JAEA-Research 2012-014



ナトリウム冷却炉の高サイクル熱疲労の防止に関する 実験研究 - コラム型 UIS 下部におけるサーマルストライピング現象-

Experimental Study on Prevention of High Cycle Thermal Fatigue in a Compact Reactor Vessel of Advanced Sodium Cooled Reactor - Thermal Striping Phenomena at Bottom of Upper Internal Structure -

小林 順 木村 暢之 飛田 昭 上出 英樹

Jun KOBAYASHI, Nobuyuki KIMURA, Akira TOBITA and Hideki KAMIDE

次世代原子カ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

July 2012

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, 2012

ナトリウム冷却炉の高サイクル熱疲労の防止に関する実験研究 ーコラム型 UIS 下部におけるサーマルストライピング現象-

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 小林 順、木村 暢之、飛田 昭⁺、上出 英樹

(2012年4月25日受理)

FaCT プロジェクトにおいて、ナトリウム冷却高速炉 JSFR の設計が進められている。JSFR では、制御棒 チャンネルと燃料集合体との出口ナトリウム温度差は最大で 100℃程度となるため、炉心出口部における 流体の混合による温度変動が炉上部構造(UIS:Upper Internal Structure)の下部に高サイクル熱疲労を 与える可能性がある。また、UIS の構造として、内部に炉心からの流れが通るコラム型を採用していること から、これまでの炉とは異なる流況となっていると考えられる。そこで、炉心出口と炉容器上部プレナムを 対象とする 1/3 スケール 60° セクタモデルを使用した水流動試験を実施した。制御棒周辺の温度とその 変動強度分布を計測するとともに、熱疲労に対する対策構造の評価を行った。

本試験の目的は以下の通りである。

- (1) 制御棒チャンネル出口周辺における流動パターンを把握すること。
- (2) 温度変動の振幅と変動周波数の特徴を把握すること。
- (3) 高サイクル熱疲労の対策構造による温度変動低減効果を評価すること。

試験の結果、制御棒周辺の温度変動特性を把握するとともに、熱疲労に対する対策構造は温度変動 振幅を低下させ、構造材料に対する熱応力に変換されやすい周波数領域においても、その変動強度を 低下させる効果があることを明らかにした。また、比較的低温の冷却材が流出するブランケット集合体と炉 心燃料集合体との境界における温度変動強度分布を把握した。

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 Experimental Study on Prevention of High Cycle Thermal Fatigue in a Compact Reactor Vessel of Advanced Sodium Cooled Reactor - Thermal Striping Phenomena at Bottom of Upper Internal Structure -

Jun KOBAYASHI, Nobuyuki KIMURA, Akira TOBITA⁺ and Hideki KAMIDE

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

(Received April 25, 2012)

Japan sodium-cooled fast reactor, JSFR, has been investigated in the frame work of Fast Reactor Cycle Technology Development Project (FaCT). As the temperature difference between the control rod channels and the core fuel subassemblies is around 100 °C, temperature fluctuation due to the fluid mixing at the core outlet may cause high cycle thermal fatigue at the bottom of Upper Internal Structure (UIS). Then, a water experiment was conducted using a 1/3 scale 60 degree sector model. Temperature and its fluctuation intensity distributions around the control rod were measured and an effect of the improved structure against the thermal fatigue was examined.

The objectives of the experiment are as follows;

- (1) to grasp the flow pattern around the control rod(CR) channel outlet,
- (2) to grasp the amplitude and the frequency characteristics of the temperature fluctuation,
- (3) to confirm the effect of a countermeasure for the high cycle thermal fatigue.

As a result, thermal striping phenomena in the region between the fuel subassembly outlet and the bottom of the UIS were grasped. The geometry of the UIS bottom and the handling head of the primary CR channel was modified so as to suppress the cold jets exiting from the CR channels. The comparison of measured temperature fluctuations around the CR channels revealed that the modified geometry was effective to decrease the temperature fluctuation intensity and amplitude in the sensitive frequency band to the stress in the structures. Temperature fluctuation intensity distributions at the boundary between blanket subassemblies and core fuel subassemblies were also grasped.

Keywords: Thermal Striping, Thermal Fatigue, Column-type UIS, Upper Plenum, Sodium Cooled Fast Reactor, FaCT Project

⁺ Technology Development Department, Oarai Research and Development Center

目次

1. 序論 ·····	1
2. 試験装置と試験条件 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
2.1 試験装置概要 ••••••	2
2.2 ループ構成 ・・・・・	3
2.3 試験条件 ••••••••	3
2.4 計測方法 •••••••••	4
2.4.1 可視化試験 ••••••	4
2.4.2 温度分布計測 ••••••	5
2.5 温度変動緩和方策 ••••••	5
2.5.1 主炉停止系制御棒周辺に対する温度変動緩和方策 ・・・・・・・・・・・・・	5
2.5.2 後備炉停止系制御棒周辺に対する温度変動緩和方策 ・・・・・・・・・・・	6
3. 試験結果 •••••••	7
3.1 設計体系試験結果 ••••••	7
3.1.1 制御棒チャンネル出口部の可視化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	7
3.1.2 主炉停止系制御棒チャンネル周辺の温度分布測定結果 ・・・・・・・・・・・	7
3.1.3 後備炉停止系制御棒チャンネル周辺の温度分布測定結果 ・・・・・・・・・・	8
3.1.4 ブランケット集合体周辺の温度分布測定結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	8
3.2 温度変動緩和方策に対する試験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	9
4. 考察 ・・・・・・・・・・・・・・	10
4.1 主炉停止系制御棒周辺の温度変動緩和方策の効果 ・・・・・・・・・・・・・・・	10
4.2 後備炉停止系制御棒周辺の温度変動緩和方策の効果 ・・・・・・・・・・・・・	10
5. 結論 ••••••	12
謝辞	12
参考文献 ••••••	13

Contents

1. Introduction ·····	1
2. Experimental Apparatus and Conditions	2
2.1 Experimental Apparatus	2
2.2 Test Loop	3
2.3 Experimental Conditions	3
2.4 Measurement	4
2.4.1 Flow Visualization	4
2.4.2 Temperature Distributions Measurement	5
2.5 Countermeasures for Temperature Fluctuation •••••••	5
2.5.1 Countermeasures For Primary Control Rod Channel ·····	5
2.5.2 Countermeasures For Backup Control Rod Channel •••••••	6
3. Experimental Results	7
3.1 Result of Original Design Case	7
3.1.1 Flow Visualization of Control Rod Channel Outlet	7
3.1.2 Temperature Distribution of Primary Control Rod Channel	7
3.1.3 Temperature Distribution of Backup Control Rod Channel •••••••	8
3.1.4 Temperature Distribution of Blanket Subassemblies	8
3.2 Result of Modified Case	9
4. Discussion ·····	10
4.1 Effect of Decrease the Temperature Fluctuation for Primary Channel ••••••••••	10
4.2 Effect of Decrease the Temperature Fluctuation for Backup Channel ••••••••••	10
5. Conclusion ·····	12
Acknowledgements	12
References ·····	13

図表リスト

【表リスト】

表 2.1	試験条件	•••••••••••••••••••••••••••••	14
-------	------	-------------------------------	----

【図リスト】

図 2.1	試験体概要 ••••••	15
図 2.2	炉心配置および CIP 形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	16
図 2.3	ハンドリングヘッド形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
図 2.4	燃料集合体入口部多孔板形状および設置位置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	18
図 2.5	試験ループ構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	19
図 2.6	計測対象チャンネルと計測領域 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20
図 2.7	制御棒チャンネル周辺計測用熱電対ツリー ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	21
図 2.8	ブランケット集合体周辺計測用熱電対ツリー ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	22
図 2.9	熱電対ツリー計測高さ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
図 2.10	温度変動緩和方策 ••••••	24
図 2.11	断面積を拡大した主炉停止系制御棒チャンネル形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	25
図 2.12	フローホール付き制御棒案内管形状 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	26
図 2.13	緩和方策適用体系における温度計測箇所 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27
図 3.1	主炉停止系制御棒チャンネル周辺可視化画像 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	28
図 3.2	後備炉停止系制御棒チャンネル周辺可視化画像 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	29
図 3.3	主炉停止系制御棒チャンネル周辺 時間平均温度分布と変動強度分布 ・・・・・・・	30
図 3.4	主炉停止系制御棒チャンネル周辺	
1	最大変動強度発生計測線に沿った時間平均温度分布と変動強度分布 ・・・・・・・・	31
図 3.5	後備炉停止系制御棒チャンネル周辺 時間平均温度分布と変動強度分布・・・・・・・	32
図 3.6	後備炉停止系制御棒チャンネル周辺	
J	最大変動強度発生計測線に沿った時間平均温度分布と変動強度分布 ・・・・・・・・	33
図 3.7	ブランケット集合体周辺 時間平均温度分布と変動強度分布 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	34
図 3.8	ブランケット集合体周辺	
J	最大変動強度発生計測線に沿った時間平均温度分布と変動強度分布 ・・・・・・・・	35
図 3.9	設計体系と緩和方策の温度とRMSの径方向分布の比較 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
図 4.1	主炉停止系温度変動緩和効果 •••••	37
図 4.2	主炉停止系制御棒チャンネル 最大 RMS 点における温度時系列と PSD ・・・・・・・	38
図 4.3	後備炉停止系温度変動緩和効果 •••••	39
図 4.4	後備炉停止系制御棒チャンネル 最大 RMS 点における温度時系列と PSD ・・・・・	40

This is a blank page.

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)の一環として、ナトリウム冷却大型炉 JSFR の設計検討を行っており、高い安全性を確保すると同時に、システムの 簡素化・コンパクト化によって次世代軽水炉と同等のコストパフォーマンスの実現を目指している^[1]。

JSFR は、日本原子力発電株式会社が実証炉設計研究^[2]で設計した電力実証炉と比べ、メインループ 数の削減、配管長の短縮、ポンプ・中間熱交換器の合体などによってシステムが大幅に簡素化・コンパク ト化されている。原子炉容器では、コンパクト化と燃料交換システムの簡素化を図るために新しい型式の 炉上部機構(以下、UIS: Upper Internal Structure)を採用している。UIS は、制御棒の駆動軸や案内管、 炉心出口部の温度計装機器などを支持する構造物である。JSFR の UIS には燃料取扱設備を簡素化す るために切込みを有するコラム型 UIS が採用されており、燃料交換機のアームが UIS の切込みに入ること で燃料集合体にアクセスすることができる。これによって従来型の 2 重回転プラグを排し、炉容器径の削 減に寄与している。また、UIS は制御棒案内管と水平の多孔バッフル板等から構成され、胴がないことか ら、内部をナトリウムが流れる構造となっているため、燃料集合体から流出する高温ナトリウムと制御棒チ ャンネルから流出する低温ナトリウムにさらされ、高サイクル熱疲労が発生しやすい条件にある。さらに、 原子炉容器径は、実証炉と同程度の約 10m に抑える一方、電気出力は、実証炉の約 2.5 倍 (1,500MWe)としているため、炉心を通過する流量が増加し、従来の原子炉と炉内の流動状況が大きく 異なり、UIS の流力振動や高サイクル熱疲労に対する構造健全性を確認することが課題となっている。

そのため、炉心頂部から UIS 下部の構造をモデル化し、炉心部出口部の温度差および流速分布を模擬した「UIS 高サイクル熱疲労水流動試験装置(Test Rig for High Cycle Thermal Fatigue at Upper Internal Structure: TAFUT)」を製作し、UIS 下部において低温のチャンネルと高温の燃料集合体との温度差で生じる温度変動が UIS 下部構造に高サイクル熱疲労を与える可能性について、温度変動特性を評価して構造の疲労評価に供するとともに、温度変動を低減するための改良構造を見出すことを目的とした水流動試験を実施している。試験体は実機の 1/3 縮尺で上部プレナムを 60° セクタで切り出したモデルとし、水流動伝熱試験室に設置した。

これまでの原子力機構におけるサーマルストライピング現象に関する実験研究において、流体側の温 度変動が構造側の熱応力に伝達される際、流体側の温度変動の振幅だけでなく、その周波数が主要な 因子であることが明らかにされている^{[3][4]}。

守屋らは、レイノルズ数(Re)とペクレ数(Pe)が十分に大きい条件下であれば(Re数が20,000以上かつPe数が600以上)、水によって温度差のあるナトリウムジェットの混合現象をシミュレーションすることができることを示した^[5]。また、これまで機構で実施してきた水およびナトリウムを作動流体とする3噴流体系によるサーマルストライピング試験から、水試験によってナトリウム中での流体内温度変動特性(変動強度、周波数特性)を評価することが可能であるという知見が得られている^{[6][7]}。そこで本水流動試験では流体側の温度変動の把握を主な目的とし、構造物表面温度の評価は熱伝達率を含め別途行うこととした。

本報では、水流動試験装置 TAFUT を用いて、UIS 下部における流体の混合に伴う温度変動の特徴を 捉える試験を実施するとともに、温度変動の緩和を目的とした対策構造を提案し、その効果を評価した結 果について述べる。

2. 試験装置と試験条件

2.1 試験装置概要

図 2.1 に UIS 下部熱疲労水流動試験装置の概略構造を示す。縮尺は JSFR(1,500MWe)(以下、「実 機」)の 1/3 で、上部プレナムを 60° セクタで切り出したモデルとした。UIS 切込みによる影響を評価する と同時に、切込み部から離れた位置での温度変動の特性も評価するため、セクタモデルの端に切込み 部を配置している。なお、切込み部は上昇流が主で、切込みの中央を横切る流れは少ないことがこれま での 1/10 全周モデルでの計測結果から得られており^[8]、切込みを端部に配置することによる UIS 下部流 動場への影響はほとんどないと考えられる。また、高さ方向のモデル化範囲は、燃料集合体上部から UIS 最下部の計装支持板(以下「CIP: Core Instrumentation Support Plate」)、UIS 部の3 枚のバッフルプレー トを含み、4段目バッフルプレートの高さまで(4 枚目のバッフルプレートを除く)とした。ここで CIP は集合 体出口の直上に位置し、最も流体温度にさらされやすい構造物となる。プレナムの出口は試験体天井部 の1箇所から流出させる構造とした。実機のホットレグ設置位置とは異なっているが、60° セクタモデルで あるため、相似形状とすることには限界がある。一方で、着目する領域は UIS の下部であり、流出部から 離れていることから、大きな影響はないと考えられる。試験体プレナム部は可視化が行えるよう、アクリル で壁面を構成し、ステンレスを補強材として使用した。

図2.2に60°セクタ内の炉心集合体出口配置とCIP形状を示す。60°セクタ内に炉心燃料集合体95 体、主炉停止系制御棒チャンネル6体、後備炉停止系制御棒チャンネル2体、ブランケット集合体16体 が配置される。実機の炉心燃料集合体は内側炉心(第1~第6流量領域)と外側炉心(第7・第8流量領 域)の2 領域に分かれ、それぞれ流量が異なっている。試験体では内側炉心として扇形の中心側に67 体を配置し、プレナム側に外側炉心として28体を配置した。CIPは設計を反映した形状とし、各集合体の 同心軸上に開けられたフロー孔は、集合体、制御棒に分けて、図2.2に示すように下部に斜めの広がりを 持たせた。ただし、集合体出口温度計など計装品の取付支持構造などは形状がまだ決定されていない ためモデル化していない。また、制御棒上部案内管は実機設計に合わせて、主炉停止系では UIS 上部 から CIP まで貫通させ、後備炉停止系では UIS 上部から第1バッフル板までとした。ただし、後備炉停止 系の自己作動型炉停止機構(SASS)の感温部(設計では制御棒駆動軸より若干太くなっている)は模擬 していない。

図 2.3 に集合体上部のハンドリングヘッド形状を示す。実機集合体のハンドリングヘッドの形状を正確 に模擬し、集合体出口部の流速分布が実機と同一となるように配慮している。集合体下部の形状につい てはハンドリングヘッドの中性子遮蔽体部(流路径を絞った細い部分)の口径で直管を下に伸ばした形 状とした。主炉停止系制御棒チャンネル・燃料集合体チャンネル・ブランケット集合体チャンネルの中性 子遮蔽体部の内径は 32.9mm とした。また、後備炉停止系制御棒チャンネルの中性子遮蔽体部の内径 は 49.5mm とした。

集合体入口部に整流部を兼ねて2種類の多孔板を組み合わせ、合計2枚の多孔板を配置し、外側炉 心出口平均流速が内側炉心出口部の約 70%程度の流速となるようにした。集合体入口部に設置した多 孔板形状および設置位置を図 2.4 に示す。流量調整用多孔板は、ハンドリングヘッドから 760mm 下方に 設置した。 なお、多孔板の抵抗係数は下記の関係式より求めた^[9]。

$$K = \frac{2.0(1-\beta)}{\beta^2}$$
(2.1)

$$\beta = \left(\frac{\pi}{2\sqrt{3}}\right) \bullet \left(\frac{d}{L}\right)^2 \tag{2.2}$$

K:	抵抗係数	
β :	多孔板開口比	
d:	孔径	(m)
L:	多孔板ピッチ	(m)

2.2 ループ構成

本試験に用いた水流動試験装置のループ構成を図2.5に示す。試験体下部には上下2段のプレナム が設けられ、上段は燃料集合体に接続されている。また、下段は制御棒チャンネルおよびブランケット集 合体に接続されている。各プレナムにそれぞれ高温水(炉心燃料集合体用)、低温水(制御棒チャンネ ルおよびブランケット集合体用)を供給することによって、集合体出口部において温度差のある流体の混 合現象を模擬している。なお、低温側の冷却水供給量には限りがあることから、下段プレナム内の制御棒 チャンネルまたはブランケット集合体チャンネルの下端にある入口部を袋ナットによって閉止し、供給する チャンネルを任意に選択できる構造としている。

高温側ラインは、主循環ポンプ出ロ下流で分岐し、ヒータ、電磁流量計を経て、試験体の高温プレナムへ高温流体を供給する。主循環ポンプの最大吐出量は 800m³/h、最大揚程 40m である。また、ヒータ出力は 95kW である。低温側ラインは、チラーラインから試験体低温プレナムへ低温流体を供給するラインである。チラーポンプの最大吐出量は 22m³/h である。また、チラーは 50kW 容量のユニットを 2 台並列し、100kW の除熱能力を有している。

2.3 試験条件

試験条件を表 2.1 に示す。制御棒に加えて、炉心燃料集合体に比べて低温となるブランケット集合体 出口周りの温度についても計測する。対象とする現象は高温側チャンネルの流速およびその分布形状、 低温側との温度差に基づく浮力が支配要因であると考えられるため、実機と Ri 数が一致する条件とした。 なお、実機条件の平均的な代表温度として、燃料集合体出口温度を 560℃とし、制御棒チャンネルおよ びブランケット集合体出口温度を 500℃とした。

無次元数の定義を以下に示す。

$$Ri = \frac{g\beta\Delta TL}{V^2} \tag{2.3}$$

- 3 -

$$\operatorname{Re} = \frac{VL}{v}$$
(2.4)

g:	重力加速度	(m/s^2)
β :	体積膨張係数	(1/°C)
ΔT :	燃料集合体と制御棒チャンネル等の流体温度差	(°C)
L:	代表長さ(中性子遮蔽体部内径、最も細い部分)	(m)
V:	代表流速(燃料集合体出口流速)	(m/s)
ν :	動粘性係数	(m^2/s)

制御棒チャンネル周辺の温度分布測定試験では流体温度差を 15℃とし、燃料集合体のハンドリング ヘッド部の流速を 1.59m/s とした。主炉停止系チャンネル流速を 0.33m/s、後備炉停止系チャンネル流 速を0.06m/sとし、実機流速比は1/3.55である。なお、主炉停止系と後備炉停止系は独立して流量調節 ができないため、それぞれのチャンネル入口部を閉止して個別に試験を実施した。その際にブランケット 集合体も全集合体を閉止して試験を実施している。

一方、ブランケット集合体周辺の温度分布測定試験では、チラーポンプ吐出量の制限から、制御棒チャンネルの全数(8 体)を閉止し、さらに 16 体のブランケット集合体のうち、7 体を閉止して条件を設定した。 閉止したブランケット集合体の位置を図 2.6 に示す。流体温度差を8℃とし、燃料集合体のハンドリングへッド部の流速を 1.21m/s とした。ブランケット集合体流速を 0.29m/s とし、実機流速比は 1/4.66 である。

図 2.6 に計測対象チャンネルの位置と温度計測領域を示す。それぞれ切込みの影響が少ないと考えられる試験体中心部付近のチャンネルを計測対象とした。主炉停止系・後備炉停止系チャンネルの代表 温度計測は、後述する可視化染料注入用模擬制御棒に取付けた熱電対によって計測している。また、 ブランケット集合体の代表温度は、試験体壁面近傍のブランケット集合体内に挿入した熱電対にて計測 している。挿入深さはブランケット集合体出口部から150mm である。

2.4 計測方法

2.4.1 可視化試験

高温と低温流体の混合現象を把握するために、レーザーライトシートを用いて可視化を行った。制 御棒チャンネルから流出する低温流体が、その周辺において高温流体と混合する現象を可視化する ために、内部に樹脂製チューブを通した模擬制御棒を制御棒チャンネルに挿入し、制御棒チャンネル 内に可視化染料を注入した。レーザーライトシートによって発光した染料の流れを試験体上部および 側面から CIP 下部を対象に撮影した。可視化用蛍光染料はウラニン水溶液(フルオレセインナトリウム (C₂₀H₁₀Na₂O₅))を使用した。アルゴンレーザビームをシート状に広げたものを光源とし、デジタルビデ オカメラ(SONY HDV 1080i)を用いて撮影した。なお、試験体入口配管部から気泡を注入し、スリット状 にしたハロゲン光により、上部プレナム内の流れについても観察を行った。 2.4.2 温度分布計測

温度分布計測は、模擬制御棒駆動軸に熱電対をツリー状に取付け、制御棒駆動軸を回転させるこ とによって実施した。使用する熱電対は 0.3mm 径の K 型(CA) である。図 2.7 に制御棒周辺計測用の 熱電対ツリーと計測領域を示す。熱電対の配列ピッチは 5mm とし、制御棒チャンネルに隣接する燃料 集合体の中心までをカバーする円形領域の温度分布を計測した。また、制御棒チャンネルを挟んで両 側の温度分布を一度に計測できるように両腕型とした。さらに、腕によって配列位置を半ピッチずらす ことにより、計測の空間分解能を上げている。

一方、ブランケット集合体周辺については、ブランケット領域外側に熱電対ツリーを設置し、ブランケット集合体と外側炉心燃料集合体の各1層をカバーする扇形領域の温度分布を計測した。図 2.8 にブランケット集合体周辺計測用の熱電対ツリーと計測領域を示す。

図 2.9 に熱電対ツリーによる温度計測の高さを示す。制御棒周辺計測用の熱電対ツリーは CIP 下面 近傍を計測できるように、熱電対支持棒から伸びた保護管を 10°程度上側に傾斜をつけ、CIP 下 1mmの位置を計測した。一方、ブランケット集合体用熱電対ツリーについては、CIPの上下両面を計測 できるように水平とし、CIP 下 6mm の位置を計測した。

可視化試験により温度変動が大きくなると予測された位置については熱電対ツリーの回転ピッチを 5°で計測し、それ以外は10°ピッチで計測を行った。サンプリング周波数は200Hzとし、600秒間の 計測を行った。収録した試験データから電源ノイズを除去するため、オフラインで30Hzのデジタルロー パスフィルタによりノイズの除去を行っている。

2.5 温度変動緩和方策

設計体系における主炉停止系および後備炉停止系制御棒チャンネル近傍の温度変動をより緩和させる体系を考案し、その効果を評価するための試験を実施する。なお、ブランケット集合体近傍に対する温度変動緩和対策評価は本レポートとは別途行う。

2.5.1 主炉停止系制御棒周辺に対する温度変動緩和方策

主炉停止系周辺に対する温度変動緩和方策を図 2.10 に示す。

- 方策(1): 中性子遮蔽体部の内径を 32.9mm から 49.5mm に拡大し、制御棒駆動軸との間に形成さ れるアニュラス流路の断面積を 2 倍に拡大する。これによって制御棒チャンネルからの流出 速度を低下させる。ただし、ハンドリングヘッド形状の変更はしていない。 図 2.11 に流路を広 げた主炉停止系制御棒チャンネルの形状を示す。
- 方策(2): 制御棒案内管の第 1 バッフル板近傍にフローホールを設ける。フローホールの形状および設置位置を図 2.12 に示す。フローホールとして、1 断面毎に 3 個ずつ 2 断面、合計 6 個の穴を開け、穴の位置は上・下の断面で 60° ずらした。これにより、第1バッフル板の下側の高い圧力で、プレナムから案内管の中に高温の流体が侵入し、これを CIP の下方に吹き出させる。本方策は三菱 FBR システムズ(株)により検討された結果^[10]に基づいている。
- 方策(3): 集合体ハンドリングヘッドと CIP 間距離を 18mm から 36mm (装置上のスケール) に拡大する。これにより、低温の流体が CIP に当たることを緩和する。

2.5.2 後備炉停止系制御棒周辺に対する温度変動緩和方策 後備炉停止系チャンネルについては、方策(3)のみを適用した。

図 2.13 に緩和方策を適用した体系での温度計測箇所を示す。温度計測は、主炉停止系周辺・後備 炉停止系周辺ともに周方向に代表的な3ラインについて計測を行った。また、計測断面の高さは CIP 下 1mm とした。

3. 試験結果

3.1 設計体系試験結果

3.1.1 制御棒チャンネル出口部の可視化

主炉停止系、後備炉停止系制御棒のチャンネル出口近傍のフローパターンを把握するために、低 温流体の可視化試験を実施した。図 3.1 に主炉停止系制御棒周辺の可視化写真を示す。可視化した 制御棒は図 2.2 中の P4 である。レーザーライトシートを試験体側面の窓から CIP と炉心頂部の間の高 さに入れて水平断面を可視化した結果、低温流体が隣接する燃料集合体出口からのジェットとジェット の間をゆっくりと流れていく様子が確認された。ジェットとジェットの間は 1 本の制御棒の周囲に 6 カ所 存在するが、低温流体はその 6 方向にほぼ均等に流れている。また、試験体側面から観察すると、主 炉停止系から流出した低温流体は、その上部の CIP フロー孔を通過し、制御棒案内管内部まで到達 する。しかし、制御棒案内管内部にはフローパスがないため CIP と炉心頂部のギャップ領域に戻り、水 平方向に広がる様子が観察された。また、低温流体の一部は燃料集合体出口からのジェットに巻き込 まれて上昇していく様子も観察された。

図 3.2 に後備炉停止系制御棒周辺の可視化写真を示す。可視化した制御棒は図 2.2 中の B2 であ る。後備炉停止系では、主炉停止系に比べて流速が低く、不安定な流れが観察された。試験体上部 からの観察では、主炉停止系と同様にジェット間を低温流体が水平に流れるが、6 方向のジェット間を 均等に流れるのではなく、ある時刻では 6 方向の内の 1 方向に流れ、その後、別の 1 方向に流れを変 えるという、流れる方向が時々刻々変化する様子が観察された。また、試験体側面から観察すると、低 温流体は間欠的に CIP フロー孔を通過し、CIP 上面まで到達する。しかし、CIP 上面まで到達した低温 流体は CIP とハンドリングヘッドのギャップ領域に押し戻され、ギャップ領域において水平方向の流れ へ転ずる様子が確認された。これは、CIP と第1バッフル板間に案内管がなく、上部から CIP フロー孔 を通って下に向かう流れが存在するためであると考えられる。

3.1.2 主炉停止系制御棒チャンネル周辺の温度分布測定結果

図 2.6 に示す主炉停止系制御棒チャンネル周辺の時間平均温度分布と温度変動強度のコンターを 図 3.3 に示す。炉心中心に向かう方向、UIS 切込みの方向は図 2.6 と共通である。

なお、温度は制御棒チャンネル(T_{Cold})と燃料集合体出口(T_{Hot})との温度差を用いて、以下の式で 規格化した。

$$T^* = \frac{T - T_{Cold}}{T_{Hot} - T_{Cold}} \tag{3.1}$$

また、温度変動強度は温度変動の2乗平均平方根(Root-mean-square)として、以下の式で算出した。時間平均は600秒間120,000点のデータについて行った。

$$T_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (T_i - T_{Avg})^2}{N}} \qquad T_{Avg} = \frac{\sum_{i=1}^{N} T_i}{N} \qquad (3.2)$$

- 7 -

$$T_{RMS}^* = \frac{T_{RMS}}{T_{Hot} - T_{Cold}}$$
(3.3)

平均温度の分布から分かるように、低温流体はほぼ均等に周囲に流れている。可視化試験で観察 されたように、主炉停止系制御棒チャンネルから流出した低温流体は、燃料集合体からのジェットに巻 き込まれて上昇する流れと、ジェットの間をゆっくり通る流れになる。燃料集合体に向かう流れは混合 による温度上昇がほとんどなく高温ジェットに巻き込まれ、ジェット間に流れる低温流体は流速が小さ いため、混合によって温度が上昇し、図3.3のような温度分布になると考えられる。図3.3に示した変動 強度分布から分かるように、高温ジェットに巻き込まれる直前に変動強度が大きくなっている。UIS 切込 みに沿う方向を0°として35°方向の計測線上に変動強度が最大になる点が存在した。図3.4に35° 方向の計測線に沿った時間平均温度分布と変動強度分布を示す。この図から分かるように、制御棒チ ャンネル中心から 30mm 付近の温度勾配が大きく、この領域で変動強度も大きくなっていることが分か る。最大変動強度点における変動強度値は約0.26 であった。

3.1.3 後備炉停止系制御棒チャンネル周辺の温度分布測定結果

図 2.6 に示す後備炉停止系制御棒チャンネル周辺の時間平均温度分布と温度変動強度のコンターを図 3.5 に示す。可視化試験で観察されたように、後備炉停止系から流出する低温流体は、主炉停止系と比べて不安定で、流れる方向が一定していない。また、特に0°から80°方向に流れることが多く、炉容器壁側に偏っていることが分かる。最大変動強度点を含む計測線は 45°方向であり、図 3.6 に 45°の計測線に沿った時間平均温度分布と変動強度分布を示す。後備炉停止系では、後備炉停止系チャンネルの中心から50mm付近で温度勾配が大きくなるが、この位置で変動強度は最大になっていない。平均温度ではとらえられていないが、可視化試験で観察されたように、間欠的に CIP 上面まで到達する流れが存在し、そのために30mm付近で変動強度が大きくなっていると考えられる。最大変 動強度点における変動強度値は約 0.32 であった。

3.1.4 ブランケット集合体周辺の温度分布測定結果

図 2.8 に示すブランケット集合体周辺の時間平均温度分布と温度変動強度のコンターを図 3.7 に示 す。平均温度分布において、炉容器壁側では温度低下が見られず、炉心燃料集合体側(炉心中心方 向)のみに温度低下が見られた。気泡による上部プレナム内の可視化の結果、プレナムの底面に沿っ て炉容器壁からUISに向かう流れが確認され、ブランケット集合体から流出した低温流体がUIS内側に 向かって流されていると考えられる。ブランケット集合体と燃料集合体の境界にCIPの外周端部が存在 するが、UIS内部に向かう流れによって CIPの外周部が低温流体に晒され、温度変動強度が高くなっ ていることが温度変動強度分布からも分かる。

構造物である CIP 外周部に近い位置で最も変動強度が高くなる点を含むのは 240°の計測線であ り、図 3.8 に 240°計測線に沿った時間平均温度分布と変動強度分布を示す。温度勾配の高い位置 で変動強度は大きくなり、その変動強度値は 0.3 程度となるが、ブランケット集合体周辺の温度変動強 度は制御棒チャンネル周辺に比較して変動強度がより大きくなっているため、対策構造の提案を含め て別途試験を実施する予定である。

3.2 温度変動緩和方策に対する試験結果

図 3.9 に設計体系と温度変動緩和方策を比較した結果を示す。緩和方策については計測した計測線の内、最も変動強度が高くなる点を含む計測線の結果を示している。

緩和方策における主炉停止系および後備炉停止系制御棒周辺での温度分布は、ほぼ平坦となる結果が得られた。緩和方策に対する流動可視化試験によって CIP 下面に低温流体が到達しなくなったために温度低下が生じなくなったことを確認した。

主炉停止系制御棒周辺では、低温流体と高温流体が混合する領域において、温度変動強度が増加 しているが、その大きさは設計体系に比べて 1/10 以下であり、大幅に温度変動強度が減少していること から、緩和方策は制御棒周辺の温度変動を緩和させる効果があることが分かった。

4. 考察

4.1 主炉停止系制御棒周辺の温度変動緩和方策の効果

設計体系との比較試験より、温度変動緩和方策は温度変動を大幅に減少させる効果があることが認められた。図 4.1 にその理由を示す。

方策(1)によって、低温流体の流速が低下し、低温流体の CIP への到達が抑制された。

方策(2)によって、制御棒案内管内部に下降流を発生し、その下降流によって、制御棒からの低温流 を上から抑えつけ、CIP が低温流体に晒されないようになった。なお、制御棒案内管内部に下降流が発 生するのは、第1バッフル板によってフローホール付近の圧力が上昇するためであると考えられる。

方策(3)によって、ハンドリングヘッド出口から CIP までの距離が広がり、低温流体が CIP へ到達するのが抑制された。

これら温度変動強度が減少する理由の内、方策(2)の効果は大山ら^[10]により数値シミュレーションによっても予測されている。

図4.2に、最大変動強度点における温度時系列とPSDを示す。なお、温度は式(3.2)に基づき規格化した。以下に示す実機と試験体のタイムスケール比t_Rはほぼ1である。

$$t_{R} = \frac{L_{\text{Re actor}}}{L_{Model}} \bullet \frac{V_{Model}}{V_{\text{Re actor}}}$$
(4.1)

時系列データは最も温度変動が大きくなった10秒間について示した。また、PSD は収録した600秒間の データすべてを対象に FFT を施している。設計体系では高低温の温度差の約90%の振幅で温度変動 が生じている一方、緩和方策では20%程度の振幅まで減少していることが分かる。PSD についても、全 周波数領域に亘りパワーが減少していることが分かる。

4.2 後備炉停止系制御棒周辺の温度変動緩和方策の効果

後備炉停止系制御棒周辺の温度変動緩和効果について図 4.3 に示す。後備炉停止系については制 御棒案内管が CIP 上部に存在しないため、方策(3)のみの適用となるが、可視化試験で確認したように、 CIP 上部からフロー孔に向かう下降流が存在し、低温流体の上昇を妨げている。この下降流とあいまって CIP とハンドリングヘッド間距離を拡大することにより、低温流体の CIP への到達が抑制されたと考えられ る。

図4.4に最大変動強度点における温度時系列とPSDを示す。主炉停止系のケースと同様に、時系列データは最も温度変動が大きくなった10秒間について示した。PSDは収録した600秒間のデータすべてを対象にFFTを施している。設計体系では高低温の温度差の約100%の振幅で温度変動が生じているが、緩和方策では大幅に振幅が減少していることが確認された。

構造材の厚みや材質にも依存するが、おおむね流体側の 0.02~数 Hz の中間周波数帯域の温度変動が、構造材の熱応力に変換され易いことが知られている^[11]。図 4.2 および図 4.4 に示した通り、中間周

波領域において、緩和方策では主炉停止系・後備炉停止系ともに設計体系に比べてパワースペクトルが 低く、緩和方策は高サイクル熱疲労に対して高い抑制効果があると考えられる。

5. 結論

ナトリウム冷却大型炉 JSFR の UIS 下部における高サイクル熱疲労を評価するために、1/3 スケール 60° セクタモデルを用いた水流動試験を実施した。制御棒チャンネル並びにブランケット集合体周辺の 温度分布計測を実施し、その流動状況の把握と温度変動の特徴が得られた。さらに、制御棒チャンネル 近傍の温度変動を緩和させる方策を考案し、その体系についても温度分布の計測を行い、温度変動強 度および PSD について設計体系との比較を行った。

比較の結果、温度変動緩和方策は、温度変動強度と温度変動振幅を減少させる効果があることが確認された。

今後、温度変動緩和方策における主炉停止系・後備炉停止系周辺の詳細計測を実施するとともに、 ブランケット集合体周辺における温度変動緩和方策を考案し、その効果を確認していく予定である。

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ならびに常陽産業株式会社の試験・運転員の方々に多大なご協力を頂きました。また、試験データの整理をおいて株式会社 NESI の川島滋代氏他、業務協力員の方々多大なご協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

[1] Kotake, S. et al. (2010). "Development of Advanced Loop-Type Fast Reactor in Japan", Nuclear Technology, Vol.170, pp.133-147.

[2] Shimakawa, Y. et al. (2002). "Innovative Concept of the Sodium-cooled reactor to persue high economic competitiveness", Nuclear Technology, Vol.140, pp.1–17.

[3] Kimura, N. et al. (1998). "An Investigation on Convective Mixing of Two Buoyant, Quasi-Planar Jets with a Non-Buoyant Jet in-Between by Ultrasound Doppler Velocimetry", Proc. of ICONE-6, ICONE-6058.

[4] Kimura, N. et al. (1999). "A Comparison of Experimental and Numerical Results on Convective Thermal Mixing of Three Vertical, Quasi-Planar Jets", Proc. of 5th ASME/JSME Joint Thermal Engineering Conference.

[5] Moriya, S. et al. (1988). "Thermal Striping in Co-Axial Jets of Sodium, Water and Air", Forth Int. Conf. on Liquid Metal Thermal Hydraulics, Avignon, France

[6] Kimura, N. et al. (2005). "Study on Convective Mixing Phenomena in Parallel Triple-Jet along Wall - Comparison of Temperature Fluctuation Characteristics between Sodium and Water -", Proc. of NURETH-11, 427.

[7] Kimura, N. et al. (2007). "Experimental Investigation on Transfer Characteristics of Temperature fluctuation from liquid sodium to wall in parallel triple-jet", Int. J. Heat Mass Transfer, 50, pp.2024–2036.

[8] 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 現象に関する実験研究一切込みつき UIS の影響と温度勾配緩和方策一、JAEA-Research 2009-026(2009)

[9] 管路・ダクトの流体抵抗出版分科会編、「技術資料 管路・ダクトの流体抵抗」、社団法人 日本機械 学会、1979、269p.

[10] Ohyama, K. et al. (2009). "Conceptual Design for Japan Sodium-Cooled Fast Reactor(2): Thermal-Hydraulic Design and Analysis for Reactor Upper Plenum", Proc. Of ICAPP'09-9296.

[11] Kasahara, N. et al. (2005). "Thermal Fatigue Evaluation Method Based On Power Spectrum Density Functions Against Fluid Temperature Fluctuation", Proc. of PVP2005, PVP2005–71307.

表2.1 試験条件

1. 制御棒チャンネル周辺温度計測試験

	実機条件		試験条件				
	出口 温度	ハンドリング ヘッド部流速 V _R	出口 温度	ハンドリング ヘッド部流速 Vm	V _m /V _R	Re数	Ri数
	°C	m/s	°C	m/s	-	-	
燃料集合体 (内側炉心)	560	5.66	35	1.59	1/3.55	7.1 × 10 ⁴	
主炉停止系CR	500	1.17	20	0.33	1/3.55	3.7 × 10 ³	1.81 × 10 ⁻⁴
後備炉停止系 CR	500	0.22	20	0.06	1/3.55	1.7 × 10 ³	4.50×10^{-4}

※実機条件の燃料集合体等の出口温度は、平均的な代表温度として設定した。 ※主炉停止系計測時は、後備炉停止系流路およびブランケット流路を閉止 ※後備炉停止系計測時は、主炉停止系流路およびブランケット流路を閉止

2. ブランケットチャンネル周辺温度計測試験

	実機条件		試験条件				
	出口 温度	ハンドリング ヘッド部流速 V _R	出口 温度	ハンドリング ヘッド部流速 Vm	V _m /V _R	Re数	Ri数
	°C	m/s	°C	m/s	-	-	
燃料集合体 (外側炉心)	560	5.66	35	1.21	1/4.66	3.9 × 10 ⁴	
ブランケット 集合体	500	1.36	27	0.29	1/4.66	1.1 × 10 ³	1.04 × 10 ⁻³

※実機条件の燃料集合体等の出口温度は、平均的な代表温度として設定した。 ※主炉停止系・後備炉停止系流路およびブランケット7チャンネルを閉止



図2.1 試験体概要



図2.2 炉心配置およびCIP形状



図2.3 ハンドリングヘッド形状



図2.4 燃料集合体入口部多孔板形状および設置位置



図2.5 試験ループ構成



図2.6 計測対象チャンネルと計測領域



図2.7 制御棒チャンネル周辺計測用熱電対ツリー



図2.8 ブランケット集合体周辺計測用熱電対ツリー



図2.9 熱電対ツリー計測高さ





図2.10 温度変動緩和方策



図2.11 断面積を拡大した主炉停止系制御棒チャンネル形状



図2.12 フローホール付き制御棒案内管形状



図2.13 緩和方策適用体系における温度計測箇所



試験体上部からの撮影画像



試験体側面からの撮影画像

図3.1 主炉停止系制御棒チャンネル周辺可視化画像



試験体上部からの撮影画像



試験体側面からの撮影画像

図3.2 後備炉停止系制御棒チャンネル周辺可視化画像



図3.3 主炉停止系制御棒チャンネル周辺 時間平均温度分布と変動強度分布



図3.4 主炉停止系制御棒チャンネル周辺 最大変動強度発生計測線に沿った時間平均温度分布と変動強度分布



図3.5 後備炉停止系制御棒チャンネル周辺 時間平均温度分布と変動強度分布



制御棒駆動軸

図3.6 後備炉停止系制御棒チャンネル 最大変動強度発生計測線に沿った時間平均温度分布と変動強度分布



時間平均温度分布と変動強度分布



図3.8 ブランケット集合体周辺 最大変動強度発生計測線に沿った時間平均温度分布と変動強度分布



図3.9 設計体系と緩和方策の温度とRMSの径方向分布の比較



図4.1 主炉停止系温度変動緩和効果







図4.3 後備炉停止系温度変動緩和効果



図4.4 後備炉停止系制御棒チャンネル 最大RMS点における温度時系列とPSD

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例 表1. SI 基本単位

甘木県	SI 基本ì	単位
基个里	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

	100		
组立量		SI 基本単位	
和立里		名称	記号
面	積	平方メートル	m ²
体	積五	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	毎メートル	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	積ゴ	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密	度フ	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強	さフ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) ,濃	度刊	モル毎立方メートル	mol/m ³

第一の「濃度」での「海」で「シートル」 mol/m³ 量濃度にの、濃度モル毎立方メートル mol/m³ 量濃度キログラム毎立法メートル g^{\dagger} かンデラ毎平方メートル cd/m^2 折率(b^{\dagger} (数字の) 1 1 透磁率(b^{\dagger} (数字の) 1 1 質 輝 屈 透磁 比

(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 組立単位	
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 角	ヨラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立 体 牟	コテラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 ^(b)	m ² /m ²
周 波 数	ベルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ^{'2}
圧力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー,仕事,熱量	ビュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	モワット	W	J/s	$m^2 kg s^{\cdot 3}$
電荷,電気量	ローロン	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	マアラド	F	C/V	$m^{2} kg^{1} s^{4} A^{2}$
電気抵抗	ī オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンフ	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁芽	ミウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンフ	、ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	モルシウス度 ^(e)	°C		K
光 東	モルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	レクス	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,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²
カーマ		сл <i>у</i>	0/11g	111 5
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	$m^2 s^2$
酸 素 活 相	カタール	kat		s ⁻¹ mol
				U 11101

(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

(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。
 (o)剤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)ヘルツは周期現象についてのみ、ベク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。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス選びを大しに使用される。セルシウス度とケルビンの 単位の大きさは同一である。したかって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば認った用語で"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	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 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 卒	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	グレイ毎秒	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}	ヨ タ	Y	10^{-1}	デシ	d		
10^{21}	ゼタ	Z	$10^{.2}$	センチ	с		
10^{18}	エクサ	Е	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	$10^{\cdot 12}$	ピョ	р		
10^{6}	メガ	М	$10^{.15}$	フェムト	f		
10^{3}	キロ	k	$10^{\cdot 18}$	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	У		

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, l	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³	
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$	

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの					
名称				記号	SI 単位で表される数値
電	子 オ	゛ル	Ч	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統-	一原子	質量単	〔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	_	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・	- 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	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s	
ネ		パ	Np	ロ光伝しの粉はめた眼接は	
ベ		ル	В	51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。	
デ	ジベ	ル	dB -	X19X ± 17 AC44 (* [X1])	

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			
エルク	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアフ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークフ	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルフ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd} \text{ cm}^{2} = 10^{4} \text{ cd} \text{ m}^{2}$			
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	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウジ	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			
 (a) 3 元 系のCCCS単位系とSIでけ直接比較できないため 年早 [▲ 					

3元系のCGS単位系とSI Cは は対応関係を示すものである。

	表10. SIに属さないその他の単位の例						
	3	名利	К		記号	SI 単位で表される数値	
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq	
ν	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy	
ν				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv	
ガ		$\boldsymbol{\nu}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T	
フ	r		ル	i.		1フェルミ=1 fm=10-15m	
メー	ートル	系	カラッ	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	Ц		IJ	_	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)	
ŝ	ク			\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$	

この印刷物は再生紙を使用しています