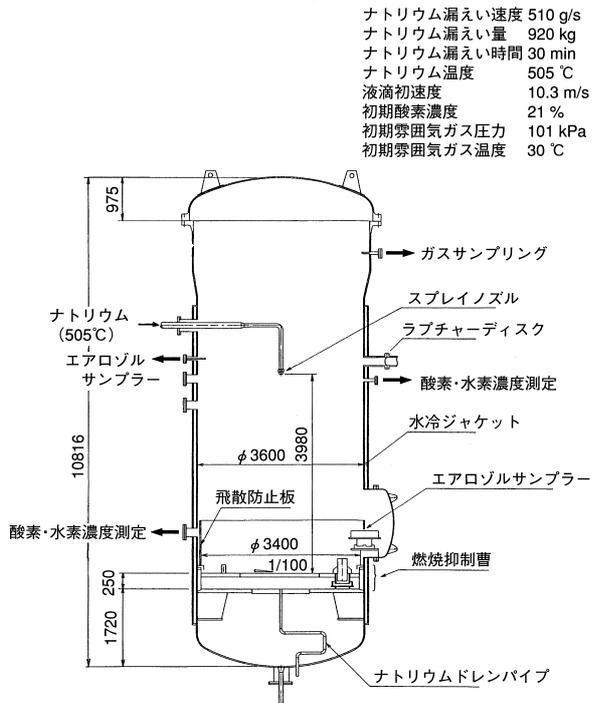


図4 スプレー燃焼試験 (Run E1) の試験装置 (SOLFA 2 装置)

ナトリウム漏えい速度 510 g/s  
 ナトリウム漏えい量 920 kg  
 ナトリウム漏えい時間 30 min  
 ナトリウム温度 505 °C  
 液滴初速度 10.3 m/s  
 初期酸素濃度 21 %  
 初期雰囲気ガス圧力 101 kPa  
 初期雰囲気ガス温度 30 °C

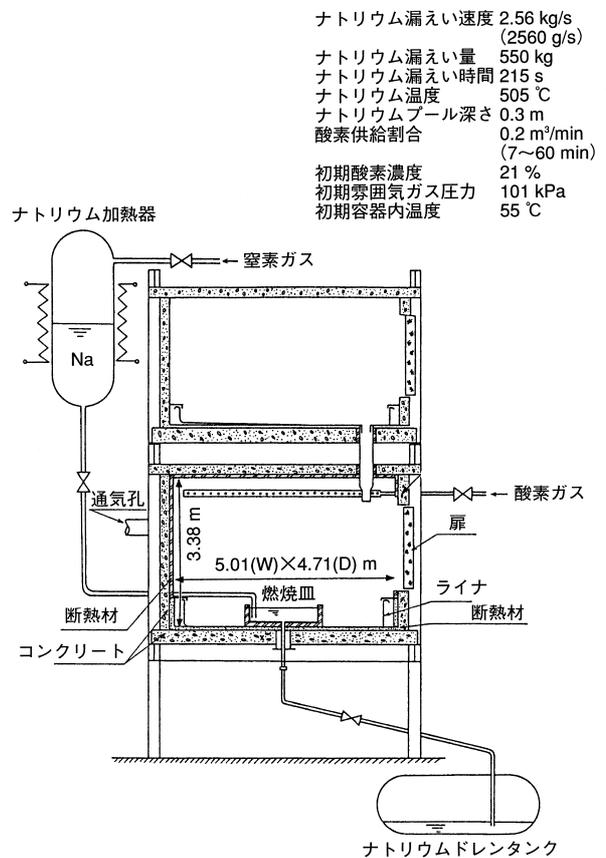


図6 プール燃焼試験 (Run D1) の試験装置 (SOLFA 1 装置)

ナトリウム漏えい速度 2.56 kg/s  
 (2560 g/s)  
 ナトリウム漏えい量 550 kg  
 ナトリウム漏えい時間 215 s  
 ナトリウム温度 505 °C  
 ナトリウムプール深さ 0.3 m  
 酸素供給割合 0.2 m<sup>3</sup>/min  
 (7~60 min)  
 初期酸素濃度 21 %  
 初期雰囲気ガス圧力 101 kPa  
 初期容器内温度 55 °C

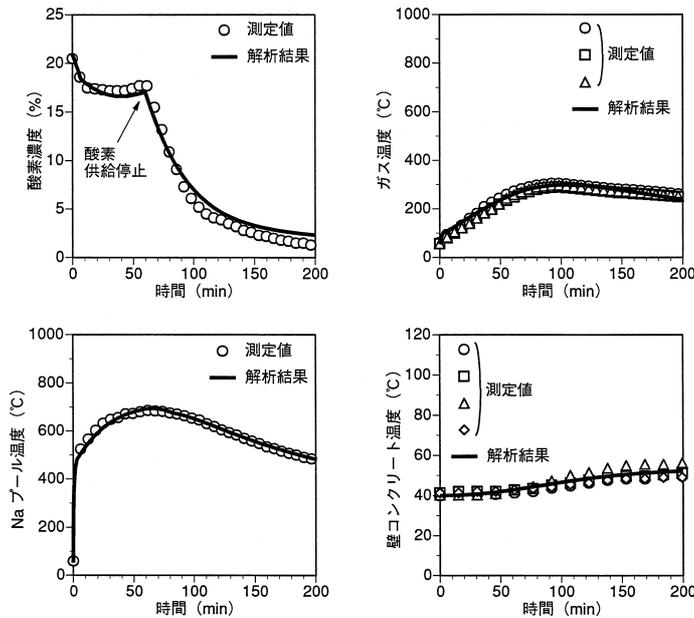


図7 プール燃焼試験 (Run D1) の解析結果

ASSCOPS コードによる本試験の解析結果のうち、試験セル内の酸素濃度及び各部温度について測定値と比較したものを図7に示す。酸素濃度の計算結果と測定値は良く一致しており、ナトリウムのプール燃焼の計算が妥当であることが確認できる。また、ナトリウムプール温度、ガス温度、壁コンクリート温度についても、それらの時間推移やピーク値は計算値と測定値が約20以内で一致しており、燃焼に伴う熱移行挙動が適切に計算されることが確認できる。

(3) ナトリウム漏えい燃焼実験Ⅱの解析

ナトリウム漏えい燃焼実験Ⅱは、SOLFA 1装置の1階と2階をつなげるように改造した体系で実施した実験である<sup>1)~3)</sup>。装置は図8に示すとおりであり、「もんじゅ」2次系ナトリウム漏えい事故の原因究明の一環として、矩形セル(5m×5m×高さ8m、内容積170m<sup>3</sup>)の内部を換気した条件の下で、同事故の漏えい部を模擬して配管、換気空調ダクト、グレーチング及び床ライナを設置し、温度計部分から480のナトリウムを3時間42分間にわたり漏えいさせた。ナトリウム漏えい速度は54~39g/s、漏えいナトリウム量は690kgであった。

ASSCOPS コードによる本実験の解析結果のうち、試験セル内の酸素濃度、床ライナ温度、ガス温度、壁コンクリート温度、水素濃度について測定値と比較したものを図9に示す。各項目に対する比較結果は、以下のとおりである。

酸素濃度の推移について、解析結果は実験結果よりも多めの酸素消費となっているが概略の

時間推移は一致している。したがって、模擬漏えい部からの流出によって生じたスプレイと床ライナ上のプールを合わせたナトリウム燃焼(酸素消費)の計算は妥当であるといえる。

床ライナ温度については、実験の初期からプールが形成されたと推定される模擬漏えい部直

ナトリウム漏えい速度	54~39 g/s
ナトリウム漏えい量	690 kg
ナトリウム漏えい時間	222 min
ナトリウム温度	480 °C
換気流量	35 m <sup>3</sup> /min
初期酸素濃度	21 %
初期雰囲気ガス圧力	101 kPa
初期容器内温度	24 °C

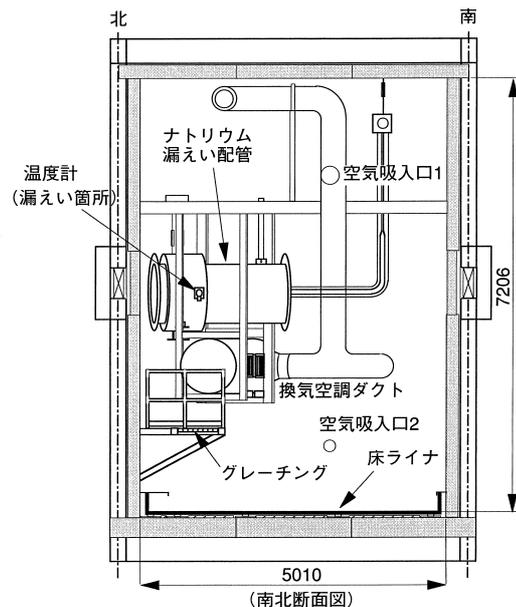


図8 ナトリウム漏えい燃焼実験Ⅱの実験装置 (SOLFA 1装置)

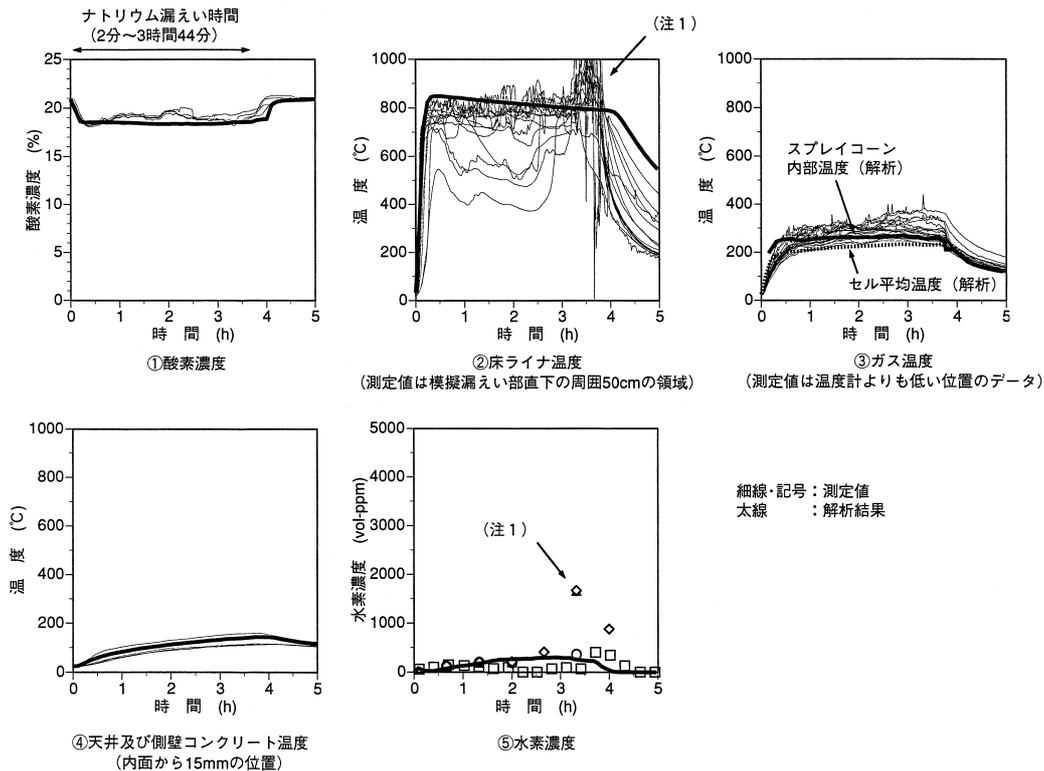


図9 ナトリウム漏えい燃焼実験Ⅱの解析結果

(注1) 床ライナ損傷によるナトリウム・コンクリート反応の影響が現れていると考えられる。

下付近（床ライナのうち最も高温で推移した領域）の温度測定値を解析結果と比較した。解析結果は、測定値のうち床ライナ破損によるナトリウム・コンクリート反応の影響が現れている極端な高温部を除き、最も高温で推移した部位の測定値と一致する傾向を示している。ASSCOPSの床ライナ温度計算値がプール領域下面の床ライナ平均温度に相当することを考慮すると、解析結果は床ライナ温度を高めめに計算していることになる。これを前述のプール燃焼試験（Run D1）のケースと比較して解釈すると、Run D1は熱容量の大きいプール（深さ約30cm）の表面部分で燃焼しているが、このナトリウム漏えい燃焼実験Ⅱは熱容量の小さいプール（最大でも深さ約10cm）でナトリウムの大部分が燃焼し尽くす状況となっているため、温度変化が敏感であるものと考えられる。なお、実験では、3時間10分から3時間40分頃に測定値が振動し解析値よりも高くなる傾向が見られるが、これは床ライナが破損してライナ下部でナトリウム・コンクリート反応（本解析コードでは考慮されない反応）が生じたことの影響を受けたと考えられ、この時間帯については比較対象外である。

ガス温度は、模擬漏えい配管よりも低い位置の測定値（ナトリウムが直接接触れると思われる位置の測定値は削除）と解析結果を比較して示した。セル内平均温度の解析結果は測定値の平均的な温度よりも低めであるが、時間的推移を良好に表現したものとなっている。

天井及び壁コンクリートの温度については、解析結果は複数の測定値の中間付近を推移している。

水素濃度は、3時間20分頃以降を除けば、測定値とほぼ一致するような解析結果となっている。したがって、加熱されたコンクリートからの湿分放出、ナトリウムと湿分の反応による水素の生成、燃焼（酸素との再結合）による水素消費、換気系の運転によるセル外への水素排出等からなる解析がおおむね妥当であることが分かる。約3時間20分以降については前述のナトリウム・コンクリート反応で発生した水素の影響が現れていると考えられる。

解析と実験測定値の比較結果をまとめると、本実験に関しては床ライナ温度は高め、ガス温度は低めの傾向が認められるものの、ASSCOPSコードによる解析結果はナトリウム燃焼挙動とそれに伴う熱移行や水素などの物質移行（生成・消費）挙

動の全般について実験測定値の概略を適切に表現できることが確認された。

#### (4) 小規模プール燃焼実験 (Run F7 2) の解析

小規模プール燃焼実験 (Run F7 2) は、ナトリウム漏えい速度が10kg/h程度の小規模漏えいを対象として床ライナ温度やプールの広がり調べをすることを目的として実施された実験である<sup>19)</sup>。SAP-FIRE 施設の鋼製円筒容器 (FRAT 1 装置, 内容積 3 m<sup>3</sup>) 内部に炭素鋼製の受け皿を設置し、漏えいナトリウムの初期温度507℃, ナトリウム漏えい率は12kg/h (3.3g/s), 漏えいノズルの位置 (高さ) 1.5m, 漏えい継続時間は25分間, 換気流量 3 m<sup>3</sup>/min の条件で実施された。実験装置の概要を図10に示す。

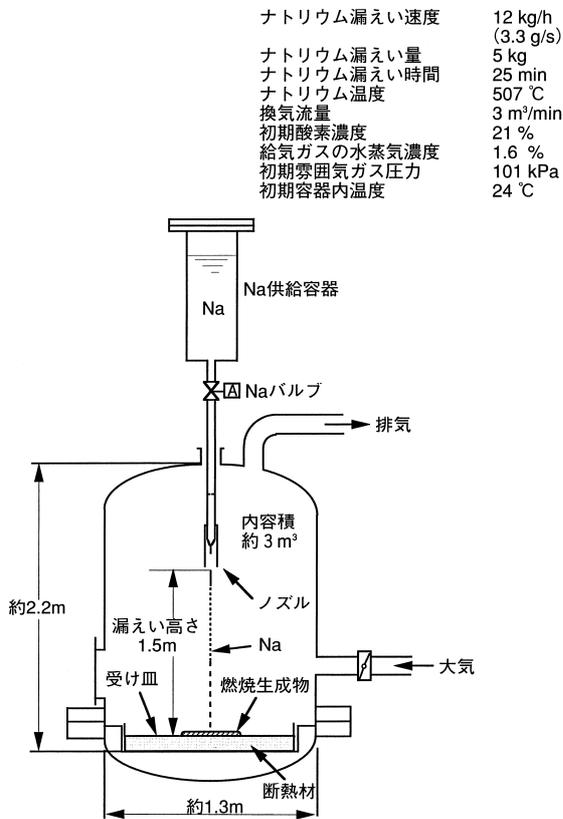


図10 小規模プール燃焼実験 (Run F7 2) の実験装置 (FRAT 1 装置)

ASSCOPS コードによる本実験の解析結果のうち、酸素濃度、受け皿温度、ガス温度、容器内の浮遊エアロゾル濃度、湿分濃度について測定値と比較したものを図11に示す。各項目に対する比較結果は、以下のとおりである。

酸素濃度の推移については、解析結果は実験結果よりも大きな酸素消費となっているが、漏

えい開始とともに酸素濃度が低下して漏えい中はおおむね一定値で推移し、燃焼終了により初期値に戻るといった時間的推移は良好に表現されている。解析の方が漏えい初期の酸素濃度は急激に低下しているが、これは ASSCOPS で漏えい開始と同時にプールが所定の面積に広がるモデルとしていることが原因である。また、漏えい終了後の酸素濃度の回復は解析の方が急激であるが、これはナトリウムの燃焼が大きめに解析され全量燃焼する時刻が早くなったためである。

受け皿温度の解析結果は、漏えい期間中は測定値を上回る温度を示し、漏えい終了後については測定値よりも速い降温速度を示している。この傾向は上記の酸素濃度の比較の傾向、すなわち漏えい期間中の燃焼速度が高く全量燃焼する時刻が早いという解析結果の傾向に整合している。

ガス温度の解析結果は、漏えい期間中は測定値よりも高めで推移している。上記の酸素濃度や受け皿温度に関する比較結果と整合するものである。

容器内の浮遊エアロゾル濃度の解析結果は測定値にほぼ一致している。したがって本解析に関しては、ナトリウムの燃焼速度が大きめに解析されていることから、燃焼時の雰囲気へのエアロゾル放出割合に関する解析パラメータは小さめであると考えられる。

湿分濃度は、漏えい期間中のほぼ一定値で推移する時間域の解析が測定値よりも少し高め(吸湿量が少し低め)であるが、その継時的変化は良く一致している。湿分濃度は主に体系内への湿分供給、体系内での消費(浮遊エアロゾルや堆積物との反応)に依存するものであることを考えると、この比較結果から、試験容器内での消費(吸湿)の計算がほぼ適切に行われていると判定できる。

小規模漏えい燃焼を対象とした本実験に関する解析結果をまとめると、ナトリウムの燃焼を大きめに評価するために各部温度は測定値よりも高めとなるものの、各部温度の継時的変化やエアロゾル・湿分の挙動の概略を適切に解析できることが確認された。

#### 4. おわりに

建物内でナトリウム漏えいが生じた時の燃焼による熱的影響を評価するための解析コード ASSCOPS について、特徴と計算モデルの概要を紹介し

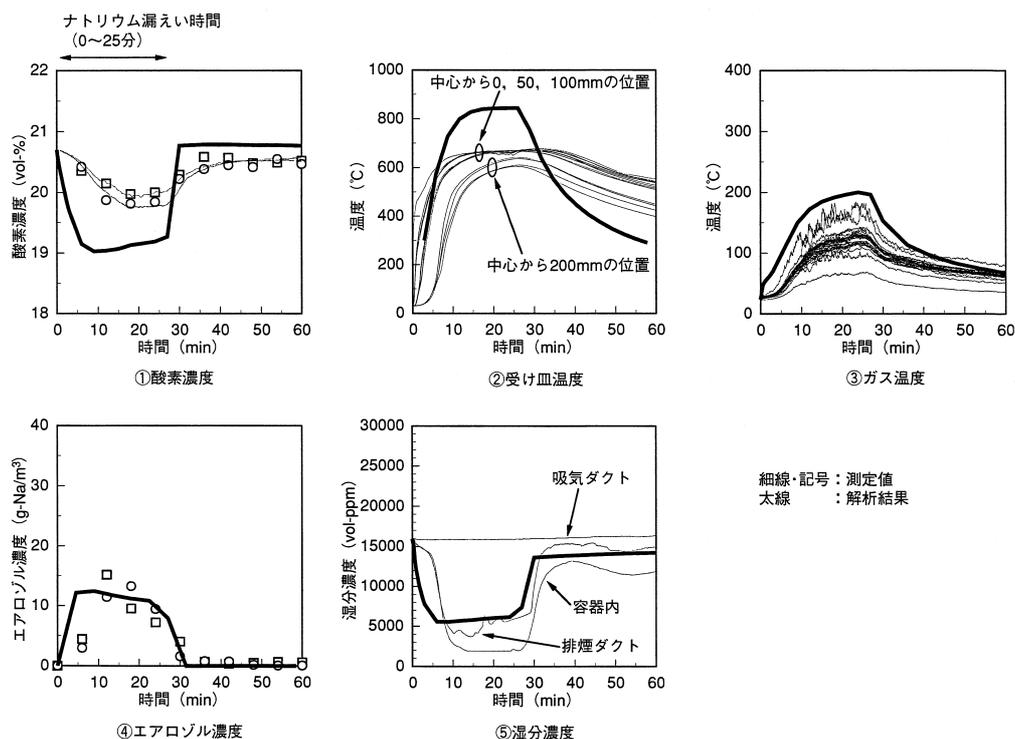


図11 小規模プール燃焼実験 (Run F7 2) の解析結果

た。また、ナトリウム燃焼試験の解析を行い、解析結果と測定値を比較することによりコードの計算能力の妥当性を検証した。

ASSCOPS コードによるスプレイ燃焼試験及びプール燃焼試験の解析から、事故で想定される代表的なナトリウム漏えい形態での燃焼とそれに伴う各部温度や圧力の挙動つまり熱的影響を的確に計算できることが確認された。また、ナトリウム漏えい規模がより小さい状況及び湿分が事象推移に影響するような状況を対象とした実験の解析から、小規模漏えい時の燃焼と熱移行挙動を保守的な形で計算できること、エアロゾル・湿分・水素等の物質移行挙動についても適切に評価できることが確認された。

物理量の空間分布を考慮しない一点近似的な解析コードという制約はあるものの、一連の解析を通じて、本解析コードがナトリウム漏えい時の影響評価や漏えい対策設備の設計等を広範囲の想定条件のもとで実施するためのツールとして活用できることが示された。

#### 参考文献

1) 内山尚基, 高井俊秀 他: “もんじゅナトリウム漏洩事故の原因究明 ナトリウム漏えい燃焼実験 II”, PNC TN9410 97 051 (1997)

2) N. Uchiyama, T. Takai et al.: “Investigation of the Sodium Leak in Monju Sodium Leak and Fire Test II”, JNC TN 9400 2000 090 (2000)

3) 内山尚基, 高井俊秀 他: “ナトリウム漏えい燃焼実験 II 実験データ集”, PNC TN9450 97 006 (1997)

4) 大野修司, 松木卓夫 他: “ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS Version2.1使用説明書”, JNC TN9520 2000 001 (2000)

5) 山口彰, 岡野靖 他: “ナトリウム燃焼解析評価手法の開発 (20) シリーズ発表の総括”, 日本原子力学会「2000年春の年会」E6.

6) 大野修司, 松木卓夫: “ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS の検証”, JNC TN9400 2000 106 (2000)

7) P. Beiriger, J. Hopfenfeld et al.: “SOFIRE II USER REPORT”, AI AEC 13055 (1973)

8) P. R. Shire: “SPRAY CODE USER'S REPORT”, HEDL TME 76 94 (1977)

9) 宮園敏光, 大野修司 他: “高速増殖原型炉「もんじゅ」2次主冷却系設備におけるナトリウム燃焼解析”, JNC TN2400 2000 006 (2000)

10) 中桐俊男, 大野修司 他: “ナトリウム燃焼解析コード ASSCOPS Version2.0によるナトリウム漏えい燃焼実験 I (Run E6) の解析”, PNC TN9410 97 102 (1997)

11) 橋口功, 原穰二 他: “液体ナトリウムの輻射率”, 日本原子力学会昭和53年年会 A55 (1978).

12) O. Miyake, R. Kawabe et al.: “Comparison of SOFIRE M II Predictions with the Results of German FAUNA F5 and F6 Tests”, PNC TN941 85 67 (1985)

13) W. Cherdron, S. Jordan: “Determination of Sodium Fire Aerosol Process Coefficients from FAUNA Experiments”;

- Proc. of the CSNI Specialists Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, NUREG/CR 1724, p. 129 ~ 138 ( 1980 )
- 14 ) D. W. Cooper :“ Prediction of the Rates of Chemical Transformation of Sodium Fire Aerosols ”, Proc. of the CSNI Specialists Meeting on Nuclear Aerosols in Reactor Safety, NUREG/CR 1724, p. 181 ~ 195 ( 1980 )
- 15 ) R. N. Newman, J. F. B. Payne :“ The Burning Rates of Sodium Pool Fires ”, Combustion and Flame, 33, p. 291 ~ 297 ( 1978 ).
- 16 ) S. C. Yung :“ Sodium Pool Fire Model for the CONACS Code ”, ANS Winter Meeting, HEDL SA 2740 FP ( 1982 )
- 17 ) R. K. Hilliard, J. D. McCormack et al. :“ Aerosol Behavior during Sodium Pool Fires in a Large Vessel CSTF Tests AB1 and AB2 ”, HEDL TME79 28 ( 1979 )
- 18 ) 宮原信哉, 佐々木和一 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 )
- 19 ) 二神敏, 西村正弘 他 :“ ナトリウムプール燃焼実験 Run F7 ( 中間報告 ) ”, PNC TN9410 98 074 ( 1998 )