JAEA-Research 2014-014



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 — 自然循環条件における成層界面挙動評価—

Experimental Study on Thermal Stratification Phenomena in Compact Reactor Vessel of Sodium Cooled Fast Reactor - Evaluation on Stratification Interface Behavior under Natural Circulation Condition -

> 萩原 裕之 木村 暢之 小野島 貴光 長澤 一嘉 上出 英樹 田中 正暁

Hiroyuki HAGIWARA, Nobuyuki KIMURA, Takamitsu ONOJIMA, Kazuyoshi NAGASAWA Hideki KAMIDE and Masaaki TANAKA

> 高速炉研究開発部門 大洗研究開発センター 高速炉技術開発部

Fast Reactor Technology Development Department Oarai Research and Development Center Sector of Fast Reactor Research and Development September 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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, 2014

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 -自然循環条件における成層界面挙動評価-

> 日本原子力研究開発機構 高速炉研究開発部門 大洗研究開発センター 高速炉技術開発部

萩原 裕之**1 木村 暢之*1 小野島 貴光 長澤 一嘉*1 上出 英樹*2 田中 正暁*3

(2014年6月11日受理)

日本原子力研究開発機構では、ナトリウム冷却高速炉の実用化に向けナトリウム冷却炉(JSFR) 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、炉上部機構(UIS)の簡素化等の検討を行っている。

JSFRの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た運転を行う。この冷却材流量変化と炉心出口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。成層界面で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、炉容器壁に熱荷重が発生する。そこで、炉上部プレナム内温度成層化現象により発生する温度勾配を精度良く予測し、炉容器壁の熱応力評価方法を整備する必要がある。また、温度勾配を低減させる対策を講じることにより構造健全性を担保する必要がある。これまでに、スクラム後の崩壊熱除去方法として、一次主循環ポンプ15%流量での強制循環の炉上部プレナム内温度成層化現象を評価し、成層界面での温度勾配により発生する炉容器壁の熱応力に対して構造健全性を担保できる見通しを得た。

今回、1/11 縮尺上部プレナム水流動試験装置により、強制循環から自然循環への系統運用の 変更を模擬した温度成層化試験を実施した。加えて、崩壊熱除去系として炉上部プレナムに挿 入した直接炉心冷却系熱交換器(DHX)の運転による温度成層化現象への影響を評価する試験 を実施した。

本試験により、自然循環に系統運用を変更することで、成層界面での温度勾配が 1/3 程度に 低下することを確認した。これにより、スクラム時の温度成層化現象に対する炉容器壁の構造 健全性の裕度が大幅に増加することを明らかにした。また、DHX を運転した場合、DHX 出口 の低温流体が炉上部プレナム底部に滞留することにより、炉容器壁に急峻な温度勾配が生じる ことを明らかにした。

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

+1 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(2013年1月迄在籍)

+2 次世代高速炉サイクル研究開発センター 設計・規格基準室

+3 次世代高速炉サイクル研究開発センター 高速炉計算工学技術開発部

※1 技術開発協力員

*1 株式会社 NESI

i

Experimental Study on Thermal Stratification Phenomena in Compact Reactor Vessel of Sodium Cooled Fast Reactor -Evaluation on Stratification Interface Behavior under Natural Circulation Condition-

Hiroyuki HAGIWARA^{**1}, Nobuyuki KIMURA⁺¹, Takamitsu ONOJIMA, Kazuyoshi NAGASAWA^{**1} Hideki KAMIDE⁺² and Masaaki TANAKA⁺³

> Fast Reactor Technology Development Department Oarai Research and Development Center Sector of Fast Reactor Research and Development Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

> > (Received June 11, 2014)

Thermal stratification in the upper plenum is one of the most important issues of a reactor vessel in sodium cooled fast reactor. The steep temperature gradient across the stratification interface may cause the thermal load against the reactor vessel wall. Therefore, it is necessary to evaluate the thermal stratification phenomena in order to secure the structural integrity against the thermal stress. Water experiments using a 1/11 scale model have been carried out for the Japan Sodium-cooled Fast Reactor (JSFR). In the previous study, it could be shown that the thermal stress due to the temperature gradient would not cause the damage to the reactor vessel under the forced circulation condition. However, the operation condition in recent design of the JSFR was changed from use of heat removal system with force circulation to that with natural circulation. In the natural circulation condition, operation of the direct heat exchanger (DHX) installed in the upper plenum was considered at sever conditions.

In the study, the water experiment was carried out using the 1/11 scale upper plenum model in order to evaluate the thermal stratification phenomena under the natural circulation condition. The effect of a DHX operation on the stratification phenomena was investigated. The temperature gradient under the natural circulation condition was approximately 1/3 times smaller than that under the forced circulation condition. It was found that the tolerance of structural integrity against the temperature gradient across the stratification interface increased drastically. In the DHX operation case, the steep temperature gradient occurred in the lower region of upper plenum due to the cold fluid from the outlet of DHX.

Keywords: Thermal Stratification Phenomena, Upper Plenum, Sodium-cooled Fast Reactor, Natural Circulation, DHX, Richardson Number

⁺¹ FBR Systems Technology Development Unit, Advanced Nuclear System Research and Development Directorat until January, 2013.

⁺² Fast Reactor Cycle System Design and Standard Development Office, Advanced Fast Reactor Cycle System Research and Development Center.

⁺³ Fast Reactor Computational Engineering Department, Advanced Fast Reactor Cycle System Research and Development Center.

[※]1 Collaborating Engineer

^{*1} NESI Incorporation

目次

1.	序論	·1
2.	試験	3
	2.1	ループ構成3
	2.2	試験装置3
	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および DHX 運転条件
	2.5	計測手法6
3.	試験	結果
	3.1	自然循環除熱条件下での温度成層界面挙動
	3.	1.1 強制循環試験との比較
	3.	1.2 DHX 運転試験の影響10
	3.2	温度成層化現象に対する支配因子の抽出
	3.2	2.1 炉心出口流速の影響
	3.2	2.2 スクラム前後の温度差の影響
	3.2	2.3 同 Richardson 数一致条件下での炉心出口流速、温度差の影響16
	3.3	無次元数による温度成層界面挙動の評価
	3.4	炉容器壁にかかる熱応力評価
4.	結論	20
謝辞		
参考	文献	
付録	:1	古橋らによる熱応力評価手法152
付録	:2	温度成層化現象に対する FHM プラグ設置位置の影響155

Contests

1.	Intro	duction
2.	Expe	eriment ······3
	2.1	Test Loop3
	2.2	Experimental Apparatus
	2.3	Experimental Condition and Parameters4
	2.4	Transient Condition of Scram and DHX Operating Conditions5
	2.5	Measurement Techniques ·······6
3.	Expe	erimental Results
	3.1	Thermal stratification Phenomena under Natural Circulation Conditions7
	3.	1.1 Comparison with Forced Circulations7
	3.	1.2 Effect of DHX Operating Conditions
	3.2	Dominant Factor of the Thermal Stratification 13
	3.	2.1 Effect of Core Outlet Velocity
	3.	2.2 Effect of Temperature Difference at Core Outlet
	3.	2.3 Effect of Velocity and Temperature Difference under Ri Similarity Conditions16
	3.3	Evaluation of Behavior of Stratification interface on Dimensionless Numbers17
	3.4	Thermal Stress Evaluation in Wall
4.	Cone	clusions20
Ack	nowle	edgment·····21
Refe	erence	
App	endix	Thermal Stress Evaluation Techniques Proposed by Furuhashi and Others
App	endix	2 Effect of FHM Plug Height on Thermal Stratification 155

図表リスト

表リスト

表 2.3.1	試験条件	·23
表 2.3.2	自然循環除熱試験 DHX 運転ありの試験条件	·24
表 2.5.1	自然循環除熱試験 DHX 運転ありの計測位置パラメータ	·24

図リス	\mathbb{P}
-----	--------------

図 2.1.1	1/11 縮尺上部プレナム試験装置のループ構成図
図 2.2.1	1/11 縮尺上部プレナム試験装置の概略構造図
図 2.2.2	模擬炉心直接炉内冷却器の概略構造図27
図 2.4.1	試験時の流動フロー
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 2.4.3	DHX 起動時の出口温度、流量の過渡変化
図 2.5.1	熱電対ツリーの概略構造図31
図 2.5.2	熱電対ツリー設置位置
図 3.1.1	時間平均温度の鉛直方向分布に関する自然循環と強制循環の比較
図 3.1.2	温度成層界面高さおよび成層界面幅の導出44
図 3.1.3	温度成層界面高さ関する自然循環と強制循環の比較45
図 3.1.4	温度成層界面の上昇速度に関する自然循環と強制循環の比較47
図 3.1.5	温度成層界面厚さ関する自然循環と強制循環の比較48
図 3.1.6	温度成層界面の時間変化に関する自然循環と強制循環の比較
図 3.1.7	温度成層界面での温度変動の PSD に関する自然循環と強制循環の比較
図 3.1.8	温度成層界面の温度勾配に関する自然循環と強制循環の比較
図 3.1.9	DHX 運転時における可視化結果58
図 3.1.10	時間平均温度の鉛直方向分布に関する DHX 運転の影響
図 3.1.11	温度成層界面高さに関する DHX 運転の影響
図 3.1.12	温度成層界面の上昇速度に関する DHX 運転の影響
図 3.1.13	温度成層界面の温度勾配に関する DHX 運転の影響
図 3.1.14	温度成層界面の時間推移に関するトリップ後のDHX 運転の影響
図 3.1.15	DHX 運転時における時間平均温度および温度変動強度の鉛直方向のコンター75
図 3.1.16	DHX 運転時における鉛直方向の時間平均温度の水平方向分布
図 3.1.17	DHX 運転時における鉛直方向の温度変動強度の水平方向分布
図 3.1.18	DHX 運転時における時間平均温度および温度変動強度の水平方向のコンター78
図 3.1.19	DHX 運転時における水平方向の時間平均温度の水平方向分布
図 3.1.20	DHX 運転時における水平方向の温度変動強度の水平方向分布80
図 3.1.21	DHX 運転時における炉容器壁近傍の時間平均温度および温度変動強度の鉛直方向の
	コンター81
図 3.1.22	DHX 運転時における炉容器壁近傍の時間平均温度の鉛直方向分布82
図 3.1.23	DHX 運転時における炉容器壁近傍の温度変動強度の鉛直方向分布83
図 3.1.24	DHX 運転時における炉容器壁近傍の温度勾配

図 3.2.1	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 3.2.2	温度成層界面高さに関する炉心出口流速の影響
図 3.2.3	温度成層界面の上昇速度に関する炉心出口流速の影響
図 3.2.4	温度成層界面厚さに関する炉心出口流速の影響
図 3.2.5	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 3.2.6	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102
図 3.2.7	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 3.2.8	温度成層界面高さに関する炉心出口温度差の影響
図 3.2.9	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119
図 3.2.10	温度成層界面厚さに関する炉心出口温度差の影響
図 3.2.11	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122
図 3.2.12	温度成層界面での温度変動の PSD に関する炉心出口温度差の影響
図 3.2.13	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129
図 3.2.14	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 3.2.15	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 3.2.16	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 3.2.17	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 144
図 3.3.1	温度成層界面の上昇速度、温度勾配に関する炉心出口流速・温度差の影響149
図 3.3.2	温度成層界面の上昇速度、温度勾配に関する無次元数の関係150
図 3.4.1	原子炉容器の熱応力推定値

1. 序論

日本原子力研究開発機構(以下、「原子力機構」という。)では、ナトリウム冷却高速炉(JSFR) の設計検討を行っている^[1]。JFSRでは、原子炉容器径を小さくするために原子炉容器上部の燃 料交換システムを簡素化し、制御棒駆動機構(CRDM)支持管や燃料集合体出口温度計測系、破 損燃料検出系、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の切り込みを有する構造を採用している。さらに、炉容器をコンパクト 化したことで炉容器のナトリウム容量が小さくなり、冷却材であるナトリウムの原子炉容器内 の通過流速は比較的速くなる。そこで、スクラム時に発生する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して、プレナム内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 CRDM 支持管から構成される コラム型の UIS を採用している^[2]。

原子力機構では、コンパクト化した原子炉容器の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^[3]を実施するとともに、原子炉容器上部 プレナムを実機の 1/11 縮尺でモデル化した炉上部プレナム水流動試験装置(1/11 縮尺上部プレ ナム水流動試験装置)を用いて、炉内流動の適正化を図るための試験を実施している。これま で定格運転状態を対象として、UISの構造(バッフル板の設置高さ、多孔率、構造物の付加など) をパラメータとし、流動を適正化することによって、液中渦キャビテーションの発生防止や液 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^[4]。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、冷却材の流量を低下 させる必要がある。その際、冷却材の温度差により、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。このとき、低温部と高 温部との間に明確な境界が出現し、その境界において、鉛直方向に急峻な温度勾配が現れ、時 間経過とともに温度成層界面が上昇することに加え、温度成層界面がゆらぐことによって構造 材に熱応力変動が発生し、条件によっては構造健全性が損なわれる可能性がある。これまでに 温度成層化現象評価に関する実験や解析^{[5]~[11]}が行われているが、JSFR のように切込みを有 するコラム型 UIS を採用したことにより、成層化現象特性が従来の研究から得られる知見と異 なる可能性がある。

そのため、原子力機構では、1/11 縮尺上部プレナム水流動試験装置を用いてスクラム時の温 度成層化現象を評価する試験を実施している。これまで、JSFR では、スクラム時の崩壊熱除去 方法として、主循環ポンプの回転数を最低レベル(定格 15%相当)まで下げた循環運転により 行うこととしてきた。そこで、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挙 動試験、および、UIS を多孔胴巻き構造にする等の構造をパラメータとしたときの影響確認試験 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温度成層化現 象の特性を把握してきた^[12]。また、UIS 内部の温度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温度成層界面挙動の支配因子を抽出する試験、および FHM 貫通孔プラグ高さをパラメータとした試験を実施し、原子炉スクラム時の温度成層化現象 発生時の上部プレナム内温度特性、および温度変化に対する構造材への熱伝達特性について評 価した^[13]。その結果、強制循環除去条件において、裕度は小さいものの温度成層化現象による 熱過渡に対する構造健全性を担保できる見通しを得た。

現在、JSFR では、さらなる裕度向上のためスクラム時における崩壊熱除去の系統運用を主循 環ポンプによる強制循環から自然循環に変更することを検討している。そこで、本報では、1/11 縮尺上部プレナム水流動試験装置を用いて、自然循環でのプレナム内温度成層化試験を行い、 JSFR 体系での原子炉スクラム時における温度成層化現象発生時のプレナム内温度特性を把握す るとともに、崩壊熱除去系として炉上部プレナム内に挿入している直接炉心冷却系熱交換器 (DHX)を運転した時の温度成層化に与える影響について評価した。

2. 試験

2.1 ループ構成

本試験に用いた 1/11 縮尺上部プレナム水流動試験装置の系統構成を図 2.1.1 に示す。本装置は、 1/11 縮尺原子炉容器上部プレナム試験体、循環ポンプ、冷水タンク、加熱器、冷却器(チラー) および DHX を模擬した冷却系から構成される。冷却器は、内部にポンプを内蔵している。ポン プは 30m³/h の定格流量を有し、インバータ制御で流量変化を与えることができる。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。

冷水タンクは切換え弁(三方弁)によって、単独での温度調整を可能とする。また、冷水タ 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する。 過渡試験は三方弁を操作し、冷水タンクの冷水を循環ポンプによりプレナム内に流入させて実 施する。冷水タンクは、スクラム開始前に準備した低温水とスクラム後にループにより注入す る高温水ができるだけ混合しない構造とし、長時間にわたって低温水を供給することができる。 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。
 循環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、冷水タンク前後に設置した三方弁を切り替え、高温水を冷水タンクに流入させ るとともに、低温水を試験体に流入させる。
- ⑤ DHX を作動させる場合、スクラム後の設定の時刻に DHX 系のポンプとチラーを起動することによって DHX での冷却を模擬する。

2.2 試験装置

図 2.2.1 に 1/11 縮尺上部プレナム水流動試験装置の概略構造図、図 2.2.2 に DHX 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 1200mm で、炉容器外周をウ オータジャケットで覆うことによって、可視化、PIV(粒子画像流速計測法)等を行う際に炉容 器での屈折の影響を低減している。1/11 縮尺上部プレナム水流動試験装置内に設置されている JSFR の主要機器は、CRDM 支持管、多孔板を含む 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)、DHX、燃料出入案内管(F/T)、燃料交換機貫通孔プラ グ(FHM プラグ)、破損燃料位置検出器(FFDL)案内管である。また、FHM プラグの設置位置 は、プラグ下端が UIS 最下端にある炉心計装取付板(CIP)とその上のバッフル板の間に設置す る場合を B/P#0.5、バッフル板4段目に設置する場合を B/P#4 と定義した。

2.3 試験条件およびパラメータ

表 2.3.1~表 2.3.2 に試験条件の一覧を示す。ここで示した実機条件は自然循環除熱時(DHX 運転あり)を対象とし、動特性解析の結果で得られた定格の3%流量相当を想定している。試験 では、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) を実機と同じにした条件で、流量およびスクラム前後の炉心出口の温度差をパラメータとした。 JSFR では、トリップ時に炉上部プレナム中に設置した DHX が崩壊熱除去系として機能するこ とが検討されており、DHX の運転によって上部プレナム内の温度成層化挙動が変化することが 予測されることから、DHX を運転した条件を模擬した試験(自然循環除熱試験)を実施した。 さらに、自然循環除熱時に DHX 運転を行わない条件での試験(自然循環除熱試験 DHX 運転な し)と、DHX を運転せず強制循環により除熱する条件での試験(強制循環除熱試験)も合わせ て実施し、自然循環除熱試験(DHX 運転)と比較した。自然循環除熱試験 DHX 運転なし条件 は、スクラム前後の温度差を25℃とし、Ri 数を実機と一致する流量条件とした。強制循環除熱 試験条件では、流量を定格の 15%とした場合である。また、パラメータとしては、自然循環除 熱試験 DHX 運転なし条件をリファレンスケースとした。スクラム後の流量については、自然循 環除熱試験 DHX 運転なし条件の約 2.2 倍 (High-V)、1.5 倍 (Middle-V)、0.75 倍 (Low-V)とし、 スクラム前後の温度差についてはリファレンスケースの 25℃から 35℃ (High-ΔT)、10℃ (Low-ΔT) に変更した高温度差条件および低温度差条件、Ri 数が実機 Ri 数と同じとなるようにスクラム後 の流量を自然循環除熱試験 DHX 運転なし条件の約 2.2 倍、スクラム前後の温度差を自然循環除 熱試験 DHX 運転なし条件の 25℃から 30℃に変更した高流速・高温度差条件(High-ΔT-V)、ス クラム後の流量を自然循環除熱試験 DHX 運転なし条件の約 0.7 倍、スクラム前後の温度差を自 然循環除熱試験 DHX 運転なし条件の 25℃から 10℃に変更した低流速・低温度差条件(Low-ΔT-V) を設定した。無次元数の定義について以下に示す。

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

$$Re = \frac{VL}{V}$$
(2.1)

g	: 重力加速度	(9.8m/s^2)
β	: 体積膨張率	(1/°C)
ΔT	: 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 H/L 入口高さ)	(m)
V	:代表流速(燃料集合体部炉心出口)	(m/s)
Ν	: 動粘性係数	(m ² /s)

また、強制循環条件を対象とした前回の試験^{[12][13]}では、FHM プラグの設置位置が低い条件 で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、構造物形状をパラメータとし た試験として、FHM プラグの下端高さをバッフルプレート 0.5 段目としたケース(B/P#0.5)を デフォルトとし、4 段目にしたケース(B/P#4)も併せて行った。その結果は付録に示す。

2.4 炉心スクラム時の過渡条件および DHX 運転条件

図 2.4.1 に試験時(自然循環除熱試験(DHX 運転))の流動フローを示す。また、図 2.4.2~図 2.4.3 に実機(2007 年度時点設計)と今回の温度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、流量の過渡変化および DHX 運転時における DHX 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 の流量を目標温度 40℃に一定時間保持する。一方、冷水タンクは チラー冷却により、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水タンク側 のラインに切り替える。それにより、流量は 22m³/h に低下する。試験開始後 140 秒後から実機 トリップ後目標流量相当の 2.66m³/h に 60 秒で低下させる。炉心領域流路(配管)、ブランケッ ト領域流路(配管)の流体温度は試験開始後から徐々に低下する。試験は、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の容量によって、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評価の対象とする。 その後は冷水タンクの低温水がなくなるまで一定条件で保持する。

DHX 運転は、フローコーストダウン開始から 505 秒(実機相当時間)に DHX が所定温度に 到達するように予備試験を行い、起動条件を設定した。それにより、ライン切り替えはフロー コーストダウン開始より 365 秒、ポンプ起動は、フローコーストダウン開始より 360 秒として 運転した。DHX 運転フローを以下に示す。

0sec	360sec	365sec	505sec	
フローコースト	DHX ポンプ	DHX 系	DHX 所定温度	
ダウン開始	起動	HX ライン切替	到達予想時刻	

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 H/L 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、小径管で製作しバッフル板(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、20mm および 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位置に合わせた詳細な温度 分布計測が可能である。また、DHX 近傍を測定する2ヶ所(水平方向移動、上下方向移動)の 熱電対ツリーは、水平方向に 20mm ピッチ間隔で熱電対を配置してある。 図 2.5.2-1〜2 に熱電対 ツリーを用いた温度計測位置を示す。熱電対は全てシース径 0.5mm の非接地 K 型あるいは T 型 熱電対を使用し、熱電対は、試験装置に取り付ける前に恒温槽を用いた絶対校正、あるいは絶 対校正で求められた基準熱電対をもとにした相対校正により精度を担保した。試験体に設置し た熱電対は、相対校正により精度を担保した。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誤差は、±0.09℃以内であった。計測は 50Hz サンプリン グ(0.02 秒間隔)で約 3600sec 収録した。

自然循環除熱試験(DHX 運転)における計測位置を表 2.5.1 に示す。炉壁近傍に設置した軸方 向熱電対ツリーに関しては、炉壁近傍の温度分布を把握するために位置を変えて(0°H/L と炉 壁の間、68.5°、90°、90°とDHXの間、DHX と炉壁の間、DHX と C/L の間)、温度計測を同条 件で6回行った。また、90°位置に2ヶ所設置してある水平方向熱電対ツリーにおいて、TE-DS2 の熱電対はケース毎に-20°~30°の間で 10°間隔で水平方向に角度を変えて計測を行い、TE-DS1 の熱電対は、5mm~45mmの間で鉛直方向に 10mm 間隔で位置を変えて計測を行った。

3. 試験結果

3.1 自然循環除熱条件下での温度成層界面挙動

本文において、強制循環除熱試験 DHX 運転なし条件、自然循環除熱試験 DHX 運転なし条件 及び自然循環除熱試験 DHX 運転あり条件をそれぞれ強制循環試験、自然循環試験及び DHX 運 転試験と称することとした。

3.1.1 強制循環試験との比較

DHX を運転しない強制循環試験と自然循環試験でのトリップ後の温度成層界面挙動に対する 影響について評価を行った。

(1) 上部プレナム内温度の鉛直方向分布

上部プレナム内の温度分布の時間変化に対し、リファレンスケースと強制循環ケースについて、各位置における時間平均温度の比較を図 3.1.1-1~10 に示す。

温度は、各時刻における前後 5 秒間(全 10 秒間、500 点)の平均であり、実機換算温度に変換した。以下に式を示す。

$$T_{r} = (T_{ex} - Tc_{ex}) \left(\frac{\Delta T_{r}}{\Delta T_{ex}}\right) + Tc_{r}$$
(3.1)

 T_{ex} :試験における計測温度 (\mathbb{C})

Tc_{ex}:試験におけるスクラム後の炉心出口温度(℃)

*Tc*_r :実機におけるスクラム後の炉心出口温度(℃)

△*T*_{er} : 試験におけるスクラム後の炉心出口温度差(℃)

ΔT_r:実機におけるスクラム後の炉心出口温度差(°C)

スクラム後の経過時間については、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。時間は実機換算時間を用いた。以 下に式を示す。

$$T_r = \frac{L_r / V_r}{L_{ex} / V_{ex}} T_{ex}$$
(3.2)

また、計測位置は炉心頂部からの高さをもとに、実機相当に変換した。以下に式を示す。

$$H_r = H_{ex} \left(\frac{L_r}{L_{ex}} \right)$$
(3.3)

*V*_r : 実機におけるスクラム後の炉心出口流速(m/s)

Lr : 実機での代表長さ(炉心頂部から H/L 入口までの高さ 2.9m)

V_{ex} : 試験におけるスクラム後の炉心出口流速 (m/s)

Lex : 試験での代表長さ(炉心頂部から H/L 入口までの高さ 0.26m)

各位置の鉛直方向温度分布を見ると、強制循環試験は、自然循環試験と比べ、成層界面形成 位置は高く、温度勾配は大きくなっている。また、時間推移を見ると、強制循環試験では温度 成層界面が徐々に上昇しているのに対し、自然循環試験では、成層界面位置はほとんど変化し ていないことがわかる。

(2) 温度成層界面高さの時間推移

図 3.1.2 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 の鉛直方向に対して図に示したように無次元温度 $T^*=0.5$ をまたぐ 2 点間を直線近似し、 $T^*=0.5$ 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 を示す鉛直方向位置幅を成層界面厚さと定義した。この定義に従い、成層界面の高さと厚さを 10 秒毎に求めた。無次元温度は以下の式により求めた。

$$T^* = \frac{T - Tc_{ex}}{\Delta T_{ex}}$$
(3.4)

自然循環試験と強制循環試験における温度成層界面高さの時間変化を図 3.1.3-1~2 に、成層界 面高さと経過時間により求めた上昇速度を図 3.1.4 に、温度成層界面厚さの時間変化を図 3.1.5-1 ~2 に示す。上昇速度は、界面速度が安定する 1,000 秒以降において、最も界面が低くなる時刻 を同定し、その時刻以降で界面位置が連続的に得られている時刻(界面位置が同定できなくな るまでの時刻)までを対象として線形近似で速度を算出し、実機の炉心出口流速で規格化した。 以下に式を示す。

$$V^{*} = \frac{V_{s}}{V_{ex}}$$

$$V_{s} : \text{R} \text{ mL} \text{ pige (m/s)}$$
(3.5)

また、自然循環試験の Position-U11、U12、U13、U14、DE4、DE5 の温度成層界面厚さは、約 2,500 秒以降の表示となっている。これは、2,500 秒までは時間平均温度が $T^* < 0.2$ に達していな いためである。

温度成層界面高さにおいて、強制循環試験は、自然循環試験と比べると、成層界面が形成さ れる位置は高く、上昇速度は大きくなっていることがわかる。両ケースとも経過時間に従い、 徐々に成層界面厚さは大きくなる傾向を示しているが、強制循環試験の方が自然循環試験と比 べ成層界面厚さが小さくなっている。

(3) 温度成層界面における温度変動特性

成層界面での温度変動に対し、自然循環試験と強制循環試験について UIS 切込み側の UIS 内部と炉容器壁近傍における温度の時間変化の比較を図 3.1.6 に示す。計測位置は、自然循環試験で 3.22m (試験体 289mm)、強制循環試験で 4m (試験体 359mm)の高さとした。この高さは、 実機換算時間約 t_r=2,000sec のとき温度成層界面が通過する位置である。

強制循環試験の場合、UIS 内部と炉容器近傍をみると、UIS 内部の方が大きく変動している。 一方、炉容器近傍はあまり変動がないことがわかる。自然循環試験は、両側とも大きな温度変 動がないことがわかる。

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、無次元温度のパワース ペクトル密度(以下、PSD)の評価を行った。PSDは、*t_r*=1,000sec、*t_r*=2,000secでの各位置の温 度成層界面高さに最も近い計測点の温度データを前後 50 秒(計 100sec、5,000点)抽出して、 高速フーリエ変換(FFT)処理を施して求めた。スペクトルは、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約 20 秒間(1024 データ)に乗じて求めた FFT 結果を平均化する ことによって平滑化し、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 3.1.7-1~5 に成層界面に対する温度変動の PSD の比較を示 す。また、強制循環ケースの Position-K の位置は、成層界面の位置が計測範囲から外れているた め図には示していない。強制循環試験の *t_r* =1,000sec、自然循環試験の *t_r* =2,000sec における Position-DE2 の位置は、成層界面が形成されている最も近い熱電対が欠落しているため図には示 していない。PSD の 10⁻⁸以下はノイズである。

各位置の PSD をみると、経過時間に関わらず強制循環試験の方が自然循環試験と比べて全ての周波数において PSD は大きくなっていることがわかる。

(4) 温度成層界面での温度勾配

温度成層界面の温度勾配の定義について以下に示す。

成層界面の温度勾配は、隣り合う計測点の規格化温度差を計測位置間の高さで除した値の最 大値と定義した。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。

$$g_{i} = \frac{T_{i+l}^{*} - T_{i}^{*}}{H_{i+l} - H_{i}}$$
(3.6)

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

(3.7)

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大きい場合、すなわち、界面の揺動が激しい場合、5mm ピッチの熱 電対で正確な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デー タについて時間軸上で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 が離散的である影響を低減し、温度勾配の時間推移を評価することとする。既報^[12]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ている。

自然循環試験と強制循環試験における温度成層界面での温度勾配の時間推移の比較を図 3.1.8-1~2 に示す。温度勾配は、瞬時の温度勾配を各時刻の前後 5 秒、計 10 秒(501 点)で移動 平均したものである。

強制循環試験は、自然循環試験と比べ、全ての位置において、温度勾配が大きく、特に UIS 切込み側近傍においては、約3倍程度温度勾配が大きくなっている。この現象より、スクラム 後の運転モードを自然循環に系統運用を変更することで、成層界面の温度勾配を低減できるこ とが確認できた。

3.1.2 DHX 運転試験の影響

DHX を運転した場合の成層界面挙動について評価を行うため、DHX を運転しない自然循環試験とDHX を運転した DHX 運転試験を比較した。

図 3.1.9 に DHX 運転時の DHX 近傍の可視化結果を示す。DHX からの低温流体は緑色に着色 している。これをみると、DHX 出口からの低温流体がプレナム底部に対流して温度成層界面が 形成されていることが観察された。

次に DHX 運転試験での上部プレナムの温度分布を計測した。温度は、各時刻における前後 5 秒間(全 10 秒間、501 点)の平均であり、温度は実機換算温度で示した。時間は実機換算時間 であり、高さは実機相当として示した。

(1) 上部プレナム内温度の鉛直方向分布

上部プレナム内の温度分布の時間推移に対し、DHX 運転試験と自然循環試験について、各位 置での時間平均温度の鉛直方向分布の比較を図 3.1.10-1~10 に示す。

時間平均温度分布について、DHX 運転試験と自然循環試験を比べると、t_r=200sec、500sec では、DHX が運転前、あるいは運転開始直後であるためほぼ同程度の分布を示している。t_r=1000sec では、自然循環試験は、成層界面はほぼ同じ位置にとどまっているのに対し、DHX 運転試験は DHX から低温流体がプレナム底部に供給されることにより成層界面が上昇しており、位置は経

過時間とともに高くなっていることがわかる。

(2) 温度成層界面高さの時間推移

DHX 運転試験と自然循環試験について、各位置の温度成層界面高さの時間変化の比較を図 3.1.11-1~2 に、成層界面の上昇速度の比較を図 3.1.12 に示す。上昇速度の算出は 3.1.1 項と同じ である。また、DHX 運転試験は、上昇速度が大きいため熱電対ツリーの計測範囲から外れてい る。そのため、計測範囲、3.05m~4.11m(試験体 232mm~369mm)の熱電対に対しては、時間軸 $t_r = 0$ ~4000sec として比較を行った。

温度成層界面高さに関して、DHX 運転試験と自然循環試験を比べると、各位置とも DHX が 運転されていない約 *t*_r=500sec まではほぼ同程度の温度成層界面高さを示し、その後、DHX 運転 試験は、DHX からの低温流体の供給の影響で成層界面位置は急激に上昇を開始する。上昇速度 においては、自然循環試験と比べ、DHX 運転試験の方が大きいことがわかる。また、DHX 運転 試験では、約 *t*_r =2,000sec で成層界面の上昇速度が変化している。この時刻は、成層界面高さが DHX 入口高さ約 5m と同程度の高さとなる時刻に相当している。約 *t*_r =2000sec 以降では、DHX は成層界面より下の低温流体を吸い込むことにより、界面より上の高温流体を DHX が冷却しな くなるため界面上昇速度が低下すると考えられる。

(3) 温度成層界面での温度勾配

DHX 運転試験と自然循環試験について、各位置の温度成層界面での温度勾配の時間推移を図 3.1.13-1~2 に示す。経過時間に対しては上記(2)と同じである。また、温度勾配の算出は 3.1.1 項 と同じである。

DHX 運転試験と自然循環試験を比べると、時間軸 t_r =0~800sec では、ほぼ同程度の温度勾配 を示している。Position-UE1、UE2、DE2 では、t_r =約 2,000sec 以降になると、DHX 運転試験は、 自然循環試験と比べ、温度勾配は大きくなる傾向を示している。これは、成層界面が DHX の入 口高さと同程度になり DHX の吸い込まれる流れが界面より上の高温流体から界面より下の低温 流体となることで、DHX が成層界面より下の低温流体を冷却し、高温流体と低温流体の温度差 を大きくしたためであると考えられる。

(4) 温度成層界面における温度変動特性

炉上部プレナム内の温度変動に対し、DHX 運転試験と自然循環試験について UIS 内部と炉容 器壁近傍における時間変化の比較を図 3.1.14 に示す。

計測位置は、自然循環試験では、3.79m(試験体 340mm)、DHX 運転試験では、5.09m(試験 体 457mm)の高さとした。この高さは、実機換算時間 *t_r=約* 2,000sec のときの温度成層界面高さ に対応する。UIS 内部と炉容器壁近傍を比べると、両試験とも炉容器壁近傍の方が僅かに温度変 動は大きくなっている。また、自然循環試験と DHX 運転試験を比べると、UIS 内部では、自然

循環試験の方が僅かに温度変動は大きく、炉容器壁においては、両ケースとも同等な温度変化 を示していることがわかる。

(5) DHX 出口付近での温度および温度変動強度

図 3.1.15 に DHX 運転時における DHX 出口付近での鉛直方向の時間平均温度および温度変動 強度のコンターを示す。

時間平均温度は、経過時間とともに低くなる傾向を示し、特に *t*,=2,000sec 以降になると、炉 心頂部に近い高さ(鉛直方向 0.06m~0.167m の間)の DHX に近い側(炉壁方向 0m に近い方向) で時間平均温度は低くなっている。これは、DHX 出口からの低温流体が炉壁側に沿って流れて いるためと考えられる。温度変動強度は、時間平均温度が小さくなっている炉壁方向 0m 領域付 近で大きくなっていることがわかる。

図 3.1.16~図 3.1.17 に DHX 運転時における DHX 出口付近での鉛直方向位置の時間平均温度お よび温度変動強度の水平方向分布を示す。時間平均温度の分布を見ると、経過時間とともに時 間平均温度は小さくなり、ほぼフラットな分布を示していることがわかる。しかし、炉心頂部 高さより 0.06m 上の位置においては、炉壁側(水平方向位置 0m 付近)では、時間平均温度は低 くなり DHX からの低温流体の影響を受けていることが確認できる。温度変動強度に関して、炉 心頂部高さより 0.167m より上の位置では、同等な分布を示しているが、炉心頂部高さより 0.06m 上の位置では、時間平均温度が低い領域で温度変動強度は大きくなっていることがわかる。

図 3.1.18 に DHX 運転時における DHX 出口付近での水平方向の時間平均温度および温度変動 強度のコンターを示す。水平方向の時間平均温度は、経過時間とともに低くなっており、特に DHX 直下で低く、低温流体は炉壁側に向かって流れており、炉心側にはほとんど流れていない ことがわかる。温度変動強度は、DHX から低温流体とプレナム内の流体が接する付近で大きく なっていることがわかる。

図 3.1.19~図 3.1.20 に DHX 運転時における DHX 出口付近での水平方向位置の時間平均温度お よび温度変動強度の水平方向分布を示す。水平方向の時間平均温度に関して、DHX から離れた 位置(10度~30度)ではほぼフラットな分布であり経過時間とともに徐々に低くなる傾向を示 し、急激に温度が低下している領域はみられない。DHX 直下の-20度では、DHX 内部にあたる 約 0.8m~2.2m の間で大きく変化し、時間平均温度は低くなっていることがわかる。また、0度

(DHX 接線方向)の位置においては、650sec 以降になると、炉壁側で時間平均温度は低くなり、 DHX からの低温流体は炉壁側に沿って流れていることわかる。水平方向の温度変動強度につい て、DHX から離れた位置(10度~30度)では温度変動強度は小さい。-20度(DHX 直下)から 0度(DHX 接線方向)の位置では、t_r=650sec 以降において温度変動強度が大きい領域が発生し た。-20度(DHX 直下)の位置では、水平方向位置約 0.7m~2.1m で温度変動強度は大きくなっ ており、DHX の下で混合が発生していることがわかる。0 度の位置においては、水平方向位置 約 1.2m 付近で温度変動強度は大きくなっており、DHX の近い領域で混合が発生していることが わかる。 図 3.1.21 に DHX 運転時における炉容器壁近傍での鉛直方向位置の時間平均温度および温度変 動強度のコンターを示す。時間平均温度を見ると、炉心頂部より 0.167m 付近の領域では温度は 低くなっており、DHX に近い位置で最も低くなっていることがわかる。温度変動強度は、時間 平均温度が低い領域と高い領域の境界で大きくなっていることがわかる。

図3.1.22~図3.1.23にDHX運転時における炉容器壁近傍での鉛直方向位置の時間平均温度および温度変動強度の分布を示す。時間平均温度を見ると、鉛直方向炉心頂部高さ約0.3m以下の範囲で経過時間とともに時間平均温度は低くなる傾向を示している。特にDHX近傍(90度とDHXの間、DHXと炉壁の間、DHXとC/Lの間)では、DHXから離れた位置111.5度と比べ、DHX出口からの低温流体の層が厚くなっている。温度変動強度に関しては、温度の異なる流体が接する領域で温度変動強度は大きくなっていることがわかる。

(6) DHX 運転時における炉容器壁近傍の温度勾配

DHX 運転試験について、各位置の炉容器壁近傍での温度勾配の時間推移を図 3.1.24 に示す。 勾配の算出は 3.1.1 項と同じである。炉容器壁近傍の温度勾配を見ると、*t_r=約* 500sec 以降になる と全ての位置において DHX 出口からの低温流体の流れの影響で温度勾配は大きくなっている。 各位置の温度勾配を比べると、DHX 近傍での温度勾配は大きく、DHX の左側(90°、111.5° の位置)では、温度勾配は小さくなっていることがわかる。

3.2 温度成層化現象に対する支配因子の抽出

3.2.1 炉心出口流速の影響

DHX を運転しない自然循環試験における原子炉スクラム後の炉心出口流速を自然循環試験の約2倍(以下、High-V)、1.5倍(以下、Middle-V)、0.75倍(以下、Low-V)とした高流速条件、中流速条件、低流速条件とした場合の温度成層化現象について評価を行った。なお、自然循環試験は、スクラム開始前の循環流量が若干異なるため今回の比較からは除外した。このときの温度差は25℃で一定とし、温度は実機換算温度で示した。時間は実機換算時間であり、高さは実機相当として示した。

(1) 上部プレナム内温度の鉛直方向分布

炉心出口流速をパラメータとした試験について、各位置での時間平均温度の鉛直方向分布の 比較を図 3.2.1-1~10 に示す。*t*,=200sec では、安定的に成層界面が形成されていないため、各位 置の時間平均温度に差が生じているが、それ以降の時間を見ると UIS 切込み側(Potision-U11、 U12、DE4)では、成層界面位置に違いがあるとともに、炉心出口流速が大きいほど温度勾配は 大きくなっていた。UIS 切込み側以外の位置においては、ほぼ同等な位置で温度成層界面は形成 されているとともに、炉心出口流速が大きくなるにつれて温度勾配が大きくなった。

(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試験について、各位置の温度成層界面高さの時間推移の比較 較を図 3.2.2-1~2 に、成層界面の上昇速度の比較を図 3.2.3 に、成層界面厚さの時間推移の比較 を図 3.2.4-1~2 に示す。上昇速度の算出は 3.1.1 項と同じである。温度成層界面高さをケース間 で比べると、各位置とも初期の成層界面高さはほぼ同じ高さである。しかし、High-V ケースに おいては、経過時間とともに徐々に成層界面は上昇しているが、Middle-V ケースと Low-V ケー スの成層界面はほぼ同じ高さに留っている。また、上昇速度に関しては、炉心出口流速が大き くなると上昇速度は大きくなっている。各位置の成層界面厚さについては、プレナム内の計測 位置に関わらず Low-V は大きく、次に Middle-V ケース、High-V ケースと続いており、炉心出 口流速が大きくなると成層界面の厚さは小さくなる傾向を示した。

(3) 温度成層界面での温度勾配

炉心出口流速をパラメータとした試験について、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 3.2.5-1~2 に示す。温度勾配の算出は 3.1.1 項と同じである。

各位置の温度勾配を見ると、Low-V ケース、Middle-V ケース、High-V ケースの順に温度勾配 は大きくなっており、出口流速が大きくなると温度勾配は大きくなる傾向であることがわかる。 また、UIS 切込み側 (Position-U11、U12、DE4)を見ると、他の計測位置と比べ、特に High-V の温度勾配は大きく、UIS 切込み側から炉壁に向かうにつれて小さくなる傾向を示している。流 速が大きい条件は、UIS 切込み側から炉壁に向かう流れが大きいため、その影響で温度勾配が大 きくなると考えられる。

(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試験について、各位置での温度成層界面の温度変動の PSD に対する Strouhal 数(St 数)の比較を図 3.2.6-1~5 に示す。PSD は、*t_r*=1,000sec、*t_r*=2,000sec での各位置の温度成層界面高さに最も近い計測点の温度データ前後 50 秒間のデータを用いて求めた。PSD に用いたデータの規格化および St 数は以下の式で定義した。

$$St = \frac{f L_{ex}}{V_{ex}}$$
(3.8)

$$Power^{*} = \frac{Power \cdot V_{ex}}{L_{ex}}$$

$$f \qquad : \exists itz \ (1/s) \qquad (3.9)$$

なお、Position-DE5 において、 t_r =1,000sec の Middle-V ケース、および t_r =2,000sec の High-V ケース および Middle-V ケースは、成層界面に近い高さの熱電対が欠落しているため、図には示

していない。

各位置の PSD をみると、UIS 切込みに近い側では、St 数により界面温度変動の PSD は整理で きることがわかる。一方、DHX 側では、St 数により整理できず、流れの小さいケースほど PSD が右側にシフトしていることがわかる。DHX 側の界面挙動は、切込み流れのように炉心出口流 速の影響を受けにくく、炉容器寸法等による体系固有の周期に依存して発生していると考えら れる。

3.2.2 スクラム前後の温度差の影響

原子炉スクラム前後の温度差を 10℃とした低温度差条件(以下、Low- Δ T)、温度差を 35℃と した高温度差条件(以下、High- Δ T)、自然循環試験(温度差 25℃)の温度成層界面挙動につい て評価を行った。この時のスクラム後の出口流速は 0.022m/s で一定とし、温度は実機換算温度 で示した。時間は実機換算時間であり、高さは実機相当として示した。また、DHX は運転して いない。

(1) 上部プレナム温度の鉛直方向分布

上部プレナム内の温度分布の時間推移に対し、温度差をパラメータとした試験について、各 位置における時間平均温度の比較を図 3.2.7-1~10 に示す。

各位置の時間平均温度に関して、High- ΔT ケースは、Low- ΔT ケースおよび自然循環試験と 比べ、温度成層界面位置は低くなっている。一方、Low- ΔT のケースは、自然循環試験と比べ、 温度成層界面高さはほぼ同等か、または僅かに低くなっている。プレナム上部の高温領域の温 度は、High- ΔT ケースおよび自然循環試験ではほぼ同等となり、Low- ΔT ケースでは小さくな っていることがわかる。

(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試験について、各位置の温度成層界面高さの時間 推移を図 3.2.8-1~2 に、成層界面の上昇速度を図 3.2.9 に、温度成層界面厚さを図 3.2.10-1~2 に 示す。上昇速度の算出は、3.1.1 項と同じである。

各位置の温度成層界面高さを見ると、High- ΔT ケースは、自然循環試験と比べ、成層界面高 さは低くなっている。一方、Low- ΔT ケースでの成層界面高さは、初期成層界面高さの違いは あるが、経過時間とともに自然循環試験とほぼ同程度の傾向を示していることがわかる。上昇 速度に関しては、High- ΔT ケースおよび Low- ΔT ケースは、自然循環試験と比べ、上昇速度は 僅かに大きくなっているが、どのケースもほとんど界面は上昇していないことから、データの ばらつきの範囲と考えられる。各位置の成層界面厚さは、界面が出来ない位置が多いものの、 Low- ΔT ケースは、自然循環試験と比べ、成層界面厚さが大きく、High- ΔT ケースは厚さが小 さくなる傾向がみられる。 (3) 温度成層界面における温度勾配

スクラム前後の温度差をパラメータとした試験について、各位置の温度成層界面での温度勾 配の時間推移を図 3.2.11-1~2 に示す。温度勾配の算出は、3.1.1 項と同じである。

各位置の温度勾配について、Low- ΔT ケースは、自然循環試験と比べ、ほぼ同等な温度勾配 の時間変化を示している。High- ΔT ケースは、Low- ΔT ケースおよび自然循環試験と比べ温度 勾配は大きくなる傾向を示した。

(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試験について、各位置の温度成層界面での温度変 動 PSD の比較を図 3.2.12-1~5 に示す。横軸は、式(3.8)に基づく St 数、縦軸は、式(3.9)に 基づいた規格化 PSD とした。PSD は、 t_r =2,000sec、3,000sec に着目し、その時の温度成層界面高 さに最も近い計測点の温度データ前後 50 秒間のデータを用いて求めた。なお、High- Δ T ケース の t_r =2,000sec での Position-DE2 および DE4、自然循環試験および Low- Δ T ケースの t_r =2,000sec、 3,000sec での Position-DE2 の位置で、界面位置が計測範囲を超えているので図には示していない。

Low- ΔT ケースは、自然循環試験と比べ、 $t_r=2,000 \sec$ および 3,000 sec の全ての位置において、 パワーは大きくなっていることがわかる。一方、High- ΔT ケースは、自然循環試験と比べ、低 周波数成分で僅かにパワーは大きく、高周波数成分になるとパワーは小さくなる傾向を示して いる。

3.2.3 同 Richardson 数一致条件下での炉心出口流速・温度差の影響

DHX を運転しない自然循環試験における Ri数を実機相当とした条件で、スクラム前後の温度 差を 10℃とし、流量を 2.0 m³/h とした条件(以下、Low- Δ T-V)、およびスクラム前後の温度差 を 35℃とし、流量を 3.14 m³/h とした条件(以下、High- Δ T-V)の温度成層化現象について評価 した。温度は、実機換算温度で示した。時間は実機換算時間であり、高さは実機相当として示 した。

なお、自然循環試験は、スクラム開始前の循環流量が若干異なるため今回の比較からは除外 した。

(1) 上部プレナム内温度の鉛直方向分布

上部プレナム内の温度分布に対し、炉心出口流速、温度を変更し、*Ri*数を一致させた試験の時間平均温度の鉛直方向分布を図 3.2.13-1~10 に示す。

各位置の時間平均温度に関して、Low-ΔT-V ケースは、High-ΔT-V ケースと比べ、温度成層 界面高さは高く、温度勾配は小さくなっている。ただし、両ケースとも、時間が経過しても界 面形成位置は変化せず、プレナム上部の高温域の温度は低くなっていくことがわかる。 (2) 温度成層界面高さの時間推移

同一の *Ri* 数の試験について、温度成層界面高さの時間推移の比較を図 3.2.14-1~2 に、成層界 面の上昇速度の比較を図 3.2.15 に示す。上昇速度の算出は 3.1.1 項と同じである。

温度成層界面高さについて、Low- Δ T-V ケースは、High- Δ T-V ケースと比べ、温度成層界面 が形成される位置は高くなっている。また、両ケースとも、経過時間とともに温度成層界面は ー旦下り、その後、上昇していく傾向を示している。上昇速度は、Low- Δ T-V ケースに比べ、 High- Δ T-V ケースは小さくなっているが、両ケースとも、成層界面高さはほぼ同じ位置に留ま っている結果となった。

(3) 温度成層界面における温度勾配

同一の Ri 数の試験について、各位置の温度成層界面での温度勾配の比較を図 3.2.16-1~2 に示 す。温度勾配の算出は 3.1.1 項と同じである。

High- Δ T-V ケースの温度勾配は、Low- Δ T-V ケースと比べ、全ての計測位置において成層界 面の温度勾配は大きくなっている。

(4) 温度成層界面における温度変動特性

同一の Ri 数の試験について、各位置の温度成層界面の温度変動の PSD の比較を図 3.2.17-1~5 に示す。横軸は、式 (3.8) に基づく St 数、縦軸は、式 (3.9) に基づいた規格化 PSD とした。 PSD は、 t_r =1,000sec、2,000sec での各位置の温度成層界面高さに最も近い計測点の前後 50 秒間の データを用いて求めた。また、算出方法は 3.1.1 項と同じである。なお、Low- Δ T-V ケースの Position-K のデータは、成層界面の計測範囲を超えているため図には示していない。High- Δ T-V ケースの t_r =1,000sec、2,000sec での Position-DE2 のデータは、成層界面に近い熱電対が欠落して いるため図には示していない。

全ての計測位置において、Low-ΔT-V ケースは、High-ΔT-V ケースと比べ、全ての周波数成 分での温度変動のパワーは大きくなっていることがわかる。

3.3 無次元数による温度成層界面挙動の評価

(1) 温度成層界面における上昇速度および温度勾配

図 3.3.1 に UIS 切込み側の UIS 内部 (Position-U11) と DHX 側の炉容器壁近傍 (Position-DE2) の位置における炉心出口流速およびスクラム前後の温度差に対する温度成層界面の上昇速度、温度勾配の関係を示す。また、温度勾配は、成層界面が到達する *t_r*=1,000sec 以降で最大となる値を用いた。上昇速度の算出は 3.1.1 項と同じである。炉心出口流速を変化させた場合のスクラム前後の温度差、およびスクラム前後の温度差を変化させた場合の炉心出口流速はそれぞれ一定である。

炉心出口流速の影響を見ると、流速が大きくなるに従い、上昇速度、温度勾配は大きくなる傾向を示し、UIS 切込み側と DHX 側の上昇速度はほぼ同程度であることがわかる。温度勾配の影響において、UIS 切込み側と DHX 側を比べると、流速が小さい場合は両側とも同等な温度勾配を示しているが、流速が大きくなると DHX 側と比べ、UIS 切込み側の方が温度勾配は大きくなる傾向である。炉心出口温度差の影響を見ると、炉心出口温度差の違いに依らずほぼ同程度の上昇速度および温度勾配であることがわかる。また、UIS 切込み側と DHX 側を比べると、ほぼ同程度の上昇速度を示し、温度勾配は、UIS 切込み側の方が大きくなっている。

(2) 温度成層化現象における無次元数の検討

図 3.3.2 に切り込み側の UIS 内部(Position-U11)の DHX 側の炉壁(Position-DE2)の位置に おける無次元数と温度成層界面の上昇速度および温度勾配の関係について示す。また、図には 既報^[13]で示した強制循環条件での成層界面の上昇速度、温度勾配を示した。

温度勾配と Pe 数の関係をみると、右上がりの分布を示し、Pe 数が大きくなるに従い成層界面 の上昇速度および温度勾配とも大きくなる傾向を示していることがわかる。上昇速度は、Pe 数 に対して右上がりの傾向をもつがばらつきが生じている。上昇速度と Ri 数の関係は、Ri 数が約 10 程度までは上昇速度は小さくなる傾向を示しているが、Ri 数が 10 より大きくなると上昇速度 の分布にばらつきが生じ、明確な傾向は確認できないことがわかる。温度勾配は Ri 数に対して 右下がりの傾向ではあるがばらつきが生じている。温度成層界面と Gr/Pe との関係について上昇 速度をみると、右下がりの分布を示し、Gr/Pe が大きくなると上昇速度は小さくなる傾向を示し ている。温度勾配に関しては、分布にばらつきが生じ明確な傾向は確認できない。

3.4 炉容器壁にかかる熱応力評価

スクラム時の原子炉容器上部プレナム内で発生する温度成層化現象による原子炉容器への熱 応力を評価するために、古橋^[14]らにより提案されている方法を用いた評価を実施した。古橋ら の方法は、軸方向温度分布を成層界面厚みで示し、流体から構造材への熱伝達と構造材内での 熱伝導をモデル化した円筒シェルモデルを用いたものである。これにより、ある厚みをもった 温度成層界面に対して、有限の熱伝達率と構造材の厚みから、熱応力を算出することができる(付 録1参照)。

図 3.4.1 に本手法による原子炉容器の熱応力推定値を示す。ここで、原子炉容器板厚は 60mm とし、流体から構造材への熱伝達率は 930W/m²K と 5,000W/m²K^[15]の 2 ケースを想定した。横軸 は成層界面厚さ、縦軸は熱応力 Sn とし、熱応力は曲げ応力と膜応力を合わせたものの最大値と して示す。スクラム前後の温度差は、強制循環条件で 198℃、自然循環条件で 142℃となる。ま た、限界熱応力値は、母材で約 325MPa、溶接部で約 270MPa である。本図をみると、熱応力に 対する熱伝達率の影響は比較的小さいことがわかる。軸方向温度分布において、 $T^*=0.2\sim0.8$ を 示す軸方向幅(ΔL)を 0.6 で除することにより求めた成層界面厚みは、実機換算で 430mm (強 制循環試験)、1,443mm(DHX 運転試験)、2,697mm(自然循環試験)となる。この結果、強制 循環除熱試験条件では、構造に発生する限界値を超えているのに対し、自然循環除熱試験条件 では、DHX 運転および停止条件において発生する熱応力は限界値を下回っていることがわかる。

4. 結論

1/11 縮尺炉容器上部プレナム水試験装置を用いて、FHM プラグ下端の高さを CIP と最下段の B/P の中間の位置に設置した体系で、自然循環除熱条件における DHX 運転および停止、原子炉 スクラム後の炉心出口流量および温度をパラメータとした試験を実施した結果を以下に示す。

- <自然循環試験と強制循環試験の比較>
- ・成層界面形成位置は、強制循環条件と比べ、自然循環条件の方が低く、上昇速度は小さくなった。
- ・自然循環条件に系統運用を変更することで、成層界面での温度勾配が 1/3 程度に低減すること がわかった。
- <DHX 運転の影響>
- ・DHX を運転した場合、DHX を停止した場合と比べ、成層界面上昇速度は増加した。一方、成 層界面での温度勾配はほぼ同等であることがわかった。
- ・DHX を運転した場合、DHX 出口からの低温流体が炉上部プレナム底部に停留することにより、 炉容器壁に急峻な温度勾配が発生することが明らかになった。
- <スクラム後の炉心出口流速の影響>
- ・スクラム後の炉心出口流速が大きくなると、成層界面の上昇速度および温度勾配は大きくなる傾向を示した。
- <スクラム後の炉心出口温度差の影響>
- ・出口温度差が大きい場合、成層界面の上昇速度および温度勾配は大きくなった。
- <同一 Richardson 数条件下での炉心出口流速・温度差の影響>
- ・ 炉心出口流速および温度差が大きい場合、低い位置で温度成層界面が形成され、上昇速度は 小さくなることがわかった。
- ・炉心出口流速および温度差が大きい場合は、成層界面の温度勾配は大きくなる傾向を示した。
- < 無次元数による温度成層界面の評価>
- ・成層界面の温度勾配は Pe 数、成層界面の上昇速度は Ri 数で整理できることがわかった。
- ・成層界面の温度勾配は、Pe 数が大きくなるにつれて大きくなる。また、成層界面の上昇速度 は Ri 数が大きくなるにつれて小さくなる傾向を示した。
- <炉壁にかかる熱応力評価>
- ・強制循環条件では、構造に発生する限界値を超えているのに対し、自然循環条件では、DHX 運転および停止条件において発生する熱応力は限界値を下回っていることがわかった。

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熱流体技術開発課 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

- [1] Kotake, S. 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, 2008, pp.486-495.
- [2] Shimakawa, Y. et al., An Innovative Concept of the Sodium-cooled Reactor to Pursue High Economic Competitiveness, Nucl. Tech., vol.10, 2002, pp.1-17.
- [3] 村松壽晴他、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-TN9400 2001-117, 2002, 53p.
- [4] Kimura, N. et al., Experimental Study on Flow Optimization in Upper Plenum of Reactor Vessel for a Compact Sodium-Cooled Fast Reactor, Nucl. Tech., vol.152, 2005, pp.210-222.
- [5] 木村暢之 他、プレナム内温度成層化現象に関する実験研究-多次元熱流動解析による成層 界面上昇速度の評価-, JNC-TN9400 99-075, 1999, 91p.
- [6] 桃井一光 他,上部プレナム内温度成層化現象に関する研究(I)-成層界面上昇速度-,日本原子力学会「1995 年春の年会」A38, p.38.
- [7] Ieda, Y. et al., "Experimental and Analytical Studies of the Thermal Stratification Phenomena in the Outlet Plenum of Fast Breeder Reactors," Nucl. Eng. Des., vol.120, 1990, pp.403-414.
- [8] Koga, T. et al., Experimental Study on Thermal Stratification in a Reactor Hot Plenum of a Japanese Demonstration LMFBR, *Proc. of the 8th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, Kyoto, Japan, September 30-October 4, vol.3, 1997, pp.1704-1711.
- [9] Moriya, S. et al., "Effects of Reynolds Number and Richardson Number on Thermal Stratification in Hot Plenum," Nucl. Eng. Des., vol.99, 1987, pp.441-451.
- [10] Muramatsu, T. and Ninokata, H., "Investigation of Turbulence Modelling in Thermal Stratification Analysis," Nucl. Eng. Des., vol.150, 1994, pp.81-93.
- [11] Tanaka, N. et al., "Prediction Method for Thermal Stratification in a Reactor Vessel," Nucl. Eng. Des., vol.120, 1990, pp.395-402.
- [12] 木村暢之 他, 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-切込みつき UIS の影響と温度勾配緩和方策-, JAEA-Research 2009-026, 2009, 160p.
- [13] 木村暢之他、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ー炉 心出口流速およびスクラム前後の温度差の影響ー、JAEA-Research 2010-065, 2010, 191p.

- [14] 古橋一郎他,内包流体の温度成層化により円筒容器に生じる熱応力の評価線図,日本機械
 学会論文集(A編),73巻730号,2007,pp.14-21.
- [15] 木村暢之 他, ナトリウム冷却高速炉の温度成層化現象に関する実験研究 自然循環条件 での成層界面挙動-, 日本原子力学会「2010 年秋の大会」K27, p.616.

表	2.3.1	試験条件

	流退	톤 [M/S]	温度 [℃]			プラグ		/#= / /.	
クース名	初期	トリップ	初期	トリップ	温度差	KI	高さ	佩考	
生松	5 27	0.76	555	357	198	2.77		強制循環除熱条件	
天陇	5.37	0.18	555	413	142	35.94		自然循環除熱条件	
Case1-1		0.079	40	15	25	2.77	B/P#0.5	強制循環除熱試験 DHX 運転なし条件	
Case2-1		0.022	40	15	25	35.94		自然循環除熱試験 DHX 運転なし条件	
Case3-1		0.022	40	15	25	35.94	B/P#4	FHM プラグ 位置 : 高	
Case4-1		0.017	45	35	10	35.94		自然循環除熱試験 DHX 運転あり条件	
Case5-1	-	0.017	45	35	10	35.94	-	流速:低 温度差:低	
Case6-1	0.25	0.026	45	10	35	35.94		流速:高 温度差:高	
Case7-1		0.05	40	15	25	7.04	B/P#0.5	流速:高	
Case8-1		0.033	40	15	25	15.83		流速:中	
Case9-1		0.017	40	15	25	63.33		流速:低	
Case10-1		0.022	45	10	35	50.31		温度差:高	
Case11-1		0.022	45	35	10	20.37		温度差:低	

備考)*Case4-1の計測位置に関しては、「表 2.5.1 自然循環除熱試験 DHX 運転ありの計測位置パラメータ」 を参照のこと。

*DHX 運転の影響評価を確認するために DHX 出口での Ri 数を実機に一致させたため、Case2-1 と Case4-1/Case5-1 の試験条件が異なっている。

試験ケース		炉心出口			一次系流量に	DHX 出口		
		温度差ΔT	流速 V	Ri 数	対する DHX 通	温度	流速	Ri 数
		(°C)	(m/s)	(-)	過流量の割合	(°C)	(m/s)	(-)
実機	自然循環	142	0.18	35.9	0.11	245	0.26	32
1/11	DHX なし	10	0.016	35.9	_	_	_	_
モデル	DHX あり	10	0.016	35.9	0.11	22	0.023	32

表 2.3.2 自然循環除熱試験 DHX 運転ありの試験条件

表 2.5.1 自然循環除熱試験 DHX 運転ありの計測位置パラメータ

ケニッタ	T/C 計測位置条件				
クーへ泊	TE-DS1	TE-DS2 (DHX 出口近傍)	TE-K(炉壁近傍)		
Case4-1	炉心出口より 5mm 上 (250 度)	DHX 炉心側外周面 (0 度)	0度 T/C 下端 232mm		
Case4-2	炉心出口より 15mm 上 (225 度)	炉心出口より 18.5mm 上 DHX 炉心側 (30 度) 炉心出口より 18.5mm 上	68.5 度 T/C 下端 15mm		
Case4-3	炉心出口より 25mm 上 (225 度)	DHX 炉心側 (20 度) 炉心出口より 18.5mm 上	90 度 T/C 下端 15mm		
Case4-4	炉心出口より 35mm 上 (225 度)	DHX 炉心側 (10 度) 炉心出口より 18.5mm 上	90 度と DHX の間 T/C 下端 15mm		
Case4-5	炉心出口より 45mm 上 (225 度)	DHX 直下 (-20 度) 炉心出口より 18.5mm 上	DHX の裏 T/C 下端 15mm		
Case4-6	炉心出口より 5mm 上 (225 度)	DHX 直下 (0 度) 炉心出口より 5mm 上	DHX と C/L の間 T/C 下端 15mm		



図2.1.1 1/11縮尺上部プレナム試験装置のループ構成図



図2.2.1 1/11縮尺炉容器上部プレナム試験装置の概略構造図



図2.2.2 模擬炉心直接炉内冷却器の概略構造図






(a) 実機(H19年度設計での実機システム解析)



(b) 1/11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



(a) 実機(H19年度設計での実機システム解析)



(b) 1/11炉上部水流動試験

図2.4.3 DHX起動時の出口温度、流量の過渡変化



図2.5.1 熱電対ツリーの概略構造図



図2.5.2-1 熱電対ツリー設置位置

JAEA-Research 2014-014





図2.5.2-2 熱電対ツリー設置位置



図3.1.1-1 時間平均温度の鉛直方向分布に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.1-2 時間平均温度の鉛直方向分布に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.1-3 時間平均温度の鉛直方向分布に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.1-4 時間平均温度の鉛直方向分布に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.1-5 時間平均温度の鉛直方向分布に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.1-6 時間平均温度の鉛直方向分布に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.1-7 時間平均温度の鉛直方向分布に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.1-8 時間平均温度の鉛直方向分布に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.1-9 時間平均温度の鉛直方向分布に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.1-10 時間平均温度の鉛直方向分布に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.2 温度成層界面高さおよび成層界面幅の導出



図3.1.3-1 温度成層界面高さに関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.3-2 温度成層界面高さに関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.4 温度成層界面の上昇速度に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.5-1 温度成層界面厚さに関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.5-2 温度成層界面厚さに関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.6 温度成層界面の時間変化に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.7-1 温度成層界面での温度変動のPSDに関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.7-2 温度成層界面での温度変動のPSDに関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.7-3 温度成層界面での温度変動のPSDに関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.7-4 温度成層界面での温度変動のPSDに関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.7-5 温度成層界面での温度変動のPSDに関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.8-1 温度成層界面の温度勾配に関する自然循環と強制循環の比較



図3.1.8-2 温度成層界面の温度勾配に関する自然循環と強制循環の比較

JAEA-Research 2014-014



図3.1.9 DHX運転時における可視化結果



図3.1.10-1 時間平均温度の鉛直方向分布に関するDHX運転の影響



図3.1.10-2 時間平均温度の鉛直方向分布に関するDHX運転の影響



図3.1.10-3 時間平均温度の鉛直方向分布に関するDHX運転の影響



図3.1.10-4 時間平均温度の鉛直方向分布に関するDHX運転の影響



図3.1.10-5 時間平均温度の鉛直方向分布に関するDHX運転の影響



図3.1.10-6 時間平均温度の鉛直方向分布に関するDHX運転の影響


図3.1.10-7 時間平均温度の鉛直方向分布に関するDHX運転の影響



図3.1.10-8 時間平均温度の鉛直方向分布に関するDHX運転の影響



図3.1.10-9 時間平均温度の鉛直方向分布に関するDHX運転の影響



図3.1.10-10 時間平均温度の鉛直方向分布に関するDHX運転の影響



図3.1.11-1 成層界面高さに関するDHX運転の影響



図3.1.11-2 成層界面高さに関するDHX運転の影響



図3.1.12 成層界面の上昇速度に関するDHX運転の影響



図3.1.13-1 成層界面の温度勾配に関するDHX運転の影響



図3.1.13-2 成層界面の温度勾配に関するDHX運転の影響



図3.1.14 温度成層界面の時間推移に関するトリップ後のDHX運転の影響



図3.1.15 DHX運転時における時間平均温度および温度変動強度 の鉛直方向のコンター



図3.1.16 DHX運転時における鉛直方向の時間平均温度の水平方向分布



図3.1.17 DHX運転時における鉛直方向の温度変動強度の水平方向分布





図3.1.19 DHX運転時における水平方向の時間平均温度の水平方向分布



図3.1.20 DHX運転時における水平方向の温度変動強度の水平方向分布



および温度変動強度の鉛直方向のコンター



図3.1.22 DHX運転時おける炉容器壁近傍の時間平均温度の鉛直方向分布



図3.1.23 DHX運転時おける炉容器壁近傍の温度変動強度の鉛直方向分布



図3.1.24 DHX運転時おける炉容器壁近傍の温度勾配



図3.2.1-1 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3.2.1-2 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3.2.1-3 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3.2.1-4 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3.2.1-5 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3.2.1-6 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3.2.1-7 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3.2.1-8 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3.2.1-9 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3.2.1-10 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3.2.2-1 温度成層界面高さに関する炉心出口流速の影響



図3.2.2-2 温度成層界面高さに関する炉心出口流速の影響



図3.2.3 温度成層界面の上昇速度に関する炉心出口流速の影響



図3.2.4-1 温度成層界面厚さに関する炉心出口流速の影響



図3.2.4-2 温度成層界面厚さに関する炉心出口流速の影響



図3.2.5-1 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3.2.5-2 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3.2.6-1 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



図3.2.6-2 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



図3.2.6-3 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3.2.6-4 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3.2.6-5 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3.2.7-1 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3.2.7-2 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3.2.7-3 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3.2.7-4 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3.2.7-5 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3.2.7-6 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3.2.7-7 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3.2.7-8 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3.2.7-9 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3.2.7-10 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3.2.8-1 温度成層界面高さに関する炉心出口温度差の影響



図3.2.8-2 温度成層界面高さに関する炉心出口温度差の影響



図3.2.9 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3.2.10-1 温度成層界面厚さに関する炉心出口温度差の影響



図3.2.10-2 温度成層界面厚さに関する炉心出口温度差の影響



図3.2.11-1 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3.2.11-2 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3.2.12-1 温度成層界面での温度変動のPSDに関する炉心出口温度差の影響



図3.2.12-2 温度成層界面での温度変動のPSDに関する炉心出口温度差の影響



図3.2.12-3 温度成層界面での温度変動のPSDに関する炉心出口温度差の影響



図3.2.12-4 温度成層界面での温度変動のPSDに関する炉心出口温度差の影響



図3.2.12-5 温度成層界面での温度変動のPSDに関する炉心出口温度差の影響



図3.2.13-1 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3.2.13-2 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3.2.13-3 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3.2.13-4 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3.2.13-5 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3.2.13-6 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3.2.13-7 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3.2.13-8 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3.2.13-9 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3.2.13-10 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3.2.14-1 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3.2.14-2 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3.2.15 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3.2.16-1 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3.2.16-2 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3.2.17-1 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3.2.17-2 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3.2.17-3 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3.2.17-4 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



図3.2.17-5 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3.3.1 温度成層界面の上昇速度、温度勾配に関する炉心出口流速・温度差の影響



図3.3.2 温度成層界面の上昇速度、温度勾配に関する無次元数の関係

		Heat Transfer Coefficient (W/m ² K)	
		930	5,000
Temperature Difference (^o C)	142		
	198		





図3.4.1 原子炉容器の熱応力推定値

付録1 古橋らによる熱応力評価手法

古橋らの提案する応力評価手法では、温度成層厚さLをもつランプ状流体温度分布から温度プロフィール法により温度減衰率e^{-bz}となる円筒容器の板厚平均温度分布を決定し、シェル応力を算出する。

流体温度分布を(1)式のようなランプ状温度分布として、板厚平均した円筒容器の軸方向 温度分布を(2)式のように仮定する。

(2)式から温度プロフィール法により、温度減衰係数bを決定すると以下で書き表される。

$b = \frac{1}{t}$	$\sqrt{\frac{3Bi}{3+Bi}}$	
t	: 板厚	(m)
Bi	: ビオ数 (= <i>ht/</i> λ)	(-)
h	: 熱伝達率	(W/m^2K)
λ	: 熱伝導率	(W/m⋅K)

なお、bは固有関数展開法における第1固有値の近似解となっている。

(2)式のような温度分布をもつ容器壁を円筒シェルとみなした場合、半径外向きの変位は (3)式の微分方程式として与えられ、その解は(4)式となる。なお、内圧の影響や板厚方向温 度差の影響は除外している。

$$\frac{d^4u(z)}{dz^4} + 4\beta^4 u(z) = \frac{Et\alpha}{DR}T_m(z)$$
(3)

$$\begin{split} u(z) &= R\alpha T_{m}(z) - \frac{mR\alpha\Delta T}{2bL} (e^{-b|z|} - e^{-b|z-L|}) \\ &- \frac{mR\alpha\Delta T}{4\beta L} \{ e^{-\beta|z|} \sin(\beta|z|) - e^{-\beta|z|} \cos(\beta z) \\ &- e^{-\beta|z-L|} \sin(\beta|z-L|) + e^{-\beta|z-L|} \cos(\beta(z-L)) \} \\ &+ \frac{nR\alpha\Delta T}{2\beta L} \{ e^{-\beta|z|} \sin(\beta|z|) + e^{-\beta|z|} \cos(\beta z) \\ &- e^{-\beta|z-L|} \sin(\beta|z-L|) - e^{-\beta|z-L|} \cos(\beta(z-L)) \} \\ u \quad : \\ &+ 2E\delta fn \phi \phi dz \qquad (m) \\ R \quad : \\ &- R \quad : \\ &-$$

ここで、荷重減衰係数β及びパラメータn,mは以下のように表される。

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Et}{4DR^2}} = \frac{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{\sqrt{Rt}}$$
$$m = \frac{b^4}{4\beta^4 + b^4} = \frac{(b/\beta)^4}{4 + (b/\beta)^4}$$
$$n = \frac{\beta^2 b^2}{4\beta^4 + b^4} = \frac{(b/\beta)^2}{4 + (b/\beta)^4}$$
$$\nu \qquad : \forall \mathcal{T} \vee \mathcal{V} \not \bowtie \qquad (-)$$

円筒容器の変位量から軸方向曲げ応力 σ_{zb} 、円周方向膜応力 σ_{hm} 及び円周方向曲げ応力 σ_{hb} を求めるとそれぞれ(5)式から(7)式となる。

$$\sigma_{zb}(z) = \frac{fnE\alpha\Delta T}{bL} (e^{-b|z|} - e^{-b|z-L|}) + \frac{fmE\alpha\Delta T}{4\beta L} \{e^{-\beta|z|}\sin(\beta|z|) + e^{-\beta|z|}\cos(\beta z) - e^{-\beta|z-L|}\sin(\beta|z-L|) - e^{-\beta|z-L|}\cos(\beta(z-L))\} + \frac{fnE\alpha\Delta T}{2\beta L} \{e^{-\beta|z|}\sin(\beta|z|) - e^{-\beta|z|}\cos(\beta z) - e^{-\beta|z-L|}\sin(\beta|z-L|) + e^{-\beta|z-L|}\cos(\beta(z-L))\}$$
(5)

$$\sigma_{hm}(z) = -\frac{mE\alpha\Delta T}{bL} (e^{-b|z|} - e^{-b|z-L|}) -\frac{mE\alpha\Delta T}{4\beta L} \{e^{-\beta|z|} \sin(\beta|z|) - e^{-\beta|z|} \cos(\beta z) - e^{-\beta|z-L|} \sin(\beta|z-L|) + e^{-\beta|z-L|} \cos(\beta(z-L))\} +\frac{nE\alpha\Delta T}{2\beta L} \{e^{-\beta|z|} \sin(\beta|z|) + e^{-\beta|z|} \cos(\beta z) - e^{-\beta|z-L|} \sin(\beta|z-L|) - e^{-\beta|z-L|} \cos(\beta(z-L))\} \sigma_{hb}(z) = \nu\sigma_{zb}(z)$$
(7)

ここで、定数fは以下で表される。

$$f = \sqrt{\frac{3}{1 - \nu^2}} = 1.816 \ (\nu = 0.3)$$

付録2 温度成層化現象に対する FHM プラグ設置位置の影響

温度成層界面挙動に対するプラグ設置位置の影響については既報^{[13][14]}により、強制循環模擬 条件では、FHM プラグを上部プレナム内に深く挿入することで成層界面の温度勾配は低減でき ることを明らかにした。試験では、自然循環を模擬した条件に対して、FHM プラグを B/P0.5 段目(B/P#0.5)と4段目(B/P#4)に設置した場合の試験結果との比較を示した。また、温度 は試験体温度で示した。時間は実機換算時間であり、高さは試験体の実座標として示した。

(1) 上部プレナム内温度の鉛直方向分布

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 1-1~10 に示す。

全ての位置の時間平均温度を見ると、B/P#4 ケースは、B/P#0.5 ケースと比べ、経過時間に関わらず成層界面位置が高くなっていることがわかる。

(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 2-1~2 に、成層界面の上昇速度の比較を図 2-3 に示す。また、成層界面厚さの時間変化を図 2-4~5 に示す。

温度成層界面高さを見ると、B/P#4 ケースは、B/P#0.5 ケースと比べ、全ての位置において成 層界面が形成される位置が高くなっていることがわかる。また、上昇速度については、B/P#4 ケースは B/P#0.5 ケースより小さいことがわかる。温度成層界面厚さに関しては、B/P#0.5 ケー スと B/P#4 ケースを比べると、B/P#4 ケースのほうが全ての位置において大きくなっているこ とがわかる。

(3) 温度成層界面における温度勾配への影響

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での温度勾配の時間推移の比較を図 3-1~2 に示す。

温度勾配について、B/P#0.5 ケースと B/P#4 ケースを比べると、初期の温度勾配はほぼ同程度 であるが、その後、経過時間とともに B/P#4 ケースのほうが温度勾配は小さくなる傾向を示し ている。強制循環模擬条件では、FHM プラグを深く挿入したケースのほうが温度勾配は小さく なっていたが、自然循環模擬条件では、B/P#4 ケースのほうが B/P#0.5 ケースと比べて、温度勾 配は小さくなっており、強制循環模擬条件とは逆の傾向を示している。この理由は不明である が、B/P#4 ケースと B/P#0.5 ケースの差は小さく、温度勾配は強制循環模擬条件に比べ、十分小 さいため構造健全性を及ぼすことはないと考える。

(4) 温度成層界面における温度変動特性の影響

図 4-1~5 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、*t*,=1,000sec、2,000sec 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。算出方法は 3.1.1 項と同じである。また、B/P#0.5 ケースの Position-DE2 にお いては、成層界面が形成されている最も近い熱電対が欠落しているため図には示していない。

PSD に関して、B/P#4 ケースは、B/P#0.5 ケースと比べ、*t_r*=1,000sec の時は、全ての位置において、PSD はほぼ同等の傾向を示している。一方、*t_r*=2,000sec においては、B/P#4 ケースのほうが B/P#0.5 ケースと比べ、僅かに低周波数成分の PSD は大きくなっていることがわかる。



図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2-1 成層界面高さに関するプラグ高さの影響



図2-2 成層界面高さに関するプラグ高さの影響



図2-3 温度成層界面の上昇速度に関するプラグ高さの影響



図2-4 成層界面厚さに関するプラグ高さの影響



図2-5 成層界面厚さに関するプラグ高さの影響



図3-1 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 温度成層界面の温度勾配に関するプラグ高さの影響



図4-1 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4-2 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4-3 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4-4 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4-5 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

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	Α			
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. 基本単位を用いて表される	SI組工単位の例				
a 立 是 SI	SI 基本単位				
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 毎メートル	m ⁻¹				
密度,質量密度キログラム毎立	ちメートル kg/m ³				
面積密度キログラム毎平5	ちメートル kg/m ²				
比体積 立方メートル毎日	キログラム m ³ /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方	$\vec{r} \neq - \mathbf{k} \mathbf{k} = \mathbf{k} \mathbf{k} \mathbf{k} \mathbf{k}^{2}$				
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 ⁸				
質量濃度 キログラム毎立法	去メートル kg/m ³				
輝度カンデラ毎平方	$i = \mathcal{N} - \mathcal{N}$ cd/m^2				
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1				
比透磁率 (b) (数字の) 1	1				
(a) 量濃度(amount concentration) は臨床化	学の分野では物質濃度				
(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 租工单位	
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
平 面 隹	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立 体 催	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 (b)	$m^{2/}m^2$
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力,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	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁床	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
光東	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)	Bq		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 性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{\cdot 2}$
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 コ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。
 (a)へルツは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)へルツは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (a)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。モルシウス度とケルビンの
 (b)からさは同一である。したがつて、温度差や温度関節を対象値はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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	I 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
電東密度,電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘 電 率	「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
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

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	۰	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

衣される剱値が美敏的に侍られるもの					
	名	称		記号	SI 単位で表される数値
電	子 オ	ドル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダ	ル	F	\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
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーバ	Np	の単位しの教徒的な関係は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デジベル	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	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\rm sb}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd } \text{ cm}^{\cdot 2} = 10^4 \text{ cd } \text{m}^{\cdot 2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx		
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$		
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。

		3	表10.	SIに 尾	禹さないその他の単位の例
	名	称		記号	SI 単位で表される数値
+	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			ド	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	T.	N	11		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系カラ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力		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