JAEA-Research 2010-065



コンパクト化したナトリウム冷却炉の 温度成層化現象に関する実験研究

- 炉心出口流速およびスクラム前後の温度差の影響-

Experimental Study on Thermal Stratification in Compact Reactor Vessel of Sodium **Cooled Fast Reactor**

- Effects of Core Outlet Velocity and Temperature Difference during Scram -

木村 暢之 林謙二 飛田 昭 上出 英樹 長澤 一嘉

> Nobuyuki KIMURA, Kenji HAYASHI, Akira TOBITA Hideki KAMIDE and Kazuyoshi NAGASAWA

次世代原子力システム研究開発部門 FBR 要素技術開発ユニット

FBR Systems Technology Development Unit Advanced Nuclear System Research and Development Directorate **March 2011**

日本原子力研究開発機構

Japan Atomic Energy Agency

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

コンパクト化したナトリウム冷却炉の温度成層化現象に関する実験研究 -炉心出口流速およびスクラム前後の温度差の影響-

日本原子力研究開発機構 次世代原子力システム研究開発部門

FBR 要素技術開発ユニット

木村 暢之 林 謙二 飛田 昭 上出 英樹 長澤 一嘉*

(2010年12月17日受理)

日本原子力研究開発機構では、FBR サイクル実用化研究開発(FaCT)の一環として、ナトリウム 冷却炉の設計検討を行っている。ナトリウム炉の経済性向上の方策として、高出力化、炉容器のコ ンパクト化、炉心上部機構(UIS)の簡素化等の検討を行っている。

一方、外部電源喪失等による原子炉スクラム時においては、急激な炉心出力低下に伴う熱過渡を 低減するために冷却材流量を低下させる。この冷却材流量と温度変化に伴って炉上部プレナム内に 温度成層化現象が発生する。この成層界面には鉛直方向に急峻な温度勾配が形成され、時間経過と ともに成層界面が上昇すると、炉容器構造材に熱荷重が発生する。また、成層界面が揺動すると炉 容器壁に熱荷重が繰り返し負荷され、構造健全性を損なう可能性がある。

そこで、1/10 縮尺原子炉容器上部プレナム試験装置を用いて、炉容器壁近傍と炉容器壁との熱伝 達を含む成層界面挙動の支配因子を把握するための熱流動パラメータ試験、および燃料交換機貫通 孔プラグ高さをパラメータとした試験を実施し、原子炉スクラム時における炉上部プレナム内の温 度成層化現象発生時のプレナム内温度特性、および界面の揺動に伴う構造材の温度変動について評 価した。

本試験により、スクラム時の炉心出口流量、炉心出口温度差で定義した Ri 数と成層界面高さ、上 昇速度との関係について明らかにした。また、成層界面温度勾配と Pe 数の関係を明らかにした。

大洗研究開発センター(駐在):〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

+大洗研究開発センター、技術開発部

*株式会社 NESI

Experimental Study on Thermal Stratification in Compact Reactor Vessel of Sodium Cooled Fast Reactor

- Effects of Core Outlet Velocity and Temperature Difference during Scram -

Nobuyuki KIMURA, Kenji HAYASHI+, Akira TOBITA+ Hideki KAMIDE and Kazuyoshi NAGASAWA*

FBR Systems Technology Development Unit Advanced Nuclear System Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 17, 2010)

Thermal stratification after a scram is one of main thermal loads of a reactor vessel in sodium cooled fast reactor. Water experiments using a 1/10th scale model were carried out for an advanced loop type sodium cooled reactor, which was designed in the fast reactor cycle technology development project (FaCT). The reactor vessel is highly compact and has an upper inner structure (UIS), which consists of perforated baffle plates and has a slit in radial direction for fuel handling.

The experimental parameters were the core outlet velocity, the temperature difference during scram, and height of the plug which infill the hole at the dipped plates for setup of the fuel handling machine. The dominant factors of the thermal stratification in the reactor vessel were clarified in the water experiment. It was found that the height and the rising speed of stratification interface depended on the Richardson number. Furthermore the temperature gradient across the stratification interface depended on the Peclet number.

Keywords: Thermal Stratification Phenomena, Column-type UIS, Upper Plenum, Sodium Cooled Fast Reactor, FaCT Project, Richardson Number, Thermal Stratification Interface

⁺ Technology Development Department, Oarai Research and Development Center

^{*} NESI Incorporation

目次

1 序	\$論…	
2.	試験	
	2.1	ループ構成 3
	2.2	試験装置
	2.3	試験条件およびパラメータ4
	2.4	炉心スクラム時の過渡条件4
	2.5	計測手法
3.	試験	結果
	3.1	リファレンス体系における温度成層化現象6
	3.2	温度成層化現象に対する FHM プラグ高さの影響10
	3.3	温度成層化現象に対する炉心出口流速・スクラム前後の温度差の影響12
	3.3	3.1 温度成層化現象に対する炉心出口流速の影響
	3.3	3.2 温度成層化現象に対するスクラム前後の温度差の影響
	3.3	3.3 同一 Richardson 数条件下での炉心出口流速、温度差の影響
	3.4	無次元数による温度成層化現象の評価
	3.5	壁面近傍流体と炉容器壁の熱伝達に関する評価17
4.	結論	
謝辞	<u> </u>	23
参考	;文献	

Contents

1. Introduction 1					
2. Experiment ····································					
2.1 Test Loop					
2.2 Experimental Apparatus 3					
2.3 Experimental Condition and Parameters					
2.4 Transient Condition of Scram 4					
2.5 Measurement Techniques 5					
3. Experimental Results 6					
3.1 Thermal Stratification Phenomena in Reference Case6					
3.2 Effect of FHM Plug Height on Thermal Stratification 10					
3.3 Effect of Thermalhydraulic Parameters on Thermal Stratification 12					
3.3.1 Effect of Core Outlet Velocity 12					
3.3.2 Effect of Temperature Difference during Scram					
3.3.3 Effect of Velocity and Temperature Difference under Ri Similarity Condition 15					
3.4 Evaluation of Thermal Stratification using Dimensionless Number					
3.5 Evaluation of Heat Transfer from Fluid to Reactor Vessel Wall					
4. Conclusions 21					
Acknowledgment ······ 23					
References 23					

図表リスト

【表リスト】

【図リスト】

図 2.1.1	炉内成層化水流動試験装置のループ構成図
図 2.2.1	1/10 縮尺炉容器上部プレナム試験体の概略構造図
図 2.4.1	トリップ試験フロー
図 2.4.2	原子炉スクラム時の炉心出口温度、流量の過渡変化
図 2.5.1	熱電対ツリーの概略構造図
図 2.5.2	熱応答板概略図
図 2.5.3	熱電対ツリー設置位置
図 3.1.1	計測位置による時間平均鉛直方向温度分布の比較
図 3.1.2	計測位置による温度変動強度鉛直方向分布の比較
図 3.1.3	温度成層界面高さおよび成層界面幅の導出
図 3.1.4	温度成層界面高さと厚さの時間推移の比較43
図 3.1.5	温度成層界面の温度勾配
図 3.1.6	規格化温度の時間推移の比較
図 3.1.7	成層界面の温度変動に関する PSD の比較
図 3.2.1	時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響
図 3.2.2	温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響
図 3.2.3	温度成層界面高さの時間推移に関するプラグ高さの影響
図 3.2.4	温度成層界面における上昇速度に関するプラグ高さの影響
図 3.2.5	温度成層界面厚さの時間推移に関するプラグ高さの影響80
図 3.2.6	温度成層界面の温度勾配に関するプラグ高さの影響
図 3.2.7	温度成層界面での温度変動の PSD に関するプラグ高さの影響
図 3.3.1	時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響
図 3.3.2	温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響
図 3.3.3	温度成層界面高さに関する炉心出口流速の影響
図 3.3.4	温度成層界面における上昇速度に対する炉心出口流速の影響
図 3.3.5	温度成層界面厚さに関する炉心出口流速の影響

図 3.3.7 温度成層界面での温度変動の PSD に関する炉心出口流速の影響	図 3.3.6	温度成層界面の温度勾配に関する炉心出口流速の影響	116
図 3.3.8 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響	図 3.3.7	温度成層界面での温度変動の PSD に関する炉心出口流速の影響	118
図 3.3.9 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響	図 3.3.8	時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響	120
図 3.3.10 温度成層界面高さに関する炉心出口温度差の影響	図 3.3.9	温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響	130
図 3.3.11 温度成層界面の上昇速度に関する炉心出口温度差の影響	図 3.3.10	温度成層界面高さに関する炉心出口温度差の影響	140
図 3.3.12 温度成層界面厚さに関する炉心出口温度差の影響	図 3.3.11	温度成層界面の上昇速度に関する炉心出口温度差の影響	142
図 3.3.13 温度成層界面の温度勾配に関する炉心出口温度差の影響	図 3.3.12	温度成層界面厚さに関する炉心出口温度差の影響	143
図 3.3.14 温度成層界面での温度変動の PSD に関する出口温度差の影響	図 3.3.13	温度成層界面の温度勾配に関する炉心出口温度差の影響	145
図 3.3.15 時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	図 3.3.14	温度成層界面での温度変動の PSD に関する出口温度差の影響	147
 図 3.3.16 温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 図 3.3.17 温度成層界面高さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 図 3.3.18 温度成層界面の上昇速度に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 図 3.3.19 温度成層界面厚さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 図 3.3.20 温度成層界面の温度勾配に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 図 3.3.21 温度成層界面での温度変動の PSD に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 	図 3.3.15	時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	149
 図 3.3.17 温度成層界面高さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 図 3.3.18 温度成層界面の上昇速度に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 図 3.3.19 温度成層界面厚さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 図 3.3.20 温度成層界面の温度勾配に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	図 3.3.16	温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	159
 図 3.3.18 温度成層界面の上昇速度に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 図 3.3.19 温度成層界面厚さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 図 3.3.20 温度成層界面の温度勾配に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響 図 3.3.21 温度成層界面での温度変動の PSD に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	図 3.3.17	温度成層界面高さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	169
図 3.3.19 温度成層界面厚さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	図 3.3.18	温度成層界面の上昇速度に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	171
図 3.3.20 温度成層界面の温度勾配に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	図 3.3.19	温度成層界面厚さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	172
図 3.3.21 温度成層界面での温度変動の PSD に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	図 3.3.20	温度成層界面の温度勾配に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	174
	図 3.3.21	温度成層界面での温度変動の PSD に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響	176

図 3.4.1	上昇速度、温度成層界面に関する炉心出口流速・温度差の影響	180
図 3.4.2	上昇速度、温度成層界面に関する同 Ri 数の炉心出口流速・温度差の影響	181
図 3.4.3	温度成層界面に関する Ri 数の関係	182
図 3.4.4	温度成層界面に関する Pe 数の関係	183

図 3.5.1 壁面近傍流体と構造材との熱伝達に関する影響 18	図 3.5.1	壁面近傍流体と構造材	との熱伝達に関す	る影響	85
----------------------------------	---------	------------	----------	-----	----

1. 序論

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)では、FBR サイクル実用化研究開発(FaCT) [1] のプロジェクトにおいて、ナトリウム冷却炉の設計検討を行っている。安全性を十分確保 した上で、将来の軽水炉と同等のコストパフォーマンスを有する炉とするために、これまでの ナトリウム炉の設計(例えば日本原子力発電㈱が実施した実証炉(DFBR)設計研究^[2])と比 べ、システムを大幅に簡素化・コンパクト化した設計を進めている。原子炉容器に関しては、 炉容器径を DFBR と同程度の約 10m としながらも、電気出力を約 2.5 倍(60 万 kWe 級→150 万 kWe 級)としていることから、冷却材であるナトリウム流量が増加する。また、原子炉容器 上部の燃料交換器システムを簡素化し、炉容器径を小さくするために、制御棒案内管や燃料集 合体出口温度計測系、それらの支持構造などからなる炉上部機構(UIS)の一部に燃料交換機 (FHM) アームが通過するため切り込みを有する構造を採用している。また、炉容器をコンパ クト化したことで炉出力に比べて炉容器のナトリウムインベントリが小さくなっている。そこ で、スクラム時などの熱過渡を緩和させるために UIS 内部へのナトリウムの通過を許容するこ とで混合するナトリウム容量を増やすとともに、上部プレナム内の流速の均一化を図るために、 多孔水平板と制御棒上部案内管から構成されるコラム型の UIS を採用している ^[3]。一方で、冷 却材流量の増加により原子炉容器内の液面近傍の流速が増大することでカバーガスを巻き込 む等の課題が挙げられ、設計対策として液面直下に水平板(ディッププレート)を置くことと した。

原子力機構では、コンパクト化した炉上部プレナム内の流動特性を把握し流動場を適正化す る構造を検討するために、多次元流動解析^[4]を実施した。これと並行して実機を 1/10 縮尺で モデル化した炉上部プレナム水流動試験(1/10 縮尺原子炉容器上部プレナム試験)を用いて、 炉内流況の適正化を実施してきた。これまで定格運転状態を対象として、UIS の構造(バッフ ル板の鉛直方向設置位置、多孔率、構造物の付加など)をパラメータとし、ディッププレート 下面の流況を制御することによって、高流速に伴うキャビテーションや液面近傍の流速低減を 図ることができ、定格時での実機成立性の見通しを得てきた^[5]。

一方、原子炉スクラム時では急激な炉心出力低下に伴う熱過渡を緩和するために、冷却材の 流量を急激に低下させる必要がある。その際、高温の冷却材で満たされた炉上部プレナムの下 層には低温の冷却材が、上層には高温の冷却材が層を形成する温度成層化現象が発生する。こ の成層界面には鉛直方向に急峻な温度勾配が形成され、時間経過とともに成層界面が上昇する ことに加え、成層界面の振動により、構造材に熱荷重が発生し、構造健全性を損なう可能性が ある。DFBRとは異なり、切込みを有するコラム型 UIS を採用したことによりこれまでの成層 化現象特性と異なる可能性がある。そこで、1/10 縮尺原子炉容器上部プレナム試験装置を用い てスクラム時の成層化を把握する試験を実施している。

前回の試験では、原子炉スクラム後の炉心出口流量、温度をパラメータとした熱流動パラメ ータ評価試験、および、UIS を多孔胴巻き構造にする等の構造パラメータ評価試験を実施し、 UIS 切込みによって非対称で局所的に速い流れが生ずるような状況での炉内温度成層化現象の 特徴を把握した^[6]。

本報では、1/10 縮尺原子炉容器上部プレナム試験装置を用いて、UIS 内部を含む、成層界面 の挙動評価を行うとともに、炉容器壁近傍と炉容器壁との熱伝達を含む成層界面挙動の支配因 子を把握するための熱流動パラメータ試験、および燃料交換機貫通孔プラグ高さをパラメータ とした試験を実施し、原子炉スクラム時における炉上部プレナム内の温度成層化現象発生時の プレナム内温度特性、および温度変動に対する構造材への熱伝達特性について評価した。

2. 試験

2.1 ループ構成

本試験に用いた炉内成層化水流動試験装置の系統構成を図 2.1.1 に示す。本装置は、1/10 縮 尺原子炉容器上部プレナム試験体、低流量ポンプ、冷水タンクおよび加熱器から構成される。 低流量循環系ループの低流量ポンプは 30m³/h の定格流量を有し、インバータ制御で流量調整が できる。加熱器ヒータ出力は最大 95kW まで設定可能である。これらの機器は、デジタル制御 システムにより集中コントロールされており、様々な過渡変化をプログラム制御により模擬す ることが可能となっている。

図 2.1.1 に示すように、冷却タンクは切換え弁(三方弁)によって冷却系ループに接続する ことができ、単独での温度調整を可能とした。また、冷却タンクをバイパスするループで加熱 器による炉容器上部プレナム内の初期温度調整を可

能とした。過渡試験は三方弁を操作し、冷水タンクの冷水を低流量循環ループによりプレナ ム内に流入させて実施する。以下に試験手順を示す。

- 定格運転時の模擬として上部プレナム試験体内の水温を高温にする。
 低流量ポンプから吐出した水を加熱器により加熱し、試験体内の水温を上昇させる。これ
 により、試験体内の水を所定の温度に設定する。
- ② 冷水タンク内の水を低温状態にする。 チラーで冷却された水をチラー内のポンプによって冷水タンクに循環させ、スクラム後に 試験体内に流出させる低温水を所定の温度となるように貯水する。
- ③ 高温側が所定の温度に到着したあと、加熱器を停止し、温度の均一化を図るための循環運転を行う。低温側も同様であり、スクラム開始前にはチラー内ポンプも停止する。
- ④ スクラム開始信号により、所定のフローコーストダウンカーブに従いポンプの回転数を制 御する。また、冷却タンク前後に設置した三方弁を切り替え、高温水を冷却タンク上部に 流入させるとともに、低温水を試験体に流入させる。

2.2 試験装置

図 2.2.1 に 1/10 縮尺原子炉容器上部プレナム試験体の概略構造図を示す。試験体部は、アク リル樹脂で炉容器内径が 960mm、高さ 1,200mm で、炉容器外周をウォータジャケットで覆う ことによって、可視化試験、PIV(粒子画像流速計測法)計測等における炉容器での屈折の影 響を低減している。炉内に設置されている主要の機器として、制御棒案内管、多孔板を含む炉 上部機構(UIS)、ホットレグ配管(H/L)、コールドレグ配管(C/L)、コールドトラップ(C/T)、 浸漬型熱交換器(DHX)燃料出入案内管(FT)、燃料交換機貫通孔プラグ(FHM プラグ)で構 成されている。また、FHM プラグの設置位置に関して、プラグ下端がバッフル板 1 段目(以 下、B/P#1 とする)、およびバッフル板 4 段目(以下、B/P#4 とする)の下面の位置とする 2 パ ターンを設定した。

2.3 試験条件およびパラメータ

表 2.3.1 に試験条件の一覧を示す。ここで示した実機条件は主循環ポンプによる強制循環を 対象とし、ポンプの定格 15%流量での運転を想定している。試験パラメータは、温度成層化現 象の支配因子と考えられる慣性力と浮力の比である Richardson 数(Ri 数)を実機条件と同様に し、構造物形状変化、炉心全体の流量および温度差とした熱流動パラメータ試験を行った。前 回の試験^[6]より、FHM プラグ設置位置が低い方が温度成層界面の温度勾配は低下する結果が 得られたことから、構造物形状をパラメータとした試験として、FHM プラグのバッフルプレ ート1段目をデフォルトとし、4段目にしたケースも併せて実施した。熱流動パラメータ試験 については、スクラム後の流量をリファレンスケースの約2倍および 1/2倍とした高流速条件 (High-V)、低流速条件(Low-V)、スクラム前後の温度差をリファレンスケースの25℃から

(High-V)、低加速条件(Low-V)、スケノム前後の温度差をサノナレジスケースの 25 Cから 10 \mathbb{C} 、35 \mathbb{C} に変更した低温度差条件(Low- Δ T)、高温度差条件(High- Δ T)、Ri 数を一定とした 高流速、高温度条件(High- Δ T-V)を設定した。

また、構造物形状をパラメータとした試験(FHM プラグ位置:B/P#1、B/P#4)においては、 炉容器壁近傍流体および炉容器壁への熱伝達特性を把握するため、熱電対を設置したツリーお よび模擬構造物(熱応答供試板)を壁近くに挿入した。その結果、計測位置(角度、255°、200°、 135°)を変えて温度計測をするために、同条件で3回計測を行った。その他の試験ケースは、 炉容器壁近傍の流体温度を計測する熱電対ツリーを200°の位置、熱応答供試板を255°位置に設 置して計測した。無次元数の定義を以下に示す。

$$Ri = \frac{g\beta\Delta TL}{V^2}$$

 $Re = \frac{VL}{v}$ (2.1)
 $g : 重力加速度 (9.8m/s^2)$
 $\beta : 体積膨張率 (1/°C)$
 $\Delta T : 炉心出口のスクラム前後の温度差 (°C)
 $L : 代表長さ(炉心頂部からの H/L 入口高さ) (m)$$

V :代表流速(燃料集合体部炉心出口)

ν :動粘性係数

2.4 炉心スクラム時の過渡条件

図 2.4.1 にトリップ試験フローを示す。また、図 2.4.2 に実機(2001 年度設計モデル)および 今回の炉内成層化水流動試験のリファレンスケースでのスクラム時における炉心出口温度、流 量の過渡変化を示す。過渡変化においては、実機のスクラム時の内側炉心出口温度を基準とし た。リファレンスケースを例にすると、試験では、試験開始前に、炉上部プレナム試験体を含 むバイパスラインを 30m³/h の流量で目標温度 40℃に一定時間保持する。一方、冷却タンクは チラーで目標温度 15℃に設定する。試験開始後、バイパスラインから冷却タンク側のラインに

(m/s)

 (m^2/s)

切り替えるが、冷却タンクを含む配管の圧損の影響で流量が 27m³/h に低下する。試験開始後 140 秒後からトリップ後目標流量 13.4m³/h に 60 秒で低下させる。炉心領域流路(配管)、プラ ンケット領域流路(配管)の温度は試験開始後から徐々に低下する。試験体下部にある模擬炉 心部および試験体までの配管に含まれる高温水によって、炉心出口温度は時間遅れを伴って低 下する。また、この時間遅れのため、実際の原子炉で生じる急激な温度低下を模擬することは できない。従って、本試験では成層界面形成後の上昇過程を計測の対象とする。よって、過渡 変化が安定する約 600sec 以降を評価対象とした。その後は冷却タンクの低温水がなくなるまで 一定条件で保持する。

2.5 計測手法

温度計測は、熱電対ツリーと炉心出口領域およびホットレグ配管入口に設置した熱電対で行 った。図 2.5.1 に各熱電対ツリーの概略構造を示す。プレナム用熱電対ツリーは鉛直方向に 20mm ピッチ間隔で熱電対を配置し、UIS 外側のプレナム内の高さ方向の温度分布が計測でき る。UIS 用熱電対ツリーは、プレナム用ツリーに比べ、小径管で製作し B/P の孔に通すことを できるようにした。UIS 熱電対ツリーは、5mm および 20mm・40mm ピッチ間隔で熱電対が配 置されており、UIS 内部の温度分布を計測することができる。可動式熱電対ツリーは 5mm ピ ッチ間隔で熱電対が配置され、計測位置(高さ)が調整できるため成層界面の詳細な温度分布 計測が可能である。炉容器壁近傍熱電対ツリーは、可動式であり鉛直方向に 5mm ピッチ間隔 で配置し、模擬炉容器壁との熱伝達を把握するため熱応答供試板を設置した。図2.5.2に示す。 熱応答供試板は SUS316 製であり炉容器壁に接するように挿入する。実際の炉容器壁と若干位 置は異なるもののほぼ炉容器壁を模擬できると考える。また、板には高さ方向に3ヶ所の温度 計測箇所を設置している。各計測箇所には、壁近傍の流体温度(壁から 1mm)、壁表面近傍の 構造材温度(壁表面より 0.25mm 構造材内部)、構造材内部(表面より 1mm 内部)の 3 点の温 度が計測できるように熱電対を設置している。図 2.5.3 に熱電対ツリーを用いた温度計測位置 を示す。熱電対は全て外径 0.5mm の非接地 K 型あるいは T 型熱電対を使用し、熱電対ツリー は、試験装置に取り付ける前に恒温槽を用いた絶対校正と、その絶対校正で求められた基準熱 電対をもとに相対校正を行った。試験体に設置した熱電対においては、相対校正を実施した。 熱電対の起電力信号は、零接点補償回路、DC アンプ、ローパスフィルターを通し、その後校 正で求めた校正曲線により温度データとした。校正曲線により求めた温度と基準温度との偏差 は、炉心出口の熱電対で、-0.5℃~0.3℃、D18 位置の熱電対ツリーで-0.6℃~0.9℃、D02、D04、 D15 位置の熱電対ツリーで±0.1℃以内、その他の熱電対ツリーで±0.06℃以内であった。計測 は 50Hz サンプリング(0.02 秒間隔)で、Low-V ケース、Low-ΔT-V ケースは約 7200sec、その 他の条件で約3600sec 収録した。

3. 試験結果

3.1 リファレンス体系における温度成層化現象

ここでは、2.3 節で示したように FHM プラグ設置位置が低いほうが温度成層界面の温度勾配 が低下する結果が得られたことから FHM プラグ設置位置をバッフルプレート 1 段目に設置し たケースをリファレンスとした。

(1) 上部プレナム内温度、温度変動強度における鉛直方向分布の時間変化

上部プレナム内の異なる径方向、周方向位置における時間平均温度の鉛直方向分布を図 3.1.1-1~5 に示す。温度分布は、各時刻における前後 5 秒間(全 10 秒間、500 点)の平均であ り、炉心出口の初期定常-スクラム後の温度差で規格化を行った。式を以下に示す。また、鉛直 方向高さは、炉心出口位置を原点(0mm)と示した。熱電対は、Position-D18 について、鉛直 方向に対し、20mm ピッチ間隔、Position-U04、U08 は、20mm ピッチと 40mm ピッチ間隔で計 測され、その他の熱電対においては 5mm ピッチで計測している。

$$T^* = \frac{T - T_{Min}}{T_{Max} - T_{Min}} \tag{3.1}$$

また、推移時間については、炉上部プレナム内の流体が入れ替わる時間を基準として、スク ラム後の炉心出口流速と代表長さを用いて規格化した。無次元時間は以下に示す式を用いた。

$$t^* = t \frac{V}{L} \tag{3.2}$$

t :スクラム開始からの実時刻(s)

L :代表長さ(炉心頂部からの H/L 入口高さ 0.28m)

▶ :代表流速(スクラム後の炉心出口流速)

異なる径方向位置での鉛直方向温度分布に関し、UIS 切込み側では、時間が経過するに従い UIS 内部(Position-U03)で温度勾配が大きく、外側の炉容器壁近傍(Position-D02~W01)に 向うに従い温度勾配が僅かに緩やかになる傾向を示している。DHX 側 135°においては、UIS 内部から炉容器壁近傍にかけてほぼ同様な分布を示し、径方向位置に依存していないことがわ かる。DHX 側 90°は、UIS 内部と外部の2点での比較であるが、温度分布の傾向はほぼ一致し ていることがわかる。

UIS 内部、および炉容器壁近傍での鉛直方向温度分布の周方向依存性に関し、UIS 内部においては、上で述べたように Position-U03 の温度勾配は大きく、切り込みからの速い流れの影響を受けていることがわかる。また、比較的 UIS 切込み側に近い位置(Position-U06)も温度勾配が大きくことがわかる。一方、H/L 配管に近い位置(Position-U08)での温度勾配は他の位置より小さくなっていた。炉容器壁近傍に関して、早い時間においては各位置での温度分布はば

らつきがあるが、時間が推移するに従い Position-W01、W03 の温度分布は同様になっている。 H/L 配管に近い位置(Position-W02)では、他の位置よりも温度勾配が小さくなっていること がわかる。

炉上部プレナム内の異なる径方向、周方向位置における温度変動強度の鉛直方向分布の比較 を図 3.1.2-1~5 に示す。温度変動強度は、各時刻の前後 5 秒間(全 10 秒間、500 点)を用いて 算出した。なお、温度変動強度は、温度変動の二乗平均(標準偏差)とし次の式で定義する。

$$T_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (T_i - T_{Avg})^2}{N}} \qquad T_{Avg} = \frac{\sum_{i=1}^{N} T_i}{N}$$
(3.3)

上式により求められた温度変動強度は、以下の式に示すように炉心出口の初期定常-スクラム 後の温度差で無次元化した。

$$T_{RMS}^* = \frac{T_{RMS}}{T_{max} - T_{min}} \tag{3.4}$$

温度変動強度分布の径方向依存性について、UIS 切込み側では、スリットからの流れの影響 によって Position-U04、U03、D02 の位置において温度変動強度は大きく、時間経過とともに大 きい領域が上昇し、特に UIS 内部(Position-U03)では大きくなっていることがわかる。一方、 切込み側の炉容器壁近傍(Position-D04、W01)の温度変動強度は小さくなっている。DHX 側 135°、90°では、UIS 切込み側と比べ、規格化時間 t*=50 で僅かに温度変動強度は大きくなって いるが、それ以外では、ほとんど温度変動は発生していないことが確認できる。

温度変動強度分布の周方向依存性について、UIS 内部では、上で述べたように UIS 切込みに 近い位置(Position-U04、U06)で温度変動強度は大きいが、それ以外の場所では温度変動がほ とんど発生していないことがわかる。炉容器壁近傍に関しては、過渡初期で Position-W01 の温 度変動強度は大きいが、その後、温度変動はほとんど発生していない。また、僅かに H/L 配管 に近い位置で温度変動の発生が確認できる。

(2) 温度成層界面位置における時間推移

図 3.1.3 に温度成層界面高さ、および成層界面の算出方法を示す。10 秒間で時間平均した温度の鉛直方向分布に対して図に示したように T*=0.5 をまたぐ 2 点間を直線近似したときの T*=0.5 となる鉛直方向位置を温度分布が得られた時刻の成層界面高さと定義した。また、 T*=0.2、0.8 となる位置を求め、T*=0.2、0.8 の鉛直方向幅を成層界面厚さと定義した。この定義に従い、10 秒毎の高さと厚さを算出した。

図 3.1.4-1~2 に径方向、周方向における成層界面高さと厚さの時間推移の径方向/周方向依存性の比較を示す。

成層界面高さの径方向依存性について、UIS 切込み側では、UIS 内部(Position-U03)は、他の位置に比べ、僅かに高い位置で成層界面が形成されていることがわかる。DHX 側(Position-U19、D15)では、ほぼ同等な成層界面高さを示しているのに対し、炉容器壁近傍(Position-W03)は、他の位置に比べ、僅かに成層界面が高い位置で形成されていた。成層界

面位置の上昇速度(位置の時間変化率)は、場所に依らずほぼ同じであった。成層界面厚さに 関して、UIS 切込み側では、スリットの流れの影響を受けている UIS 内部(Position-U03)で成 層界面が薄く、その他の位置についてはほぼ同等な成層界面厚さを示していた。UIS 内部 (Position-U04)の振動は、計測熱電対ピッチが 20mm・40mm と粗いために発生した現象であ る。DHX 側の成層界面厚さに関しては、全ての位置においてほぼ同様な厚さを示しており、 UIS 切込み側と比べ、成層界面が厚いことが確認できる。

成層界面高さの周方向依存性において、UIS 内部では、上で述べたように Position-U03 で成 層界面位置が高く、その他の位置についてはほぼ同様な高さを示していることがわかる。炉容 器壁近傍では、DHX 側 (Position-W03)の成層界面位置は他の位置と比べて、僅かに高く、炉 壁に沿って上昇する流れが発生していると考える。成層界面厚さの周方向依存性について、UIS 内部では、切込み側 (Position-U03)で薄く、H/L 配管の近く (Position-U08)で厚く、その他 の位置 (Position-U06、U09、U10)においては、ほぼ同じ厚さを示していた。炉容器壁近傍に おいて、UIS 切込み側 (Position-W01)で成層界面がその他の位置と比べ薄くなっている。こ れは、スリットからの流れの影響で成層界面を削り込む流れが存在している可能性は高く、そ れにより界面が薄くなっていると考えられる。

(3) 成層界面における温度勾配の影響

上部プレナム内温度成層化現象に対する構造健全性評価を行うために"時間平均化した鉛直 方向の規格化温度分布の温度幅(t*=0.2~0.8)"を成層界面の厚さと定義して評価を行った。 しかし、時間平均化することで温度分布が鈍るため、その影響で勾配自体分布が小さくなり、 実現象に比べ、非安全側の評価となる可能性がある。そこで、瞬時の温度分布から最大温度勾 配を求めることで、構造健全性評価に用いる温度勾配データを得た。図3.1.5-1~2 に瞬時の温 度勾配に対して温度勾配の時間推移、および温度勾配を導出した位置の径方向/周方向依存性 を示す。また、温度成層界面の温度勾配の定義について以下に示す。

・温度成層界面の定義

ここで、成層界面の最大温度勾配は、隣り合う計測点の規格化温度差を計測位置間の距離に 除した値と定義した。算出手順を以下に示す。

①瞬時の鉛直方向温度分布を用いて隣り合う計測点間の温度勾配gを全て求める。

$$g_i = \frac{T_{i+1}^* - T_i^*}{H_{i+1} - H_i}$$
(3.5)

②瞬時の鉛直方向温度分布での最大の温度勾配を選出する。

①で求めた温度勾配の最大値を成層界面の温度勾配とする。

$$g_{Max} = Max(g_i)$$

(3.6)

③温度勾配の時間変化に対する移動平均処理

成層界面の温度変動が激しい場合、すなわち、界面の変動が激しい場合、5mm ピッチの熱電 対で正確な瞬時温度勾配が算出できない可能性がある。そこで、得られた瞬時の温度勾配につ いて移動平均処理を施して時間変化を平滑化することによって、計測位置による誤差を低減し、 温度勾配の時間推移を評価する^[6]。既報^[6]において、最大温度勾配の瞬時値と移動平均値、 および時間平均温度分布から求めた温度勾配との比較を実施し、移動平均による評価が妥当で あることを確認した。

瞬時の最大温度勾配と最大温度勾配が発生した鉛直方向位置を図 3.1.5-1~2 に示す。最大温 度勾配は、各時刻の前後 5 秒、計 10 秒(500 点)で求め、その結果を移動平均しプロットした ものである。また、階段状に変化している箇所は熱電対の配置ピッチが 20mm と粗く精度が低 下しているためである。

温度勾配の径方向依存性について、UIS 切込み側では、UIS 内部の外側(Position-U03) は、 スリットからの流れの影響で成層界面での温度勾配は大きく、炉容器壁近傍に向うに従い各位 置の温度勾配が小さくなる傾向で示しているが、UIS 内部の内側(Position-U04)の温度勾配が 他の位置と比べ小さいことがわかる。また、最大温度勾配の発生高さについて、Position-U03 は高い位置で形成され、その他の位置はほぼ同様な高さで形成されていることがわかる。DHX 側においては、径方向位置に関わらず同様な温度勾配を示し、高さ位置についてもほぼ一致し ていることがわかる。すなわち、周方向位置による温度勾配を比較すると、DHX 側において は、UIS 切込みを通る流れの影響をほとんど受けていないことが考えられる。

温度勾配の周方向依存性において、UIS 内部では、Position-U03 で温度勾配は大きく、その 他の位置はほぼ同様な温度勾配である。温度勾配の高さ位置に関して、Position-U3 で僅かに大 きく、Position-U10 で僅かに低い位置で形成されていることがわかる。このことから、UIS 内 部では UIS 切込み側で高く、DHX 側では低い成層界面となっていることが考えられる。炉容 器壁近傍について、Position-W01 では、他の位置に比べ、規格化時間約 t*=600 まで温度勾配が 僅かに大きく、その後同様な傾向を示している。しかし、温度勾配の高さ位置に関しては、各 位置ともほぼ同じ高さ位置で形成されていることが確認できる。すなわち、炉容器壁近傍の成 層界面は、周方向に高さの差をほとんどもたないことがわかる。

(4) 温度成層界面における温度変動特性

UIS 切込み側と DHX 側の UIS 内部および炉容器壁近傍に対して、炉上部プレナム内温度変動の比較を図 3.1.6 に示す。計測点位置は 360mm の高さとした。この高さは、計測時刻約 t*=300 (900 秒)のとき温度成層界面が通過する位置である。図は、横軸が無次元時刻 t*=0~1000 と t*=280~330 の 2 領域である。また、炉容器壁近傍 (Position-W01、W03) においては、同時計測ではない。

UIS 内部での UIS 切込み側と DHX 側の温度変動を比べると、UIS 切込み側(Position-U03)の温度変動は激しく、DHX 側(Position-U09)は小さいことがわかる。一方、炉容器壁近傍では、Position-W01、W03 とも同様な温度変動を示し、温度変動が概ね小さいことがわかる。

各位置での温度成層界面での温度変動の周波数特性を評価するため、パワースペクトル密度 (以下、PSD)の評価を行った。PSDは、規格化時刻t*=300(約900秒)、t*=600(約1800秒) での各位置の最大温度勾配を示す高さを求め、その位置に最も近い計測点の温度データを前後 50秒(計100秒、5000点)抽出して処理を実施した。PSDは、高速フーリエ変換(FFT)を用 いて求めた。スペクトルの平滑化の手法として、ガウス窓を設定し、この窓関数を時間経過に 沿って切り出した20秒間(1024データ)に乗じて求めた FFT 結果を平均化して、温度変動の パワーを算出した。その際、得られたパワーにガウス窓による低下した割合の補正を行った。 図 3.1.7 に規格化時刻 t*=300、600 における径方向、および周方向での成層界面に対する温度変 動の PSD の比較を示す。

PSD に対する径方向依存性について、UIS 切込み側では、規格化時刻 t*=300、600 とも、低 周波数成分から高周波数成分にかけて UIS 内部(Position-U03、U04)で PSD が大きく、炉容 器壁近傍に近づくに従い徐々に PSD が小さくなっていることがわかる。DHX 側の PSD につい ては、規格化時間 t*=600の UIS 内部(Position-U09)で僅かに PSD が低下しているが、全ての 位置においてほぼ同様な傾向を示していることがわかる。また、UIS 切込み側と DHX 側を比 べると、UIS 切込み側のほうが大きい PSD を示していることが確認できる。

PSD に対する周方向依存性ついて、UIS 内部では、上で述べたように UIS 切込み側 (Position-U03)の PSD は非常に大きくなっており、規格化時刻 t*=300 では、H/L 配管に近い 位置(Position-U08)で一番 PSD が小さくなっているが、規格化時刻 t*=600 になると、DHX 側に近づくに従い各位置の PSD は徐々に小さくなる傾向となっている。炉容器壁近傍では、 UIS 内部と同様な傾向を示し、DHX 側に近づくに従い、各位置の PSD は徐々に小さくなって いる。

3.2 温度成層化現象に対する FHM プラグ高さの影響

リファレンスケース(FHM プラグ設置位置:バッフルプレート1段目)とFHM プラグをバ ッフルプレート4段目(以下、B/P#4)に設置した場合の成層界面挙動について評価を行った。

(1) 上部プレナム内温度、温度変動強度における鉛直方向分布の時間変化

上部プレナム内の温度分布の時間変化に対し、FHM プラグ高さをパラメータとしたケース について、各位置における時間平均温度の鉛直方向分布の比較を図 3.2.1-1~13 に示す。また、 温度変動強度の鉛直方向分布の比較を図 3.2.2-1~13 に示す。

各位置の鉛直方向温度分布から、B/P#4 ケースは、リファレンスケースと比べ、スクラム開始後から規格化時刻 t*=300 以降、成層界面が形成される位置が僅かに高く、温度勾配は大きくなる傾向を示していることがわかる。

温度変動強度について、リファレンスケースと B/P#4 ケースを各時刻で比べると、温度変動 強度が大きい位置(鉛直方向)に違いがあり B/P#4 ケースのほうが僅かに高い位置である。こ れは、UIS 切込みを通る流れが FHM プラグによって抑えられていることが原因である^[5]。また、 リファレンスケースと比べ、B/P#4 ケースのほうが温度変動強度は全体的に大きくなっている。

(2) 温度成層界面高さの時間推移

FHM プラグ高さをパラメータとしたケースについて、各位置の温度成層界面高さの時間変化の比較を図 3.2.3-1~3 に、成層界面高さの勾配から一次式線形近似により求めた上昇速度の比較を図 3.2.4 に示す。上昇速度は、炉心出口流速で規格化した。また、成層界面厚さの時間変化を図 3.2.5-1~3 に示す。

温度成層界面高さにおいて、B/P#4 ケースは、リファレンスケースと比べると、初期成層界 面高さはほぼ同じ高さであるが時間経過とともに徐々に差が大きくなっていくことがわかる。 上昇速度については、図 3.2.4 より B/P#4 ケースがリファレンスケースより僅かに大きいこと がわかる。界面上昇速度に対する径方向依存性をみると、UIS 切込み側では、UIS 内部から炉 容器壁近傍にかけてほぼ一定の上昇速度を示し、DHX 側では、UIS 内部より炉容器壁近傍で上 昇速度が僅かに小さくなっているがほぼ一定と考えられる。周方向依存性をみると、UIS 内部 では、UIS 切込み側で上昇速度はごく僅かに小さく炉容器壁近傍においても同様であり、全体 にほぼ一様であった。

温度成層界面厚さに関して、径方向依存性をみるとUIS 切込み側では、UIS 内部の成層界面 厚さが FHM プラグ高さに依らず、ほぼ同様な厚さを示している。UIS 外部から炉容器壁近傍 では、両ケースとも時間が経過するに従い、B/P#4 ケースは、リファレンスケースと比べ薄く なっていることがわかる。その他の位置においては、リファレンスケース、B/P#4 ケースとも ほぼ同様な成層界面厚さを示し、FMH プラグ高さの影響は小さいことがわかる。また、 Position-U04、U08、D18 に関し、成層界面の時間変化が階段状の分布となっている。これは、 3.1 節で述べたように速い流れの温度変動に対して計測熱電対ピッチが粗いために発生した現 象である。

(3) 温度成層界面における温度勾配への影響

FHM プラグをパラメータとしたケースについて、各位置の温度成層界面での温度勾配の時間推移の比較を図 3.2.6-1~3 に示す。

UIS 切込み側において、B/P#4 ケースは、リファレンスケースと比べ、UIS 内部 (Position-U03) では、温度勾配が僅かに小さいが、炉容器壁近傍に向うに従い B/P#4 ケースのほうが温度勾配 は僅かに大きい傾向を示していることがわかる。DHX 側に関して、B/P#4 ケースは、リファレ ンスケースと比べ、Position-U09、W03 では、最大値に違いは生じているが、ほぼ同程度の温 度勾配である。炉容器壁に近い位置 (Position-D15) では、規格化時刻 t*=600 ぐらいまで B/P#4 ケースのほうが温度勾配は大きくなっている。その他の位置に関しては、プラグ高さに依存せ ずほぼ同様な温度勾配を示した。

(4) 温度成層界面における温度変動特性

図 3.2.7-1~5 に FHM プラグ高さをパラメータとしたケースについて、各位置における温度 成層界面での温度変動 PSD の比較を示す。PSD は、規格化時刻 t*=300、t*=600 での各位置の 成層界面高さに最も近い熱電対の温度データ前後 50 秒間のデータを用いて求めた。PSD に用 いたデータは規格化している。手法に関しては 3.1 節と同じである。

PSD に関して、UIS 切込み側(Position-U04、U03、D02)では、B/P#4 ケースは、リファレ ンスケースと比べ、規格化時刻 t*=300 の時は、ほぼ同様な分布傾向を示しているのに対し、規 格化時刻 t*=600 では、B/P#4 ケースのほうが PSD は大きいことがわかる。UIS 切込み側の炉容 器壁近傍(Position-D04、W01)については、B/P#4 ケースの PSD が大きいことがわかる。DHX 側(Position-U13、D15、W03)に関しては、僅かにリファレンスケースほうが小さいものの、 ほぼ同様な傾向を示し、大きな違いはないことがわかる。 3.3 温度成層化現象に対する炉心出口流速・スクラム前後の温度差の影響

3.3.1 温度成層化現象に対する炉心出口流速の影響

原子炉スクラム後の炉心出口流速をリファレンスケースの約2倍,1/2倍とした高流速条件 (以下、High-V)、低流速条件(以下、Low-V)とした場合の温度成層化現象について評価を 行った。

(1) 上部プレナム内温度、温度変動強度の鉛直方向分布における時間推移

上部プレナム内の温度分布の時間推移に対し、炉心出口流速をパラメータとしたケースについて、各位置での時間平均温度の鉛直方向分布の比較を図 3.3.1-1~10 に示す。また、温度変動 強度の鉛直方向分布の比較を図 3.3.2-1~10 に示す。比較は同じ無次元時間で実施している。

各位置の鉛直方向温度分布について、High-V ケースは、リファレンスケースと比べると、高 い位置で成層界面が形成され、成層界面の上昇が速いことがわかる。一方、Low-V ケースは、 リファレンスケースより低い位置で成層界面が形成され界面の上昇が遅いことがわかる。この 傾向は、どの位置でもほぼ同じである。

温度変動強度に関して、UIS 切込み側をみると、High-V ケースは、リファレンスケースと比 べ、温度変動強度の大きい領域の上昇速度は大きく、Low-V ケースは、リファレンスケースよ り上昇速度が小さくなっている。また、主に UIS 切込み側でみられる温度変動強度は炉心出口 流速が大きいケースほど大きくなる傾向がみられる。

(2) 温度成層界面高さの時間推移

炉心出口流速をパラメータとしたケースについて、各位置の温度成層界面高さの時間推移を 図 3.3.3-1~2 に、成層界面の上昇速度の比較を、図 3.3.4 に、成層界面厚さの時間推移を図 3.3.5-1 ~2 に示す。上昇速度の規格化は 3.2 節と同じである。

温度成層界面高さ、および上昇速度は、全ての位置において成層界面形成の初期を除き、 High-V ケースは、リファレンスケースと比べ、成層界面位置は高く、上昇速度は大きくなって いる。途中でプロット線が切れているのは、熱電対ツリーの計測範囲から外れたためである。 一方、Low-V ケースについては、リファレンスケースと比べ、成層界面が低く、上昇速度が小 さくなっている。すなわち、成層界面上昇速度の大小は、炉心出口流速の大小と対応している ことがわかる。

成層界面厚さに関して、High-V ケースは、全ての位置で変動が大きく、UIS 切込み付近では リファレンスケースと同程度であるが、それ以外の個所では、リファレンスケースより薄くな っていることがわかる。Low-V ケースにおいては、リファレンスケースより成層界面が大きく、 時間経過とともに徐々に厚さが大きくなる傾向を示している。また、Position-U04、U08、D18

(3) 温度成層界面における温度勾配への影響

炉心出口流速をパラメータとしたケースについて、各位置の温度成層界面での温度勾配の時間推移の比較を図 3.3.6-1~2 に示す。また、高流速条件 High-V ケースは、界面上昇速度が大きいため約 t*=300 以降では計測範囲から外れ計測経過時間が短くなっている。

UIS 切込み側 (Position-U04、U03) について、High-V ケースは、リファレンスケースと比べ、

規格化時刻 t*=~300 付近でリファレンスケースと同様な温度勾配であり、大きな違いは見られ ないが、UIS 切込み側の炉容器壁近傍(D04) についてはリファレンスケースより大きい温度 勾配が認められた。Low-V ケースは、リファレンスケースより温度勾配が小さくなっている。 その他の位置においては、リファレンスケースと比べ、High-V ケースのほうが温度勾配は大き い、あるいは同等であった。一方、Low-V ケースは、リファレンスケースより温度勾配が小さ くなっていた。

(4) 温度成層界面における温度変動特性

炉心出口流速をパラメータとしたケースについて、各位置での温度成層界面の温度変動 PSD に対するストローハル数の比較を図 3.3.7-1~2 に示す。High-V ケースは、上で述べたように上 昇速度が大きいため、速い時間で熱電対ツリー (5mm ピッチ)の計測範囲から外れる。PSD は、 計測範囲内で収録されたほぼ最大時間の規格化時刻 t*=300 を抽出し、成層界面高さ位置に相当 する計測熱電対の前後 50 秒間のデータを用いて求めた。また、ストローハル数は以下の式で 定義した。

$$St = \frac{fL}{V_{space}}$$
(3.7)

f :周波数

L :代表長さ(炉心頂部からの H/L 入口高さ 0.28m)

V_{space}:平均流速(m/s)

UIS 切込み側について、UIS 内部(Position-U03,U04)の High-V ケースは、リファレンスケ ースと良く一致し、炉容器壁近傍(Position-D04)では、低周波数成分で僅かに違いがあるがほ ぼ同等であることがわかる。一方、Low-V ケースは、リファレンスケースと比べ、PSD は小さ くなっていることがわかる。DHX 側において、UIS 内部(Position-U09)では、Low-V ケース の PSD が大きく、炉容器壁近傍(Position-D15)では、High-V ケースが大きくなっている。UIS 内部に関しては、Position-U06、U08 において、High-V ケースの PSD のほうがリファレンスケ ースより大きく、Position-U10 では、全ケースともほぼ同等である。また、炉容器壁近傍 (Position-W02) では、High-V ケースは、リファレンスケースと比べ PSD は小さく、Low-V ケ ースはほぼ同等である。

3.3.2 温度成層化現象に対するスクラム前後の温度差の影響

原子炉スクラム後の温度差を 10℃とした低温度差条件(以下、Low-ΔT)と、温度差を 35℃ とした高温度差条件(以下、High-ΔT)の温度成層化現象について評価を行った。

(1) 上部プレナム内温度、温度変動強度の鉛直方向分布における時間変化

スクラム前後の温度差をパラメータとしたケースについて、上部プレナム内の各位置における時間平均温度の鉛直方向分布の比較を図 3.3.8-1~10 に示す。また、温度変動強度の鉛直方向分布の比較を図 3.3.9-1~10 に示す。比較は同じ無次元時間で実施している。

各位置の鉛直方向温度分布に関して、リファレンスケースと比べると、成層界面が形成され る位置は、Low-ΔT ケースが高く温度勾配は小さい。一方、High-ΔT ケースは、成層界面が低 く、界面での温度勾配は大きくなっている。また、Position-U03 の t*=50 をみると、Low-ΔT ケ ースおいて分布傾向に違いが生じ温度が低下している。これは、界面の上昇が大きいため急峻 に流れが上昇し、一旦温度が低下していると考えられ、その後、冷たい流体が廻りに流れ込み、 時間とともに温度が上昇している。(t*=100 の Position-U03 参照)

温度変動強度について、UIS 切込み側の UIS 内部 (Position-U03、U04、U06) をみると、Low-ΔT ケースは、リファレンスケースと比べ、温度変動強度の大きい領域の上昇速度は速くなってい る。一方、High-ΔT ケースは、リファレンスケースと比べ、遅くなっている。また、他の位置 については、UIS 切込み側でみられる大きな温度変動は見られずほぼ同等な値を示した。

(2) 温度成層界面高さの時間推移

スクラム前後の温度差をパラメータとしたケースについて、各位置の温度成層界面高さの時間推移を図 3.3.10-1~2 に、成層界面の上昇速度の比較を図 3.3.11 に、成層界面厚さの時間推移 を図 3.3.12-1~2 に示す。上昇速度の規格化は 3.2 節と同じである。なお、温度差が小さい Low-ΔT ケースは、成層界面の上昇が速いために、計測範囲から外れ、計測経過時間が短くなっている。

温度成層界面高さ、および上昇速度において、Low-ΔT ケースは、リファレンスケースと比 ベ、成層界面位置は高く、上昇速度は大きい。一方、High-ΔT ケースは、リファレンスケース と比べ、成層界面位置は低く、上昇速度は僅かに小さくなっているが大きな違いはないことが わかる。

温度成層界面の厚さについて、リファレンスケースと比べると、Low-ΔT ケースは、成層界 面が厚くなっているが、High-ΔT ケースは、僅かに成層界面が薄くなる程度で、ほぼリファレ ンスケースと同程度であった。

(3) 温度成層界面における温度勾配への影響

スクラム前後の温度差をパラメータとしたケースについて、各位置の温度成層界面での温度 勾配の時間推移を図 3.3.13-1~2 に示す。また、低温度差条件 Low-ΔT ケースは、成層界面の上 昇が速いため計測範囲から外れ計測経過時間が短くなっている。

径方向、周方向における全ての位置の温度勾配について、High-ΔT ケースは、リファレンス ケースより僅かに大きい傾向を示している。Low-ΔT ケースにおいて t*=200~300 付近をみると、 他の2ケースと比べ、ピーク値おいてはほぼ同程度であるが経過時間とともに温度勾配は小さ くなる傾向を示していることがわかる。

(4) 温度成層界面における温度変動特性

スクラム前後の温度差をパラメータとしたケースについて、各位置の温度成層界面での温度 変動 PSD の比較を図 3.3.14-1~2 に示す。PSD においては、Low-ΔT ケースの上昇速度が速い ため、規格化時刻 t*=200 に着目し、その時の成層界面高さに位置する計測熱電対の前後 50 秒 間のデータを用いて求めた。なお、High-ΔT ケースの Position -U06、D04 の位置においては、 熱電対エラーのためデータが欠落している。

温度変動の PSD に関して UIS 内部 (Position-U03,U04) において、リファレンスケースと比

べると、High- Δ T、Low- Δ T のケースとも、低周波数成分で僅かに違いが生じているが、全体的 なプロファイルとしてはほぼ一致していることがわかる。また、その他の位置については、PSD の分布傾向は同様であるが、Low- Δ T ケースは、リファレンスケースおよび High- Δ T ケースと 比べ、PSD は僅かに小さくなっている。

3.3.3 同一 Richardson 数条件下での炉心出口流速、温度差の影響

スクラム前後の温度差をリファレンスケースの 25℃から 10℃大きくして 35℃とし、流量を リファレンスケースの 13.4m³/h から 15.9m³/h として、Richardson 数(Ri 数)をリファレンスケ ースと同じとした条件(以下、High-ΔT-V)の温度成層化現象について評価した。

(1) 上部プレナム内温度、温度変動強度における鉛直方向分布の時間変化

上部プレナム内の温度分布の時間推移に対し、Ri数を一定とし炉心出口流速、温度差をパラ メータとしたケースについて、時間平均温度の鉛直方向分布を図 3.3.15-1~10 に示す。また、 温度変動強度の鉛直方向分布を図 3.3.16-1~図 3.3.16-10 に示す。

時間平均温度に関して、High-ΔT-V ケースは、リファレンスケースと比べ、温度成層界面位 置は低く、温度勾配は大きいことがわかる。この傾向は、計測位置の違いに依らずほぼ同一で あった。

温度変動強度については、UIS 切込み側(Position-U04、U03、D04)および H/L 側に近い位置(Position-U06、U08、W02)をみると、界面上昇に併せて時間とともに温度変動強度の大きい領域が上側に上昇している。High-ΔT-V ケースは、位置によって違いはあるが、リファレンスケースとほぼ同様な分布を示していることがわかる。

(2) 温度成層界面高さの時間推移

Ri 数を一定とし炉心出口流速、温度をパラメータとしたケースについて、温度成層界面高さの時間推移を図 3.3.17-1~2 に、成層界面の上昇速度の比較を図 3.3.18 に、成層界面厚さの時間 推移を図 3.3.19-1~2 に示す。上昇速度の規格化は 3.2 節と同じである。

温度成層界面高さについて、High-ΔT-V ケースは、初期形成位置がリファレンスケースと同 程度であることがわかる。上昇速度については、リファレンスケースと比べ、速い傾向を有す る。すなわち、成層界面の上昇速度は、流速に強く依存していると考える。また、上昇速度の UIS 内部での周方向依存性でみると、UIS スリット側(Position-U03)で上昇速度が小さくなっ ていることがわかる。

温度成層界面厚さにおいて、UIS 切込み側 (Position-U04、U03、D04)、H/L 配管に近い (Position-U06、U08、W02)をみると、High-ΔT-V ケースは、リファレンスケースと比べ、ほ ぼ同様か僅かに成層界面が薄くなっている。また、DHX 側の位置 (Position-U09、U10、U18、 D15) については、リファレンスケースと比べ、High-ΔT-V ケースは、僅かに薄い傾向を示し ている。 (3) 温度成層界面の温度勾配への影響

Ri 数を一定とし炉心出口流速、温度をパラメータとしたケースについて、各位置の温度成層 界面での温度勾配の時間推移の比較を図 3.3.20-1~2 に示す。

DHX 側(Position-D15、U09、U10)を見ると、High-ΔT-V ケースは、早期時間帯で温度勾配 は急峻になりその後時間経過とともにリファレンスケースとほぼ同程度の温度勾配を示して いる。その他の位置においては、リファレンスケースとほぼ同程度の温度勾配であることがわ かる。

(4) 温度成層界面における温度変動特性

Ri 数を一定とし炉心出口流速、温度をパラメータとしたケースについて、各位置の温度成層 界面での温度変動 PSD の比較を図 3.3.21-1~4 に示す。PSD は、規格化時刻 t*=300、600 での 各位置の成層界面高さに最も近い計測熱電対の前後 50 秒間のデータを用いて求めた。また、 PSD に用いた温度データは規格化している。

温度変動の PSD について、全ての位置を比べると、経過時刻に関わらず、High-ΔT-V ケース は、リファレンスケースとほぼ同様な傾向を示しているが、PSD は大きくなっていることがわ かる。

3.4 無次元数による温度成層化現象の評価

(1) 温度成層界面における高さ、および上昇速度の影響

図3.4.1~図3.4.2にUIS切込み側のUIS内部(Position-U03)とDHX側のUIS内部(Position-U09) の位置における各試験パラメータの影響に対して、温度成層界面の上昇速度、高さの関係の比 較を示す。また、温度成層界面高さは、無次元時刻 t*=200の値を用いた。上昇速度の規格化は 3.2節と同じである。

炉心出口流速をみると、右上がりの分布を示し、流速が大きくなるに従い上昇速度は大きく なり、成層界面位置は高くなる傾向を示している。また、上昇速度において、UIS 切込み側と 比べ、DHX 側のほうが僅かに大きくなっている。一方、成層界面高さに関しては、UIS 切込み 側のほうが高い位置で形成され、流速が大きくなるに従い UIS 切込み側と DHX 側の成層界面 高さの差が大きくなっていることがわかる。これは、成層界面高さを示している時刻が t*=200 とほぼ初期状態であり UIS 切込み側の影響によって高い位置で形成されていると考えられ、時 間が経過するとともに徐々に成層界面高さの差が小さくなると推測される。

炉心出口温度差に関しては、右下がりの分布を示し、温度差が大きくなると上昇速度は小さ くなり、成層界面位置は低くなる傾向である。UIS 切込み側と DHX 側を比べると、上で述べ たように、上昇速度は、DHX 側のほうが僅かに大きく、成層界面高さについては UIS 切込み 側のほうが高い位置で形成されている。

Ri 数一定としたケースの出口流速、出口温度差について、炉心出口流速、温度差が大きくな るに従い上昇速度は大きくなり、成層界面位置は低くなる傾向を示した。また、UIS 切込み側 と DHX 側を比べると、上昇速度、成層界面高さとも炉心出口流速、温度差の影響と同様な傾 向を示し、上昇速度は、DHX 側のほうが大きく、成層界面高さにおいては、UIS 切込み側のほ うが大きい傾向を示した。 (2) 温度成層界面現象における無次元数の検討

図 3.4.3~図 3.4.5 に切込み側の UIS 内部(Position-U03)の位置における各試験パラメータの 影響に対して、無次元数と温度成層界面の上昇速度、温度勾配、高さの関係について示す。温 度成層界面高さは、無次元時刻 t*=200の値を用いた。上昇速度の規格化は 3.2 節と同じである。 無次元数としては、これまでの研究で成層界面の上昇速度と関連が見られた Ri 数をとった。 さらに、熱伝導と対流熱輸送の比である Pe 数、これらの組み合わせとしての Ri×Pe=Gr/Re× Pr の 3 種類を取り上げた。

図 3.4.3 の温度成層界面の上昇速度、高さと Ri 数の関係をみると、右下がりの分布を示し、 Ri 数が大きくなると成層界面の上昇速度は小さく、成層界面形成位置は低くなる傾向を示して いることがわかり、Ri 数で整理できることが確認できた。一方、成層界面の温度勾配と Ri 数 の関係については、やや右下がりであるが部分的に分布のばらつきが発生し、明確な傾向は確 認できない。

図 3.4.4 の温度成層界面の上昇速度、高さと Pe 数の関係をみると、両パラメータとも Pe 数が 大きくなるとやや右上がりの傾向を示しているが分布にばらつきが生じていることがわかる。 温度成層界面の温度勾配と Pe 数の関係については、Pe 数が大きくなると温度勾配は大きくな る傾向であり、Pe 数で整理できることが確認できた。但し、試験では熱拡散率αはほぼ一定で あり、熱物性の効果まで含んでいるデータではない。

図 3.4.5 の温度成層界面の上昇速度、高さと Gr/RePr の関係をみると、Gr/RePr が大きくなる と温度成層界面の上昇速度、高さは小さくなる傾向を示し、浮力と熱拡散の比が大きくなると 成層界面の上昇速度は小さく、成層界面位置は低くなり、Gr/RePr で整理できる可能性が示さ れた。一方、温度成層界面の温度勾配と Gr/RePr の関係については、分布にばらつきが生じ整 理できないことが確認できる。但し、試験では熱拡散率αはほぼ一定であり、熱物性の効果ま で含んでいるデータではない。

3.5 壁面近傍流体と炉容器壁の熱伝達に関する評価

成層界面における壁面近傍(熱電対ツリー)および模擬炉容器壁(熱応答供試板)との熱伝達の影響について評価を行った。リファレンスケースは、2.3節で述べたように UIS 切込み側、 H/L 側、DHX 側を計測しているため、その3か所について評価した。その他の試験ケースについては UIS 切込み側のみの評価である。なお、リファレンスケースにおいては、壁面近傍流体 (R'=2.5mm)の計測と模擬炉容器壁の壁面近傍流体(R'=1.0mm)および構造材(R'=-0.25mm、 -1.0mm)は同時計測ではない。

(1) リファレンスケースにおける壁面近傍流体と炉容器壁との熱伝達評価

UIS 切込み側における壁面近傍流体と模擬炉容器壁(構造材)の成層界面での温度勾配の時間推移、その位置(Position-W01)での温度成層界面高さの時間変化、および最大温度勾配を示した時刻における壁面近傍流体/構造材の鉛直方向温度分布を図 3.5.1 に示す。なお、図(c)に示す UIS 切込み側の鉛直方向温度分布は、(3)で示した鉛直方向温度分布を拡大した図である。また、温度勾配については、瞬時の温度分布から求めた最大温度勾配 100 秒(5000 点)で移動 平均したものであり、温度成層界面高さは、10 秒間で時間平均した温度を用いて求めた。(1)

と(2)の横軸は、H/L 高さと炉心出口流速で無次元化した規格化時刻である。(3)の温度分布に関 しては、各時刻における前後 5 秒間、計 10 秒間(計 500 点)の平均であり、縦軸が鉛直方向 高さ、横軸が最大温度勾配の時刻に準じた時間平均温度である。図は、壁面近傍流体(R'=2.5mm、 1.0mm)、構造材(R'=-0.25mm、-1.0mm)を示した。

熱応答供試板の熱電対は、鉛直方向3ヶ所のみの設置であるためその板で計測した3点の温 度勾配が成層界面での温度勾配を示していることを確認する必要がある。そこで、最大温度勾 配に着目しデータの抽出を行った。(1)をみると、熱電対ツリーにより得られた最大温度勾配と 熱応答供試板の熱電対で計測した温度勾配が近い値をとる時刻(t*=800付近)で熱応答供試板 に成層界面が達していることが考えられる。(2)をみると、t*=800付近で成層界面位置が熱応答 供試板と同じ位置になっていることがわかる。また、この時(3)の鉛直方向温度分布をみると、 壁面近傍の温度分布と熱応答供試板の温度分布はほぼ同じ傾向を示していた。熱応答供試板の 3 点の温度勾配の最大値がその時刻の成層界面の温度勾配を示していることが確認できた。そ こで、成層界面の温度を計測していると考えられる時刻の温度分布を(4)に示す。それによると、 鉛直方向温度分布のUIS切込み側、H/L 側をみると、壁面近傍流体から構造材にかけて温度が 徐々に低下している。また、構造材内の温度勾配は、流体(R'=2.5mm)より小さくなっている ことがわかる。しかし、DHX 側に関しては、温度分布に違いが生じ、構造材内の温度が壁面 近傍流体のW03(R'=2.5mm)の温度より大きくなっていることがわかる。これは、模擬炉容 器壁の裏側の温度の影響を受けていると考えられる。

(2) 壁面近傍流体と炉容器壁の熱伝達に関するプラグ高さの評価

UIS 切込み側、H/L 側、DHX 側に対して、TE-N(R'=1.0mm)の位置で温度成層界面の最大 温度勾配を示した時刻における壁面近傍流体/構造材の鉛直方向温度分布の比較を図 3.5.2 に 示す。ここでは、構造材の R'=-0.25mm、-1.0mm の温度勾配がほぼ同等であるため、壁面近傍 流体(R'=1.0mm)と構造材(R'=-0.25mm)に着目し確認を行った。

UIS 切込み側の鉛直方向温度分布において、B/P#4 ケースは、リファレンスケースと比べ、 壁面近傍流体/構造材とも、僅かに温度は低く、温度勾配は大きくなっている。H/L 側、DHX 側に関して、鉛直方向温度分布は、B/P#4 ケースとリファレンスケースとも、UIS 切込み側と 同様な傾向を示し、温度勾配については、同等な温度勾配を示しほとんど違いがないことがわ かる。

次に、構造材内での温度勾配を確認するために、模擬炉容器壁近傍流体(R'=1.0mm)と構造 材(R'=-0.25mm)の最大温度勾配に対する比を求めた。結果を図 3.5.3 に示す。また、最大温 度勾配の比の定義については以下に示す。

最大温度勾配の比が1の場合は、温度勾配の減衰効果の差はなく、1より小さくなるに従い 減衰効果は大きくなる。

$$R = \frac{g_{structure}}{g_{fluid}}$$

(3.8)

温度勾配の比において、UIS 切込み側の B/P#4 ケースは、リファレンスケースと比べ、温度 勾配の比は小さくなり、B/P#4 ケースのほうが構造材内の減衰効果が大きいことがわかる。ま た、H/L 側、DHX 側においては、B/P#4 ケース、リファレンスケースとも、UIS 切込み側のよ うな顕著な差は見られずほぼ構造材内の温度勾配との減衰効果には差がない。

(3) 壁面近傍流体と炉容器壁との熱伝達に関するスクラム前後の出口流速の評価

UIS 切込み側の温度成層界面の最大温度勾配発生時における模擬炉容器壁近傍流体 (R'=1.0mm)と構造材(R'=-0.25mm)の出口流速に対する鉛直方向温度分布の比較、および その位置に対する最大温度勾配の比を図 3.5.4 に示す。また、炉心出口流速の小さい Low-V ケ ースについては、低流速条件であり上昇速度が遅いため計測時間(約 7200 秒)内に温度成層 界面が模擬炉容器壁(TE-N)の計測位置まで上昇していないためデータが収録されていない。

鉛直方向温度分布において、壁面近傍流体/構造材とも、High-V ケースのほうがリファレン スケースと比べ、温度が高くなっていることがわかる。温度勾配においては、壁面近傍流体で High-V ケースのほうがリファレンスケースと比べ僅かに大きく、構造材内では両ケースとも同 等であることがわかる。また、温度勾配の比をみると、High-V ケースはリファレンスケースと 比べ小さく、構造材内の温度勾配の減衰効果は大きくなっている。

(4) 壁面近傍流体と炉容器壁との熱伝達に関するスクラム前後の温度差の影響

UIS 切込み側の温度成層界面の最大温度勾配発生時における模擬炉容器壁近傍流体 (R'=1.0mm)と構造材 (R'=-0.25mm)の温度差に対する鉛直方向温度分布の比較、およびそ の位置に対する最大温度勾配の比を図 3.5.5 に示す。

鉛直方向温度分布に関して、壁面近傍流体/構造材のリファレンスケースと High- Δ T ケース は、ほぼ同等な温度を示し、Low- Δ T ケースは、鉛直方向位置 400mm、395mm で高くなってい ることがわかる。温度勾配については、壁面近傍流体/構造材とも、リファレンスケースと High- Δ T ケースはほぼ同等であり、Low- Δ T ケースは僅かに小さくなっている。また、温度勾 配の比に関しては、リファレンスケースと比べ、Low- Δ T ケースと High- Δ T ケースとも、僅か に違いは生じているがほぼ同様な傾向を示しており、構造材内の減衰効果に Δ T の影響は小さ いことがわかる。

(5) 壁面近傍流体と炉容器壁との熱伝達に関する同一Ri数条件での流速・温度差の評価

UIS 切込み側の温度成層界面の最大温度勾配発生時における模擬炉容器壁近傍流体 (R'=1.0mm)と構造材(R'=-0.25mm)のに対する Ri 数が同一で流速・温度差をパラメータと したケースでの鉛直方向温度分布の比較、およびその位置に対する最大温度勾配の比を図 3.5.6 に示す。

鉛直方向温度分布に関して、壁面近傍流体/構造材を比べると、明確に違いが生じ、リファ レンスケースと比べ、High-ΔT-V ケースは大きくなっている。温度勾配について、壁面近傍で は、リファレンスケースと比べ、High-ΔT-V ケースは僅かに大きく、構造材内においても同様 な傾向を示している。また、温度勾配の比をみると、リファレンスケースより、High-ΔT-V ケ ースは僅かに小さく、構造材内の減衰効果の影響は大きくなっていることがわかる。 (6) 壁面近傍流体と炉容器壁との温度勾配の比に関する評価

UIS 切込み側における各試験パラメータの影響に対して、温度成層界面の最大温度勾配発生時の模擬炉容器壁近傍流体(R'=1.0mm)と構造材(R'=-0.25mm)の最大温度勾配の比と Pe 数の関係を図 3.5.7 に示す。

最大温度勾配の比と Pe 数の関係をみると、右下がりの傾向を示し、Pe 数が大きくなると温 度勾配の比は小さくなることがわかる。このことから、Pe 数増加により、成層界面の温度勾配 は大きくなる(図 3.4.2 参照)が、構造材内では、Pe 数が大きく流体側の温度勾配の大きいほ うが、温度勾配の減衰効果は大きいことがわかった。

4. 結論

1/10 縮尺炉容器上部プレナム試験装置を用いて、FHM プラグをバッフルプレート1 段目の 高さに設置した体系をリファレンスケースとして、FHM プラグをバッフルプレート4 段目の 高さに設置した試験、原子炉スクラム後の炉出口流速および温度をパラメータとした試験、 Richardson 数を実機条件と同程度にした条件で試験を実施し、原子炉スクラム時における炉上 部プレナム内の温度成層化発生現象について評価を行った。結果を以下に示す。

[リファレンスケースの結果]

- ・UIS 切込み側では、UIS 内部で温度勾配が大きく、外側の炉容器壁近傍に向うに従い温度勾 配は緩やかになる傾向を示した。DHX 側においては、UIS 内部から炉容器壁近傍にかけて ほぼ同等な分布を示し、径方向位置に依存していないことを確認した。
- ・ UIS 切込み側の成層界面近傍における温度変動の PSD に関して、UIS 内部の PSD は大きく、 炉容器壁近傍に向うに従い徐々に PSD は減衰した。

[FHM プラグ高さの影響]

- FHM プラグを BP#4 の高さに設置すると、リファレンスケースより温度成層界面が僅かに高い位置で形成され、上昇速度も大きいことが確認できた。温度勾配に関して、UIS 切込み側では、FHM プラグを BP#4 の高さに設置することでやや大きくなった。DHX 側においては、リファレンスケースと同様な傾向を示した。
- PSD について、UIS 切込み側の径方向では、FHM プラグを BP#4 の高さに設置することでリ ファレンスケースよりも PSD は大きくなった。その他の位置についてはほぼ同様な PSD で あった。

[スクラム後の炉心出口流速の影響]

- ・ 炉心出口流速が大きい場合、リファレンスケースより成層界面位置は高く、上昇速度は大きくなった。一方、炉心出口流速が小さい場合は、成層界面が低い位置で形成され界面の上昇速度は小さいことが確認できた。温度勾配において、炉心出口流速が大きい場合は、炉容器壁近傍の比較的早い時間帯でリファレンスケースより大きく、その他では同等な温度勾配(規格化時刻~t*=300)を示した。炉心出口流速が小さい場合、温度勾配はリファレンスケースより小さくなった。
- PSD について、UIS 切込み側では、UIS 内部から炉容器壁近傍にかけて炉心出口流速が大き い場合は、リファレンスケースと PSD はほぼ同等であり、炉心出口流速が小さい場合はリ ファレンスケースの PSD より小さくなった。

[スクラム前後の炉心出口温度差の影響]

各位置とも、炉心出口温度差が小さい場合は、リファレンスケースより成層界面位置は高く、

上昇速度は大きくなった。炉心出口温度差が大きい場合は、成層界面位置は低く、上昇速度 は僅かに小さくなった。温度勾配に関しては、炉心出口温度差の大きい場合、リファレンス ケースより僅かに大きく、炉心出口温度差が小さい場合は、ピーク値においてはリファレン スケース同程度であるが経過時間ともに小さくなった。

・ PSD について、切込み側の UIS 内部では、リファレンスケース、温度差の大きい/小さい場合とも、低周波数成分で僅かに違いがあるが高周波数成分においてほぼ一致した。

[温度成層化現象に対する同 Richardson 数の炉心出口流速、温度の影響]

- ・成層界面高さについて、炉心出口流速/温度差の大きい場合は、リファレンスケースと同等 な成層界面高さであるが、上昇速度は大きくなった。温度勾配に関しては、リファレンスケ ースと炉心出口流速/温度差の大きい場合はほぼ同等であった。
- ・ 温度変動の PSD について、各位置とも、流速・温度差の大きい場合は、リファレンスケー スより PSD は大きくなった。

[無次元数による温度成層化現象の評価]

 Pe 数が大きくなると成層界面の温度勾配は大きくなる傾向を示し、温度勾配は Pe 数で整理できる可能性が示された。但し、熱拡散率をパラメータとした試験による確認が必要である。 また、Ri 数と Gr/RePr が大きくなると成層界面位置は低く、上昇速度は小さくなり、成層界面位置、上昇速度については、Ri 数で整理できることが確認できた。Gr/RePr の適用性に関しては、今後さらに検討を進める。

[壁面近傍流体と炉容器壁の熱伝達に関する評価]

- ・ UIS 切込み側において、FHM プラグを BP#4 の高さに設置した場合、リファレンスケースと 比べ、構造材内での温度勾配の減衰効果は大きくなった。また、H/L 側、DHX 側において は、プラグ高さの違いに依らず構造材内の温度勾配の減衰効果には差がないことが確認でき た。
- 構造材内の温度勾配について、UIS 切込み側では、リファレンスケースと比べ、炉心出口流 速が大きい場合、同 Ri 数の炉心出口流速/温度差が大きい場合は温度勾配の減衰効果は大 きく、炉心出口温度差を大小とした場合はほぼ同等であった。
- ・構造材内では、Pe 数が大きく流体側の温度勾配の大きいほうが、温度勾配の減衰効果は大きいことがわかった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、試験装置の運転、データ取得と整理において液体金属試験技術 課の関係者および(株)アセンドの試験・運転員の方々に多大な協力を頂きました。ここに深 く感謝いたします。

参考文献

- S. Kotake et al., Development of Advanced Loop-Type Fast Reactor in Japan (1): Current Status of JSFR Development, Proc. of the 2008 International Congress on the Advances in Nuclear Power Plants, Anaheim, CA, USA, June 8-12, ICAPP' 08-8226 (2008),
- [2] T. Ueta et al. The Development of Demonstration Fast Breeder Reactor (DFBR), Proc. of 4th International Conference on Nuclear Engineering Kyoto, Japan, April 23-27, Vol.2, p.771 (1995).
- [3] Y. Shimakawa, S. kasai, et al., An innovative concept of the sodium-cooled reactor to pursue high economic competitiveness, Nucl. Tech., Vol.10, p.1-17 (2002)
- [4] 村松壽晴、村上諭、他、ナトリウム冷却高速炉の原子炉容器内熱流動の研究(I) ~ 炉上 部プレナム内流動適正化に関する解析的検討~、JNC報告書、JNC TN9400 2001-117 (2002)
- [5] N. Kimura, K. Hayashi, et al., Experimental Study on Flow Optimization in Upper Plenum of Reactor Vessel for a Compact Sodium-Cooled Fast Reactor, Nucl. Tech., Vol.152, p.210-222 (2005)
- [6] 木村暢之、林謙二、飛田昭、上出英樹、三宅康洋、コンパクト化したナトリウム冷却炉の 温度成層化現象に関する研究-切込みつき UIS の影響と温度勾配緩和方策-、 JAEA-Research 2009-026(2009)

ケーフタ	流速 [m/s]		温度 [℃]			D: 粉	プラグ	借去
八名	初期	トリップ	初期	トリップ	温度差	KI 剱	高さ	佣石
実機	5.62	0.843	555	357	198	2.13	-	-
(Ref)	1.67	0.094	40	15	25	2.13	B/P-1	基本ケース
$(\mathbf{B}/\mathbf{P}/\mathbf{A})$	1.67	0.094	40	15	25	2.13	B/P-4	FHMプラグ
(B/T-4)	1.6/							位置:高
(High-V)	1.67	0.176	40	15	25	0.61		流速:高
(Low-V)	1.67	0.050	40	15	25	7.82		流速:低
(Low- ΔT)	1.67	0.094	25	15	10	0.61	B/P-1	温度差:低
(High- ΔT)	1.67	0.094	45	10	35	2.98		温度差:高
(High- Δ T-V)	1.67	0.122	45	10	35	2.13		流速:高 温度差:高





図 2.2.1 1/10 縮尺炉容器上部プレナム試験体の概略構造図



トリップ試験フロー 2.4.1



(a) 実機(2001年度設計での実機システム解析)



(b) 1/10炉上部水流動試験

図 2.4.2 原子炉スクラム時の炉心出口温度、流量の過渡変化


図 2.5.1 熱電対ツリーの概略構造図



図 2.5.2 熱応答板概略図



図 2.5.3 熱電対ツリー設置位置



図 3.1.1-1 計測位置による時間平均鉛直方向温度分布の比較(UIS 切込み側)



図 3.1.1-2 計測位置による時間平均鉛直方向温度分布の比較(DHX 側 135°)



図 3.1.1-3 計測位置による時間平均鉛直方向温度分布の比較(DHX 側 90°)



図 3.1.1-4 計測位置による時間平均鉛直方向温度分布の比較(UIS 内部)



図 3.1.1-5 計測位置による時間平均鉛直方向温度分布の比較(炉容器壁近傍)



図 3.1.2-1 計測位置による温度変動強度鉛直方向分布の比較(UIS 切込み側)



図 3.1.2-2 計測位置による温度変動強度鉛直方向分布の比較(DHX 側 135°)



図 3.1.2-3 計測位置による温度変動強度鉛直方向分布の比較(DHX 側 90°)



図 3.1.2-4 計測位置による温度変動強度鉛直方向分布の比較(UIS 内部)



図 3.1.2-5 計測位置による温度変動強度鉛直方向分布の比較(炉容器壁近傍)



図 3.1.3 温度成層界面高さおよび成層界面幅の導出



図 3.1.4-1 温度成層界面高さと厚さの時間推移の比較(径方向)



図 3.1.4-2 温度成層界面高さと厚さの時間推移の比較(周方向)



DHX側

UIS切込み側

図 3.1.5-1 温度成層界面の温度勾配(径方向)



最大温度勾配を示した鉛直方向位置

炉容器壁近傍

UIS内部側

図 3.1.5-2 温度成層界面の温度勾配(周方向)



図 3.1.6 規格化温度の時間推移の比較



図 3.1.7-1 成層界面の温度変動に関する PSD の比較(径方向)



図 3.1.7-2 成層界面の温度変動に関する PSD の比較(周方向)



図 3.2.1-1 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-2 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-3 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-4 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-5 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-6 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-7 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-8 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-9 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-10 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-11 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-12 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.1-13 時間平均温度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-1 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-2 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響


図 3.2.2-3 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-4 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-5 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-6 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-7 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-8 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-9 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-10 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-11 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-12 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.2-13 温度変動強度の鉛直方向分布に関するプラグ高さの影響



図 3.2.3-1 温度成層界面高さの時間推移に関するプラグ高さの影響



図 3.2.3-2 温度成層界面高さの時間推移に関するプラグ高さの影響



図 3.2.3-3 温度成層界面高さの時間推移に関するプラグ高さの影響



図 3.2.4 温度成層界面における上昇速度に関するプラグ高さの影響



図 3.2.5-1 温度成層界面厚さの時間推移に関するプラグ高さの影響



図 3.2.5-2 温度成層界面厚さの時間推移に関するプラグ高さの影響



図 3.2.5-3 温度成層界面厚さの時間推移に関するプラグ高さの影響



図 3.2.6-1 温度成層界面の温度勾配に関するプラグ高さの影響



図 3.2.6-2 温度成層界面の温度勾配に関するプラグ高さの影響



図 3.2.6-3 温度成層界面の温度勾配に関するプラグ高さの影響



図 3.2.7-1 温度成層界面での温度変動の PSD に関するプラグ高さの影響



図 3.2.7-2 温度成層界面での温度変動の PSD に関するプラグ高さの影響



図 3.2.7-3 温度成層界面での温度変動の PSD に関するプラグ高さの影響



図 3.2.7-4 温度成層界面での温度変動の PSD に関するプラグ高さの影響



図 3.2.7-5 温度成層界面での温度変動の PSD に関するプラグ高さの影響



図 3.3.1-1 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.1-2 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.1-3 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.1-4 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.1-5 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.1-6 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.1-7 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.1-8 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.1-9 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.1-10 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響


図 3.3.2-1 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.2-2 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.2-3 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.2-4 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.2-5 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.2-6 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.2-7 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.2-8 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.2-9 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.2-10 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.3-1 温度成層界面高さに関する炉心出口流速の影響



図 3.3.3-2 温度成層界面高さに関する炉心出口流速の影響



図 3.3.4 温度成層界面における上昇速度に対する炉心出口流速の影響



図 3.3.5-1 温度成層界面厚さに関する炉心出口流速の影響



図 3.3.5-2 温度成層界面厚さに関する炉心出口流速の影響



図 3.3.6-1 温度成層界面の温度勾配に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.6-2 温度成層界面の温度勾配に関する炉心出口流速の影響



図 3.3.7-1 温度成層界面での温度変動の PSD に関する炉心出口流速の影響(t*=300)



図 3.3.7-2 温度成層界面での温度変動の PSD に関する炉心出口流速の影響(t*=300)



図 3.3.8-1 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.8-2 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.8-3 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.8-4 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.8-5 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.8-6 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.8-7 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.8-8 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.8-9 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.8-10 時間平均温度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.9-1 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.9-2 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.9-3 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.9-4 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.9-5 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.9-6 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.9-7 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響


図 3.3.9-8 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.9-9 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.9-10 温度変動強度の鉛直方向分布に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.10-1 温度成層界面高さに関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.10-2 温度成層界面高さに関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.11 温度成層界面の上昇速度に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.12-1 温度成層界面厚さに関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.12-2 温度成層界面厚さに関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.13-1 温度成層界面の温度勾配に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.13-2 温度成層界面の温度勾配に関する炉心出口温度差の影響



図 3.3.14-1 温度成層界面での温度変動の PSD に関する出口温度差の影響(t*=200)



図 3.3.14-2 温度成層界面での温度変動の PSD に関する出口温度差の影響(t*=200)



図 3.3.15-1 時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.15-2 時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.15-3 時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.15-4 時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.15-5 時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.15-6 時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.15-7 時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.15-8 時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.15-9 時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.15-10 時間平均温度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.16-1 温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.16-2 温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.16-3 温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.16-4 温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.16-5 温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.16-6 温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.16-7 温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.16-8 温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.16-9 温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.16-10 温度変動強度の鉛直方向分布に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.17-1 温度成層界面高さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.17-2 温度成層界面高さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.18 温度成層界面の上昇速度に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.19-1 温度成層界面厚さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響


図 3.3.19-2 温度成層界面厚さに関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.20-1 温度成層界面の温度勾配に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.20-2 温度成層界面の温度勾配に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.21-1 温度成層界面での温度変動の PSD に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.21-2 温度成層界面での温度変動の PSD に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.21-3 温度成層界面での温度変動の PSD に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



図 3.3.21-4 温度成層界面での温度変動の PSD に関する同 Ri 数の流速・温度差の影響



⁽²⁾ 炉心出口温度差の影響

図 3.4.1 上昇速度、温度成層界面に関する炉心出口流速・温度差の影響





図 3.4.2 上昇速度、温度成層界面に関する同 Ri 数の炉心出口流速・温度差の影響



(b) 成層界面高さとRi数の関係

(c) 成層界面の勾配とRi数の関係

図 3.4.3 温度成層界面に関する Ri 数の関係



 Peclet Number
 Peclet Number

 (b) 成層界面高さとPe数の関係
 (c) 成層界面の勾配とPe数の関係

Height(mm)

図 3.4.4 温度成層界面に関する Pe 数の関係





図 3.4.5 温度成層界面に関する Gr/RePr 数の関係



(4) 温度勾配が最大値を示した時刻における炉容器近傍流体/構造材の鉛直方向温度分布

図 3.5.1 壁面近傍流体と構造材との熱伝達に関する影響

JAEA-Research 2010-065



図3.5.2 壁面近傍流体と構造材との熱伝達に関するプラグ高さの影響



図 3.5.3 壁面近傍流体と構造材の温度勾配の減衰効果



(1) 温度勾配が最大値を示した時刻における炉容器近傍流体/構造材内の鉛直方向温度分布



⁽²⁾ 壁面近傍流体と構造材内の温度勾配の減衰効果

図 3.5.4 壁面近傍流体と構造材との熱伝達に関する出口流速の影響



(1) 温度勾配が最大値を示した時刻における炉容器近傍流体/構造材内の鉛直方向温度分布



⁽²⁾ 壁面近傍流体と構造材内の温度勾配の減衰効果

図 3.5.5 壁面近傍流体と構造材との熱伝達に関する出口温度差の影響



(1) 温度勾配が最大値を示した時刻における炉容器近傍流体/構造材内の鉛直方向温度分布



⁽²⁾ 壁面近傍流体と構造材内の温度勾配の減衰効果

図 3.5.6 壁面近傍流体と構造材との熱伝達に関する同一 Ri 数条件下での 流速・温度差の影響





図 3.5.7 壁面近傍流体と構造材との温度勾配の比と Pe 数の関係

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
盔半里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本単位を用い	いて表されるSI組立里(豆の例				
知辛量	SI 基本単位					
和立里	名称	記号				
面 積平方	メートル	m^2				
体 積立法	メートル	m^3				
速 さ , 速 度 メー	トル毎秒	m/s				
加速度メー	トル毎秒毎秒	m/s^2				
波 数 每メ	ートル	m ⁻¹				
密度,質量密度キロ	グラム毎立方メートル	kg/m ³				
面積密度キロ	グラム毎平方メートル	kg/m ²				
比 体 積立方	メートル毎キログラム	m ³ /kg				
電流密度アン	ペア毎平方メートル	A/m^2				
磁界の強さアン	ペア毎メートル	A/m				
量濃度(a),濃度モル	毎立方メートル	mol/m ³				
質量濃度+口	グラム毎立法メートル	kg/m ³				
輝 度 カン	デラ毎平方メートル	cd/m ²				
屈 折 率 ^(b) (数	字の) 1	1				
<u>比透磁率(b)</u> (数	字の) 1	1				
(a) 量濃度 (amount concentrati	on)は臨床化学の分野では	物質濃度				
(substance concentration) とも上げれる						

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
亚	5.37 v (b)	red	1 (b)	m/m
	() / / / / / / (b)	(c)	1 1 (b)	2/ 2
		sr II-	1	m m -1
同 仮 多		пг		S .
カ	ニュートン	N		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Βα		s ⁻¹
吸収線量 比エネルギー分与				~
カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ²
線量当量,周辺線量当量,方向	2 ((g)	Su	Ulta	2 o ⁻²
性線量当量, 個人線量当量		50	o/kg	m s
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹ mol]
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周崩現象についてのみ、ペシレルは抜焼性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度度を表すために使用される。
 (d)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (d)かりたきさは同一である。しただかって、温度度差やす数値はとちらの単位でましても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト (PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 率	シファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ミヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酸素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ e ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号		
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d		
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с		
10^{18}	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m		
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ		
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n		
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р		
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f		
10^{3}	+ 1	k	10 ⁻¹⁸	アト	а		
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z		
10^{1}	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	v		

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	٥	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1t=10^{3}$ kg		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される剱値が美缺的に侍られるもの					
	名	称		記号	SI 単位で表される数値
電	子 >	ボル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダ	N	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

	名称		記号	SI 単位で表される数値
バ	-	N	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海		里	М	1 M=1852m
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
1	ッ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネ	-	パ	Np	の形法はいかおはない
ベ		N	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デ	ジベ	N	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値			
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{ m}^{\cdot 2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²			
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$			
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ^{·1}			
(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 △ 」					

は対応関係を示すものである。

		表	(10.	SIに 尾	禹さないその他の単位の例
	名称 訂			記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ	:	\sim	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	II.	N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートルネ	系カラ:	ット		1メートル系カラット=200 mg=2×10-4kg
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	П	IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています