JAEA-Technology 2013-001



高温工学試験研究炉(HTTR)の温度係数測定試験

―原子炉出力 9MW 及び 30kW の温度係数の燃焼度依存性―

Temperature Coefficient Measurement Test of HTTR

- Burn-up Characteristic of Temperature Coefficients at Reactor Power 30kW and 9MW -

小野 正人 後藤 実 篠原 正憲 野尻 直喜 栃尾 大輔 島崎 洋祐 柳 俊樹

Masato ONO, Minoru GOTO, Masanori SHINOHARA, Naoki NOJIRI Daisuke TOCHIO, Yosuke SHIMAZAKI and Shunki YANAGI

> 大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部

Department of HTTR Oarai Research and Development Center

March 2013

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, 2013

JAEA-Technology 2013-001

高温工学試験研究炉(HTTR)の温度係数測定試験

一原子炉出力 9MW 及び 30kW の温度係数の燃焼度依存性-

日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部 小野 正人・後藤 実⁺・篠原 正憲・野尻 直喜 栃尾 大輔・島崎 洋祐・柳 俊樹[※]

(2013年1月11日受理)

HTTR では温度係数を測定するために、燃焼初期の平成11年及び平成12年に原子炉出力 30kW 及び9MW で温度係数測定試験を行った。その後、各種運転に伴い燃焼日数は設計寿 命 660日の半分を過ぎた約375日となった。そこで、温度係数の燃焼度依存性を評価するため に、同出力で温度係数測定試験を行った。その結果を燃焼初期のデータと比較し、温度係数の 燃焼特性を明らかにした。また、高い精度で温度係数を測定するために、炉心温度の制御の手 法及び炉心温度の静定確認の手法を確立した。

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 +原子力水素・熱利用研究センター ※技術開発協力員 JAEA-Technology 2013-001

Temperature Coefficient Measurement Test of HTTR

- Burn-up Characteristic of Temperature Coefficients at Reactor Power 30kW and 9MW -

Masato ONO, Minoru GOTO⁺, Masanori SHINOHARA, Naoki NOJIRI Daisuke TOCHIO, Yosuke SHIMAZAKI and Shunki YANAGI^{*}

> Department of HTTR Oarai Research and Development Center Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

> > (Received January 11, 2013)

The temperature coefficient measurements of the HTTR have been carried out. In the beginning of the operation, temperature coefficients at the reactor power of 30kW and 9MW were obtained through 1999 to 2000. The operation days of the HTTR fuel reached 375 Effective Full Power Days (EFPD), which is over a half of design operation days (660EFPD). The temperature coefficient measurements were conducted at the same power levels of 30kW and 9MW to evaluate burnup effect. Also, to measure temperature coefficient in high accuracy, technique of core temperature control and technique of static core temperature confirmation were established.

Keywords : HTTR, Temperature Coefficient, Burnup Effect, Technique

目次

1.	はじ	めに				
2.	HTTR の概要					
	2.1	原子炉				
	2.2	燃料				
	2.3	冷却設備				
		2.3.1 加圧水冷却設備				
		2.3.2 加圧水空気冷却器				
	2.4	原子炉制御設備				
		2.4.1 原子炉入口温度制御系				
	2.5	制御棒				
3.	温度	ξ係数測定試験				
	3.1	試験目的				
	3.2	試験内容				
		3.2.1 原子炉出力 9MW での温度係数測定試験				
		3.2.2 原子炉出力 30kW での温度係数測定試験				
	3.3	温度係数の評価方法				
	3.4	温度制御の手法の確立				
		3.4.1 原子炉出力 9MW での温度係数測定試験				
		3.4.2 原子炉出力 30kW での温度係数測定試験				
	3.5	データ取得時の炉心温度の静定確認の手法の確立16				
		3.5.1 過去の炉心温度の静定確認の手法				
		3.5.2 新たな炉心温度の静定確認の手法				
		3.5.3 炉心温度の静定確認の手法と実施結果16				
	3.6	試験履歴				
		3.6.1 原子炉出力 9MW での温度係数測定試験				
		3.6.2 原子炉出力 30kW での温度係数測定試験				
4.	温度	を係数				
	4.1	評価方法				
	4.2	計算方法				
	4.3	結果				
5.	まと	め				
謝話	辛					
参考	与文南	犬				

Contents

1.	Intr	oduction	n1				
2.	Outline of HTTR Facility ·····2						
	2.1 Reactor						
	2.2	2.2 Fuel					
	2.3	ing System ······2					
		2.3.1	Pressurized Water Cooling System ······2				
		2.3.2	Pressurized Water Air-cooler				
	2.4	React	tor Control System ······3				
		2.4.1	Reactor Inlet Temperature Control System ······3				
	2.5	Conti	rol Rod ······3				
3.	Tem	peratur	e Coefficient Measurement Tests				
	3.1	Test l	Purposes ······ 12				
	3.2	Test (Contents ······ 12				
		3.2.1	Test at Reactor Power 9MW ····· 12				
		3.2.2	Test at Reactor Power 30kW ······ 12				
	3.3 Evaluation Procedure of Temperature Coefficient						
	3.4	Estab	lishment of Temperature Control Technique				
		3.4.1	Test at Reactor Power 9MW ····· 12				
		3.4.2	Test at Reactor Power 30kW······14				
	3.5	Estab	lishment of Static Core Temperature Confirmation Technique				
		3.5.1	Past Technique of Core Temperature Confirmation16				
		3.5.2	New Technique of Core Temperature Confirmation				
		3.5.3	Results of Core Temperature Confirmation16				
	3.6	Tests	Histories 16				
		3.6.1	Test at Reactor Power 9MW ······16				
		3.6.2	Test at Reactor Power 30kW ······ 17				
4.	Tem	peratur	e Coefficient 32				
	4.1 Evaluation Procedure						
	4.2	Calcu	alation Procedure				
	4.3 Results						
5.	Con	clusion					
Ack	Acknowledgements 34						
Ref	erenc	es ·····					

1. はじめに

日本原子力研究開発機構のHTTR(高温工学試験研究炉:High Temperature Engineering Test Reactor)は、高温ガス炉技術基盤の確立と高度化を目的として大洗研究開発センターに建設された日本初の高温ガス炉である^{1),2)}。HTTRの主要諸元を第1-1表に示す。現在、HTTRでは、高温ガス炉固有の安全性を実証するための安全性実証試験を行っている。^{3),4),5),6)}。

HTTR では温度係数を評価するために、燃焼初期の平成11年及び平成12年に原子炉出力 30kW 及び 9MW で、出力上昇試験項目の一つとして温度係数測定試験を行った⁷⁾。その後、 各種運転に伴い EFPD(燃焼日数:Effective Full Power Days)は、炉心寿命 660 日の半分を過 ぎた約 375 日となった。そこで、温度係数の燃焼度依存性を評価するために、平成22年度に実 施した第 12 サイクル運転(以下、「RS-12」という。)及び第 13 サイクル運転(以下、「RS-13」とい う。)に、同出力で温度係数測定試験を行った。その結果を燃焼初期のデータと比較し、温度係 数の燃焼特性を明らかにした。

高い精度で温度係数を測定するためには、温度変更前後に十分な温度差があること及び制 御棒位置の測定時に炉心温度が静定していつ必要があり、そのために通常の運転には無い手 法を行わなければならない。1つ目の手法は、炉心温度を制御するための手法で、一定の原子 炉出力で炉心温度を上昇・静定・下降させるものである。2つ目の手法は、炉心温度の静定を確 認するための手法で、制御棒位置の測定時に、炉心温度が静定していることを確認するものであ る。HTTRでは、原子炉出力 9MW 及び 30kW での温度係数測定試験を安全・確実かつ高い精 度で試験を実施するために、過去の炉心温度の制御手法及び炉心温度の静定確認の手法を 参考にし、新たに手法を確立した。

本報では、温度係数の燃焼度依存性及び確立した手法について報告する。

熱出力	約 30 MW
ウラン濃縮度	3-10% (平均約 6%)
燃料	UO ₂ 被覆粒子 / 黒鉛分散型
炉心構造材	黒鉛
冷却材	ヘリウムガス
原子炉入口冷却材温度	395°C
原子炉出口冷却材温度	定格運転 850℃ /高温試験運転 950℃

第1-1表 HTTR の主要諸元

2. HTTR の概要

2.1 原子炉

HTTR の炉心は、4 種類の黒鉛製ブロック(燃料ブロック(燃料体)、制御棒案内ブロック、照射ブロック及び反射体ブロック)を柱状に積み上げて構成され、その周囲は黒鉛性の固定反射体で囲まれている。HTTRの原子炉構造図を第2.1-1 図に示す。

1次冷却材は、炉心下部の二重配管の内管と外管との間の環状部から圧力容器内に流入する。 流入した1次冷却材は、まず炉心下部の鋼構造物を冷却し、その後、炉心側部に流れ、さらに固定 反射体と圧力容器の間を上方へ流れて上部プレナムに至り、上部プレナムで反転し、炉心に流入す る。炉心で加熱された冷却材は、高温プレナムを通り、二重管内管から圧力容器外部へ流れ出る。

HTTR の特徴のひとつとして、炉心内の冷却材の入口温度と出口温度の温度差が大きいこと が挙げられ、原子炉出力約 30MW において、原子炉入口冷却材温度が約 400℃、出口冷却材温度 が約 950℃となる。

2.2 燃料

HTTRの炉心には、150体の燃料ブロックが装荷されており、燃料ブロックは黒鉛ブロック の冷却材流路に燃料棒を挿入した構造である。燃料棒は、燃料棒と燃料棒挿入孔との間を下向 きに流れる冷却材により除熱される。HTTRの燃料体の概要を第2.2-1 図に示す。燃料棒は、 黒鉛スリーブに燃料コンパクトを充填した構造で、燃料コンパクトは被覆燃料粒子が充填され ている(第2.2-1図参照)。被覆燃料粒子は、燃料核を熱分解炭素等で四重に被覆し、これに より燃料粒子自体が核分裂生成物の放出を防ぐ機能を有している。燃料核は、直径約0.60mm の低濃縮二酸化ウランで、濃縮度は3~10%(平均約6%)である。

2.3 冷却設備

HTTRの冷却系統を第2.3-1図に示す。HTTRの原子炉冷却設備は、通常運転時に原子炉を冷却 する主冷却設備が設置され、主冷却設備はIHX(中間熱交換器:Intermediate Heat Exchanger)と PPWC(1次加圧水冷却器:Primary Pressurized Water Cooler)の2種類の熱交換器を並列に配置し ており、IHXの2次側にSPWC(2次加圧水冷却器:Secondary Pressurized Water Cooler)を配置して いる。原子炉内で発生した熱は、これらの熱交換器を経由して最終的に加圧水冷却設備に設置され ているACL(加圧水空気冷却器:Air Cooler)より大気へ放散する。

2.3.1 加圧水冷却設備

加圧水冷却設備の設計仕様を第 2.3.1-1 表に、概要図を第 2.3.1-1 図に示す。本設備は、 PPWC 及び SPWC に加圧水を循環させることにより1次冷却材及び2次冷却材(ヘリウムガス) を冷却した後、その熱を ACL で大気に放散する設備である。

PPWC、SPWC で受熱した加圧水は、加圧水の圧力を調整する加圧水加圧器に送られる。 その後、加圧水はACL及びACLバイパス配管に分岐される。ACLに流入する加圧水流量は、 加圧水温度の制御を目的として空気冷却器出口流量調節弁とバイパス流量調整弁により調 整されている。ACLで冷却された加圧水は、ACLとバイパスされた加圧水と合流した後に加圧 水循環ポンプで昇圧され、再び PPWC、SPWC に送られる。 2.3.2 加圧水空気冷却器

ACLの設計仕様を第2.3.2-1表に、構造図を第2.3.2-1図に示す。ACLは、原子炉建家の 屋上に設置されており、加圧水の熱を大気に放散する設備である。

PPWC、SPWCより送られてきた高温の加圧水はACLの入口ヘッダで各伝熱管に分配され、 伝熱管内を流れていく。この際、加圧水はファンにより送風された空気によって冷却され、ACL 出口ヘッダに至る。一方、空気は加圧水より熱を受けて高温になり、上方へ抜けて大気へと放 散される。空気風量については、ファンブレードの角度を変化させることで調整することができ る。なお、ファンブレード角度調整圧がObarのときにファンブレード角度が最大となり、ACL に 送り込む空気風量が最大風量となる。一方、1barのときにはファンブレード角度が最小となり ACL に送り込まれる空気風量は最小風量となるように設計されている。

2.4 原子炉制御設備

HTTRの原子炉制御設備²⁾は、原子炉の原子炉出力、原子炉出口冷却材温度、原子炉入口冷却材温度、1次冷却材流量等を制御するもので、運転モード選択装置、原子炉出力制御装置、 プラント制御装置から構成する。HTTRの制御上の特徴⁸⁾を踏まえて、原子炉制御設備に原子 炉出力制御系、原子炉入口温度制御系、加圧水温度制御系等の制御系がある。HTTRの制御設 備の構成を第2.4-1図に示す。

2.4.1 原子炉入口温度制御系

原子炉入口温度制御系は、加圧水温度制御系の上位の制御系であり、加圧水温度を調節することによって原子炉入口冷却材温度を設定値に制御するものである。加圧水温度制御系は、ACLの空気冷却器出口流量調節弁及びバイパス流量調節弁の開度を調節することにより、 PPWC及びSPWCの入口加圧水温度を原子炉入口温度制御系から与えられた設定値に制御する。原子炉入口温度制御系は、原子炉出力30%から100%の範囲で自動制御が可能となる。

原子炉入口温度は、通常の運転時に原子炉入口温度制御系の働きにより、原子炉出力30%で180℃、原子炉出力100%で395℃を保持することが可能となる。

2.5 制御棒

原子炉の出力制御は、制御棒の引抜・挿入により行う。制御棒は、制御棒案内ブロックに設 けた制御棒挿入孔内を制御棒駆動装置により上下に移動し、総数16対で構成される。7対の制 御棒は燃料領域に挿入され、9対の制御棒が可動反射体領域に挿入される。通常運転中は、炉 心の水平方向の出力分布を乱さないために、最外周の3対の制御棒は全引き抜き状態とし、そ れ以外の制御棒は同じ高さに揃えられる。制御棒の配置を第2.5-1図に示す。

制御棒を自動制御(原子炉出力30%以上で自動制御可能)とする場合には、中性子東レベル (原子炉出力)が設定した原子炉出力値になるように、制御棒駆動制御装置は原子炉出力制御 系の信号を受け、自動制御対象としている13対の制御棒位置を同じレベルに保ちつつ、1対ず つ引抜・挿入を行う。

系統数	1ループ
熱移送量	30MW
運転圧力	3.5MPa
最高使用圧力	4.8MPa
最高使用温度	262°C
加圧水流量	(単独運転)
	1次加圧水冷却器:625t/h/618t/h ※
	(並列運転)
	1次加圧水冷却器 : 413t/h/410t/h ※
	2次加圧水冷却器:216t/h/208t/h ※

第2.3.1-1表 加圧水冷却設備の設計仕様

* 定格運転/高温試験運転

型式	強制押込通風式フィン付伝熱管型	
交換熱量	30MW	
最高使用圧力	4.8MPa	
最高使用温度	262°C	
加圧水流量(最大)	640t/h	
空気風量(最大)	2600t/h	
空気入口温度	80°C	
空気出口温度	40°C	
伝熱管	(外径) 25.4mm	
	(厚さ) 2.77mm	
材質	(伝熱管) 炭素鋼	
	(フィン) アルミニウム	
	(ヘッダ) 炭素鋼	
ファン型式	軸流可変ピッチファン	
ファン台数	6台	

第2.3.2-1表 加圧水空気冷却器の設計仕様



第 2.1-1 図 HTTRの原子炉構造図



第2.2-1 図 HTTRの燃料体の概要



第 2.3-1 図 HTTRの冷却系統



第2.3.1-1図 加圧水冷却設備の概要図



第 2.3.2-1 図 ACL の構造図



第 2.4-1 図 HTTR の制御設備の構成



第2.5-1図 制御棒の配置

3. 温度係数測定試験

3.1 試験目的

EFPD が炉心寿命 660 日の半分を過ぎた約 375 日における、原子炉出力 9MW(30%)及び 30kW(0.1%)での炉心の温度係数を求め、燃焼初期のデータと比較することにより温度係数の 燃焼特性を明らかにする。

3.2 試験内容

3.2.1 原子炉出力 9MW での温度係数測定試験

原子炉出力を 30%で一定に保ちつつ炉心温度を上昇させ、温度変更前後の制御棒位置 を測定し、温度係数を評価する。ここで、炉心温度を側部遮へい体上部の内面と外面の冷却 材温度及び高温プレナム部冷却材温度の平均温度とする。また、制御棒位置は、R3 制御棒 を全引き抜きとし、C,R1及びR2制御棒位置の差を±2mm以内でそろえた状態(以下、この状 態を「FS パターン」と称する。)で測定する(第 2.5-1 図参照)。圧力容器内での温度測定部の 概念図を第 3.2.1-1 図、試験実施フロー図を第 3.2.1-2 図に示す。

3.2.2 原子炉出力 30kW での温度係数測定試験

原子炉をガス循環機等からの入熱で炉心温度を上昇させ、温度変更前後の原子炉出力 30kW での制御棒位置を測定し、温度係数を評価する。試験実施フロー図を第 3.2.2-1 図に 示す。

3.3 温度係数の評価方法

温度係数は、温度変更前後の制御棒位置と制御棒反応度価値曲線から温度変化による反応度の変化量を求め、これを温度差で除することにより求める。詳細な方法は、次節に示す。

3.4 温度制御の手法の確立

HTTR では、過去の手法を参考にして、より効率的に炉心温度を制御し、温度係数を高い精度で評価するための手法を確立した。

- 3.4.1 原子炉出力 9MW での温度係数測定試験
 - I. 過去の温度制御の手法

燃焼初期の原子炉出力 9MW での温度係数測定試験は、平成12年5月に行われており、 当時の温度制御の手法は以下の通りであった。なお、温度制御は、温度上昇、温度静定、 温度下降の順に行っている。

- 1. 温度上昇における手法
 - 1-A 炉心温度を上昇させるために、加圧水温度制御系によりACL 流量調整弁の開度を操作する。
- 2. 温度静定における手法
 - 2-A 炉心温度を静定させるために、原子炉入口温度が目標値に達した後、原子炉 入口温度制御系により入口温度を静定させる。

- 3. 温度下降における手法
 - 3-A 炉心温度を下降させるために、加圧水温度制御系によりACL 流量調整弁の開度を操作する。
- 4. 試験中を通して行う手法
 - 4-A 炉心温度を調整して制御目標値に到達するために、適宜、ACL のファンの起動台数を操作する。
 - 4-B 原子炉出力 30%を維持するために、適宜、手動により制御棒を操作する。

1-A 及び 3-A の手法では加圧水温度制御系を操作し、2-A の手法では原子炉入口温度 制御系を操作しており、これらの制御系の関係は加圧水温度制御系が原子炉入口温度制 御系の下位の制御系となる。つまり、加圧水温度制御系は原子炉入口温度制御系から与 えられた設定値に制御するものであるため、原子炉入口温度制御系を操作するだけで炉心 温度を制御できる。

4-A の手法では、ACL のファンの運転台数は操作しているものの ACL のファンブレード の角度は操作していなかった。そのため、ACL の除熱量の細かな調整をすることが困難で あった。

4-B の手法は、制御棒を手動操作することで原子炉出力を一定に保つものである。しかし ながら、手動による大幅な制御棒操作は急激な温度変化を招く原因となる。

Ⅱ. 新たな温度制御の手法

過去の手法を参考にして、新たに温度制御の手法を確立した。その手法は以下の通りで ある。

- 1. 温度上昇・静定・下降における手法
 - 1-A 炉心温度を上昇・静定・下降させるために、原子炉入口温度制御系により原子 炉入口温度を目標値に制御する。ただし、昇温速度・降温速度が 35℃/h を超 えないように少しずつ設定値を変更する。
- 2. 試験中を通して行う手法
 - 2-A 炉心温度を調整して制御目標値に到達するために、適宜、加圧水空気冷却器 のファンの運転台数及びファンブレード角度を操作する。
 - 2-B 原子炉出力 30%を維持するために、原子炉出力制御系により、自動的に制御 棒を操作する。
 - 2-C 温度制御を容易にするために、昼間に原子炉入口冷却材温度を上昇・静定させる。

1-A の手法は、加圧水温度制御系の操作を省き、原子炉入口温度制御系により ACL の 除熱量を調節するものである。

2-A の手法は、ファンブレードの角度の操作を加え、ACL の除熱量の細かな調節を可能にするものである。

2-B の手法は、制御棒を手動操作ではなく、原子炉出力制御系により制御棒を操作する ことで急激な温度変化を避けるものである。 2-Cの手法は、ACLは外気温度の影響を受けやすいため⁹⁾、昼間に温度を上昇・静定することで、夜間の外気温度が下がることによる ACL の除熱量の変動を避け、温度制御を容易にするものである。

Ⅲ. 温度制御の手法の実施結果

前回と今回の試験の手法を比較するために、原子炉入口温度と入口温度制御目標値を 第3.4.1.3-1 図及び第3.4.1.3-2 図に示す。前回の手法では、下位の制御系である加圧水温 度制御系を操作し入口温度を上昇させた後、上位の制御系である原子炉入口温度制御系 を操作し入口温度を静定している。一方、今回の手法では、上位の制御系である原子炉入 口温度制御系を操作し入口温度を上昇・静定させている。このため、今回の試験では初期 の入口温度が約5℃高いものの、温度上昇時間を約1時間短縮し、温度静定の時間を長く することを可能にした。

前回と今回の炉心温度を第3.4.1.3-3 図に示す。前回の試験では、制御棒を手動で操作 するため大幅な制御棒操作により急激に炉心温度の変化している。一方、今回の試験では、 原子炉出力制御系で制御棒を操作しているため炉心温度は穏やかな変化となっている。こ れらの比較から、今回の試験では、前回の試験と比べて、炉心温度が効率的に制御されて いることが分かる。

- 3.4.2 原子炉出力 30kW での温度係数測定試験
 - I. 過去の温度制御の手法

燃焼初期の原子炉出力 30kW での温度係数測定試験は、平成11年9月に行われており、 当時の温度制御の手法は以下の通りであった。

- 1. 温度上昇における手法
 - 1-A 炉心温度を上昇させるために、ガス循環機及び加圧水循環ポンプからの入熱 で冷却材を昇温させる。
 - 1-B 炉心温度を上昇させるために、加圧水冷却設備のバイパス流量調節弁の開度 を全閉とする。
- 2. 温度静定・下降における手法
 - 2-A 炉心温度を静定・下降させるために、加圧水冷却設備のバイパス流量調節弁の開度を調整開とする。

1-Aの手法は、核熱に依らず炉心を昇温するものである。

1-B 及び 2-A の手法は、ACL の除熱量を調整することで炉心温度を制御するものである。

この手法により、昇温時間は入口冷却材温度の目標値まで 30 時間かかっている。ACL の除熱量は外気温度に影響を受けやすく⁹、外気温度が低下している場合、温度上昇の時間はさらに長くかかると考えられる。

Ⅱ. 新たな温度制御の手法

過去の手法を参考にして、新たに温度制御の手法を確立した。その手法は以下の通りで

ある。

- 1. 温度上昇における手法
 - 1-A 炉心温度を上昇させるために、ガス循環機及び加圧水循環ポンプからの入熱 で冷却材を昇温させる。
 - 1-B 炉心温度を上昇させるために、加圧水冷却設備のバイパス流量調節弁の開度 を全閉とする。
- 2. 温度静定・下降における手法
 - 2-A 炉心温度を静定・下降させるために、加圧水冷却設備のバイパス流量調節弁の開度を調整開とする。
- 3. 試験中を通して行う手法
 - 3-A 温度上昇開始36時間後に入口冷却材温度が目標値に到達しない場合、36時 間をもって温度静定操作を開始し、その状態を3時間以上保持する。

1-A、1-B 及び 2-A の手法は、前回の温度制御の手法と同じである。

3-A の手法は、外気温度が低い場合に温度上昇の時間が長くなるため、入口温度の目標値を設定せずに、温度上昇を終了する時間を設定した。

Ⅲ. 温度制御の手法の実施結果

今回の温度制御の手法を用いた結果として、温度制御を温度上昇・静定・下降の3ステップに分類し、各ステップの原子炉入口冷却材温度及び加圧水入口温度を第3.4.2.3-1図から第3.4.2.3-3図に示す。

第 3.4.2.3-1 図から、温度上昇のステップでは、バイパス流量調節弁を全閉にし、加圧水 が空気冷却器で冷却されないことで加圧水温度が上昇し、それに伴い原子炉入口冷却材 温度も上昇していることが分かる。

第 3.4.2.3-2 図から、温度静定のステップでは、バイパス流量調節弁を微開にし、ACL の 除熱量を調節することで原子炉入口冷却材温度が静定していることが分かる。

第 3.4.2.3-3 図から、温度下降のステップでは、バイパス流量調節弁を開にし、ACL の除熱により原子炉入口冷却材温度を下降していることが分かる

以上から、炉心温度は確立した手法により適切に制御されていることが分かる。

(補足事項)

前回と今回の試験で温度制御の手法に大きな違いは無かったにも関わらず、今回の試験は前回の試験に比べ、温度変化量が小さく、温度上昇に時間が長くかかった。前回と今回の試験の原子炉入口冷却材温度を第3.4.2.4-1 図に示す。図から、今回の試験の方が、入口温度は穏やかに上昇していることが分かる。それらの原因として、今回の試験でのガス 循環機の回転数が低かったことが考えられる。前回と今回のガス循環機の回転数を第 3.4.2.4-2 図に示す。図から、今回の試験の方が、回転数は約500rpm少ないことが分かる。 回転数は、冷却材流量が一定になるように冷却材流量制御により制御され、圧力やフィルタ 差圧等の影響を受ける。今回の試験は前回の試験に比べ、圧力が低くフィルタ差圧が高かった(第3.4.2.4-3 図及び第3.4.2.4-4 図参照)。 3.5 データ取得時の炉心温度の静定確認の手法の確立

HTTR では、温度係数を高い精度で評価するために、制御棒位置の測定は炉心温度が静定 した状態で行わなければならない。そのために、過去の手法を参考にして、新たに炉心温度の静 定確認の手法を確立した。

- 3.5.1 過去の炉心温度の静定確認の手法
 - データ取得時に炉心温度の静定を確認するために、以下の手法を行った。
 - 原子炉入口冷却材温度が制御目標値に到達してから、入口温度を2時間以上保持させる。

①の手法は、データ取得時に炉心温度を静定させるものであり、保持時間が長いほど炉心 温度は静定する。

3.5.2 新たな炉心温度の静定確認の手法

過去の手法を参考にして、新たに炉心温度の静定確認の手法を確立した。その手法は以下の通りである。

- 原子炉入口冷却材温度が制御目標値に到達してから、入口温度を3時間以上保 持させる。
- ② 試験中の炉心温度を監視し、炉心温度が変動幅±1℃以内で静定していることを 確認する。

①の手法は、温度上昇の時間が想定よりも短いことから、入口温度の保持時間を延長し、 炉心温度をより静定させるものである。

②の手法は、炉心温度の静定の基準を明確にするものである。

3.5.3 炉心温度の静定確認の手法の実施結果

新たに確立した手法を用いた結果として、原子炉出力 9MW での温度係数測定試験の炉 心温度変化量を第3.5.3-1 図、原子炉出力30kW での温度係数測定試験の炉心温度変化量 を第3.5.3-2 図に示す。炉心温度変化量は炉心温度の10分間での変化量とする。同図から、 ①、②の手法により制御棒位置測定時の炉心温度が静定していることが分かる。

- 3.6 試験履歴
 - 3.6.1 原子炉出力 9MW での温度係数測定試験

RS-12 運転は 2010 年 12 月 13 日から 21 日にかけて行われ、12 月 18 日と19 日に温度係 数測定試験が行われた。

温度係数測定試験は18日8:49に開始し、原子炉入口冷却材温度を空気冷却器のファン ブレードの角度及び運転台数の調整により、約180℃から約210℃まで上昇させた。それに伴 い、炉心温度は約30℃上昇し、平均制御棒位置は約15mm引き抜かれたことを確認した。そ の後、初期状態への復旧を完了させ、19日9:54に試験を終了した。この間、原子炉出力は 30±0.5%で保持された。第 3.6.1-1 表に原子炉入口冷却材温度の時系列を、第 3.6.1-2 表に ファンの操作履歴を示す。

温度係数測定試験の原子炉出口冷却材温度、入口温度及び炉心温度を第3.6.1-1 図、平 均制御棒位置及び原子炉出力を第3.6.1-2 図に示す。また、第3.6.1-1 図に示す原子炉出口 冷却材温度、入口温度及び炉心温度の測定位置の概念図を第3.6.1-3 図に示す。第3.6.1-1 図の原子炉入口温度は、出口温度と比べて変化が急激である。これは、第3.6.1-3 図に示すよ うに、原子炉入口冷却材温度と出口温度は、1次冷却設備の高温二重配管の中間熱交換器 と1次加圧水冷却器との分岐点付近の冷却材温度である。そのため、炉心温度と比較すると 入口温度は下流側の影響を受けるため変化が急激となる。原子炉出口温度は、炉心の熱容 量の影響を受けるため、入口温度より変化が穏やかとなる。第3.6.1-2 図の原子炉出力は原子 炉出力制御装置により自動制御されており、温度上昇に伴う反応度低下により出力は一時的 に低下するものの、原子炉出力約30%を維持している。制御棒は制御棒駆動制御装置により 自動制御されており、出力設定値となるように引抜・挿入を行っている。

3.6.2 原子炉出力 30kW での温度係数測定試験

RS-13 運転は 2011 年 1 月 17 日から 1 月 24 日にかけて行われ、1 月 17 日から 20 日に温度係数測定試験が行われた。

温度係数測定試験は17日13:40に開始し、原子炉入口冷却材温度を静定した状態で制 御棒を引き抜きFSパターンで原子炉出力を30kWとした。つづいて、C制御棒を全挿入し未 臨界とした状態で、加圧水空気冷却器のバイパス流量を調整することで、原子炉入口冷却材 温度を約120℃から約135℃まで上昇させた。それに伴い、炉心温度は約15℃上昇した。その 後、手動により再びFSパターンで原子炉出力を30kWとし、平均制御棒位置は温度変更前と 比較して約13mm引き抜かれたことを確認した。その後、初期状態への復旧を完了させ、20日 9:06に試験を終了した。第3.6.2-1表に原子炉入口冷却材温度及び原子炉出力の時系列を 示す。

温度係数測定試験の原子炉出口冷却材温度、入口温度及び炉心温度を第3.6.2-1 図、平 均制御棒位置を第3.6.2-2 図に示す。第3.6.2-1 図の原子炉入口冷却材温度は、出口温度と 比べて高温である。これは、入口側でガス循環機及び加圧水循環ポンプからの入熱がなされ るためである。第3.6.2-2 図は、原子炉出力 30kW における炉心温度変更前後の平均制御棒 位置を示している。温度変更後の平均制御棒位置は、炉心温度上昇に伴う反応度低下のた め、変更前よりも多く引き抜かれている。

日時	原子炉入口冷却材温度
12/18 8:59	入口温度静定確認(約180℃)
9:03	温度上昇開始
12:44	210℃到達
18:34	入口温度静定確認(約210℃)
18:39	温度下降開始
21:44	約180℃到達
12/19 9:18	入口温度静定確認(約180℃)

第3.6.1-1 表 RS-12 運転における温度係数測定試験の 原子炉入口冷却材温度の時系列

時刻 ファン操作 ブレード角度 [bar] 備考 ファン(C)角度調整 0.075→0.1 温度上昇 12/18 9:42 ファン(F)停止 10:21 ファン(B)停止 10:35 ファン(D)停止 11:51 12:56 ファン(C)角度調整 $0.1 \rightarrow 0.085$ 温度静定 ファン(C)角度調整 14:05 0.085→0.1 14:30 ファン(C)角度調整 0.1→0.090 ファン(C)角度調整 14:43 0.090→0.085 14:53ファン(C)角度調整 $0.085 \rightarrow 0.075$ 14:58 ファン(A)角度調整 0.1→0.080 15:20 ファン(A)角度調整 0.080→0.1 17:00 ファン(A)角度調整 0.1→0.090 17:09 ファン(A)角度調整 0.090→0.095 ファン(A)角度調整 17:19 $0.095 \rightarrow 0.1$ ファン(C)角度調整 17:370.075→0.085 ファン(C)角度調整 17:58 $0.085 \rightarrow 0.075$ ファン(C)角度調整 18:22 0.075→0.085 ファン(D)起動 温度下降 18:58 ファン(B)起動 19:01 ファン(C)角度調整 19:10 0.085→0.1 20:31 ファン(F)起動 20:36 ファン(C)角度調整 0.1→0.090 20:41 ファン(C)角度調整 0.090→0.075 20:44 ファン(A)角度調整 0.1→0.090 ファン(A)角度調整 20:47 0.090→0.075 20:52 ファン(E)角度調整 0.1→0.075 ファン(E)角度調整 20:59 0.075→0.090 21:09 ファン(E)角度調整 $0.090 \rightarrow 0.1$ ファン(E)角度調整 21:37 0.1→0.090 23:00 ファン(E)角度調整 0.075→0.080 ファン(E)角度調整 0.080→0.085 23:11 23:19 ファン(E)角度調整 0.085→0.090 ファン(E)角度調整 23:37 0.090→0.095 ファン(E)角度調整 12/19_1:32 0.095→0.1 2:21ファン(A)角度調整 0.075→0.080 2:34 ファン(A)角度調整 0.080→0.090 3:51 ファン(A)角度調整 0.090→0.01

第3.6.1-2表 ファンの操作履歴

口時	原子炉入口冷却材温度及び		
口 时	原子炉出力		
1/17 13:44	入口温度静定確認(約120℃)		
14.11	原子炉出力 30kW		
14.11	入口温度静定確認(約120℃)		
14:22	温度上昇開始		
1/19 2:22	約 135℃到達		
9:40	入口温度静定確認(約135℃)		
10.54	原子炉出力 30kW		
10.34	入口温度静定確認(約135℃)		
11:05	温度下降開始		
1/20 8:58	入口温度静定確認(約120℃)		

第3.6.2-1 表 RS-13 運転における温度係数測定試験の 原子炉入口冷却材温度及び原子炉出力の時系列



第3.2.1-1図 炉心温度評価のための温度測定位置の概念図



第3.2.1-2 図 原子炉出力約30%における温度係数測定試験実施フロー図



第3.2.2-1 図 原子炉出力約0.1%における温度係数測定試験実施フロー図



原子炉入口冷却材温度及び原子炉入口温度制御目標値



第3.4.1.3-2 図 前回の9MW での温度係数測定試験における 原子炉入口冷却材温度及び原子炉入口温度制御目標値



第3.4.1.3-3 図 前回の今回の9MW での温度係数測定試験における炉心温度



第3.4.2.3-1 図 今回の30kW での温度係数測定試験における 原子炉入口冷却材温度と1次加圧水温度(温度上昇中)



第3.4.2.3-2 図 今回の30kW での温度係数測定試験における 原子炉入口冷却材温度と1次加圧水温度(温度静定中)

















- 27 -



第3.5.3-1図 原子炉出力 9MW での温度係数測定試験の炉心温度変化量



第3.5.3-2図 原子炉出力 30kW での温度係数測定試験の炉心温度変化量



第3.6.1-1 図 今回の9MW での温度係数測定試験における 原子炉出口冷却材温度、入口温度及び炉心温度



制御棒平均位置及び原子炉出力





第3.6.2-1 図 今回の30kWでの温度係数測定試験における 原子炉出口冷却材温度、入口温度及び炉心温度



平均制御棒位置

4. 温度係数

4.1 評価方法

HTTRの炉心燃焼計算から作成される試験実施時の燃焼日数での30kWおよび9MWの炉心の制 御棒価値曲線と、試験開始時および終了時の制御棒位置の測定値から反応度変化量を求める。こ の反応度変化量と、試験開始時と終了時の炉心の温度変化量から、以下の式により反応度温度係 数を評価する。炉心の温度変化量は、炉心入口及び出口の冷却材温度の測定値を用いて算出す る。

$TC = \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \times 100$						
$\Delta \rho = F(z_1) - F(z_0)$						
TC	:温度係数 (%Δk/k/K)					
Δho	:反応度変化量 (%Δk/k)					
ΔT	:温度変化量 (K)					
$\rho = F(z)$:制御棒価値曲線					
Z	:制御棒位置 (mm)					
Z_0	:試験開始時の制御棒位置 (mm)					
z_1	:試験終了時の制御棒位置 (mm)					

4.2 計算方法

HTTR の炉心燃焼計算¹⁰は、SRAC2006¹¹をベースにして、二重非均質効果を考慮した燃焼計算 が行えるように改造した計算コードを用いて行う。炉心燃焼計算の手順を第4.2-1 図に示す。まず、衝 突確率法に基づく SRAC/PIJ¹¹を用いて格子燃焼計算を行い、少数群(12 群)断面積セット¹²⁾を作成 する。次に作成した断面積セットと拡散法に基づく SRAC/COREBN¹¹⁾を用いて、制御棒位置を0 mm から2900 mmまで290 mm刻み(燃料ブロックの半分の高さ)で変えた炉心燃焼計算を行い実効増倍 率をそれぞれ算出する。これら実効増倍率と制御棒位置から、試験実施時の燃焼日数での30kW お よび 9MW 炉心の制御棒価値曲線をそれぞれ作成する。

30kW および 9MW の小数群断面積セットは、30MW の炉心温度条件での格子燃焼計算結果から 各燃焼ステップにおいてブランチオフ計算(燃料の組成は変えずに温度のみを変える計算)を行って 作成する。また、30kW および 9MW の実効増倍率は、30MW の炉心温度条件での炉心燃焼計算結 果から各燃焼ステップにおいてブランチオフ計算を行って算出する。

4.3 結果

燃焼初期に行われた 30kW、9MW、及び 20MW 炉心の温度係数測定試験の評価値^{7,12)}と今回の 試験の評価値を第4.3-1 図に示す。本試験の温度係数の絶対値は、前回試験に比べて、30kW 及び 9MW 炉心ともに小さいことが分かった。これは、熱領域に核分裂断面積の共鳴ピークを持つ Pu-239 が、燃焼とともに蓄積することに起因すると考えられる。



第4.2-1 図 炉心燃焼計算の流れ



第4.3-1 図 反応度温度係数の燃焼変化

5. まとめ

HTTR では、温度係数の燃焼度依存性を評価するために、燃焼日数(EFPD)が設計寿命 660 日の半分を過ぎた約 375 日での温度係数を測定した。その結果を燃焼初期のデータと比較し、 温度係数の燃焼特性を明らかにした。また、高い精度で温度係数を測定するために、炉心温度 の制御の手法及び炉心温度の静定の手法を確立した。

今後は、さらに高い原子炉出力での温度係数を本手法を用いて測定し、温度係数の燃焼度 依存性を高い精度で評価していく。

謝辞

本評価を行うにあたり、伊与久達夫 高温工学試験研究炉部長、水島俊彦 同部次長に御指導、御助言頂きました。さらに、運転データ等の取得にあたりHTTR運転管理課各位にご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所: "日本原子力研究所大洗研究所設置変更許可申請書(完本) [別冊3 HTTR]" (2001)
- (2) S. Saito et al.: JAERI-1332, "Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)" (1994)
- (3) Y. Tachibana et al.: "Plan for first phase of safety demonstration tests of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)", Nucl. Eng. Des., 224, p.179 (2003)
- (4) N. Sakaba et al.: "Safety Demonstration Test Plan of HTTR Overall Program and Result of Coolant Flow Reduction Test", Proc. of GLOBAL 2003, New Orleans, Nov. 16-20, 2003 p.293 (2003)
- (5) S. Nakagawa et al.: "Safety Demonstration Tests Using High Temperature Engineering Test Reactor", Nucl. Eng. Des., 233, pp.301-308 (2004)
- (6) 篠原正憲 他、"高温工学試験研究炉(HTTR)の安全性実証試験 一炉心冷却喪失コールド 試験一", JAEA-Technology 2011-029, (2011)
- (7) 藤本望他、"HTTR出力上昇試験での臨界制御棒位置と温度係数 中間報告-"、 JAERI-Tech 2000-091 (2001)
- (8) 茂木利広 他、"高温工学試験研究炉(HTTR)の制御応答試験結果", JAEA-Technology 2006-029, (2006)
- (9) 栃尾大輔 他、"HTTR の加圧水冷却器の伝熱性能に関する評価"、 JAERI-Tech 2005-041(2005)
- (10) M. Goto et al., "Long-term high-temperature operation in the HTTR (2) Core physics," Proceedings of HTR 2010, Prague, Oct. 18-20, 2010
- (11) K. Okumura et al. "SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System", JAEA-Data/Code 2007-004 (2007)
- (12) 藤本望 他、"高温工学試験研究炉(HTTR)臨界試験の予備解析結果 -HTTR 核特性解析 コードシステムに基づく解析-"、JAERI-Tech 98-021 (1998)
- (13) 藤本望、私信

This is a blank page.

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		

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」」の「ホルー」」の「加加」」 豊度 (a)、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} 加加/m³ 度 カンデラ毎平方メートル cd/m²折率 (b) (数字の) 1 1 透磁率 (b) (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
				0 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}	э 9	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 (19 A 11 6	

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 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd 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