JAEA-Technology 2008-044



高温用 N 型多対式熱電対の開発

Development of Nicrosil-Nisil Type Multi-paired Thermocouple for High Temperature

綿引 俊介 斎藤 隆 土谷 邦彦 小原 浩史 飯村 光一

Shunsuke WATAHIKI, Takashi SAITO, Kunihiko TSUCHIYA Hiroshi OHARA and Koichi IIMURA

> 大洗研究開発センター 照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center Oarai Research and Development Center

 \mathbf{O}

June 2008

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, 2008

JAEA-Technology 2008-044

高温用 N 型多対式熱電対の開発

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 照射試験炉センター

綿引 俊介・斎藤 隆・土谷 邦彦・小原 浩史*・飯村 光一+

(2008年4月1日受理)

本報告書は 1000℃以上の中性子照射環境下で使用でき、1 本のシースにおいて軸方 向に最大 7 点の測温接点を有する高温用 N 型多対式熱電対の開発についてまとめたも のである。

設計、製作及び炉外試験を通じて製作性と電気的性能を確認し、製作法を確立した。

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

+ 原子炉施設管理部

※ 出向職員

JAEA-Technology 2008-044

Development of Nicrosil-Nisil Type Multi-paired Thermocouple for High Temperature

Shunsuke WATAHIKI, Takashi SAITO, Kunihiko TSUCHIYA, Hiroshi OHARA^{**} and Koichi IIMURA⁺

> Neutron Irradiation and Testing Reactor Center Oarai Research and Development Center Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi,Higashiibaraki-gun,Ibaraki-ken

> > (Received April 1, 2008)

This report is described for the development of nicrosil-nisil type multi-paired thermocouple which was usable at over 1000°C under the neutron irradiation environment. Developed nicrosil-nisil type multi-paired thermocouple has maximum 7 hot junctions in axial direction in a sheath.

Though the design, trial production and out-pile tests, its productivity and electric performances were confirmed, and the production method was established.

Keywords : Multi-paired Thermocouple, Nicrosil-nisil[N-type], JMTR, High Temperature

⁺ Department of JMTR Operation

[※] Research Staff on Loan

目 次

1.	は	じめに	1
2.	設	計条件	1
3.	製	作及び試験検査方法	2
3	.1	材料	2
3	.2	製作方法	2
3	.3	多対式熱電対の製作性確認試験	3
3	.4	多対式熱電対の電気的性能確認試験	3
4.	結	果と考察	4
4	.1	製作性確認試験結果	4
4	.2	電気的性能確認試験結果	5
5.	結	論	6
謝	辞		7
参考	う 文	献	7
付銀	ι ή	JMTR における N 型熱電対の使用実績	38
付銀	≹∏	ハルデン炉で使用している熱電対について	40
付錄	¢Ш	照射中の燃料中心温度について	41

Contents

1.	Int	roduct	ion	1
2.	De	sign com	nditions	1
3.	Ex	perimer	nt and method of examination and test	2
	3.1	Materi	als	2
	3.2	Produc	tion method	2
	3.3	Produc	tion test of multi-paired thermocouple	3
	4.4	Electri	c performance test of multi-paired thermocouple	3
4.	Re	sult an	d consideration	4
	4.1	Result	of production test	4
	4.2	Result	of electric performance test	5
5.	Su	mmary		6
Ac	kno	wledgei	nents	7
Re	fere	nces -		7
Ap	pen	dix I	Experiences of thermocouples in JMTR	38
Ap	pen	dix II 🦷	Thermocouples used in the Halden reactor	40
Ap	pen	dixⅢ	Fuel center temperature under irradiation	41

1. はじめに

試験研究炉を用いた照射試験では、燃料・材料の使用条件(照射雰囲気、照射温度など) を模擬した環境で、中性子照射量や照射温度をパラメータにした多様な照射試験が要求さ れる¹⁾。このため、中性子照射環境下における照射温度を正確に測定するための熱電対の 開発²⁻³⁾や中性子束を測定するための自己出力型中性子検出器の開発¹⁻⁴⁾が行われてきた。

このうち、原子炉などの中性子環境下において、熱電対が温度測定に主に使用されてい る。この熱電対には、照射試料等の照射環境に応じて、種々の熱電対が開発され利用され ている。これまで、照射試験で用いられてきた熱電対は、クロメルーアルメル(K型)熱 電対が主であった。この K型熱電対での最高使用温度は素線の太さによって異なるが、 常用で 800℃程度、短時間では 1000~1200℃程度であり、JMTR では、熱中性子照射量 が 5.0×10²⁵m⁻²までは良好に使用できる実績を有している。しかしながら、1000℃を超え ると、急速に寿命が短くなるため、次世代軽水炉の燃料開発、高温ガス炉開発、核融合炉 開発の分野での燃材料の照射試験では、従来の K型熱電対では使用環境に限界がある。 また、より高温領域について測定可能なタングステン・レニウム(W/Re型)熱電対では 熱電対シースの製作に見合うサイズの元材(シースパイプ、絶縁材、素線)の入手の問題 や細物パイプや極めて細いベリリア(BeO)の碍子、細径の W/Re 熱電対素線の入手の問 題及び多対式であるため W/Re という極めて脆い素線を減径加工するためシース加工技 術の検討及び整備の問題等がある。

このため、今回は 1000[°]C以上の照射温度でも耐熱性に優れ、熱起電力特性と中性子照 射に基づく核変換の少ないニクロシル・ニシル(N型)多対式熱電対³⁾に着目し、開発 を開始した。この N型多対式熱電対は照射試験中における軽水炉燃料の中心温度の軸方 向分布の測定を可能とする JMTR の照射キャプセルや被照射物である燃材料の大きさを 考慮した1本の細径シースに最大7点までの測温接点を有する多対式熱電対である。

本報告書は高温用 N 型多対式熱電対の製作性及び炉外での特性試験をまとめたもので ある。

2. 設計条件

多対式熱電対の開発目標値を以下のように設定した。

多対式熱電対の概略図を Fig. 2-1 に示す。まず、多対式熱電対を装荷する照射試験体(軽 水炉燃料等)の直径は約 8.0mm~9.0mm であるため、熱電対の直径は実装可能なφ 2.0mm 以下とした。また照射試験の高度化のため、1 本の保護シースの中に測温接点が 軸方向に最大7点有するとともに、測温接点の軸方向の寸法精度についても±1mm 以下 とし、保護シースの中の先端にダミーシース(測温接点調整棒)を装荷することにより軸 方向の距離を調整できる構造とした。

今回の多対式熱電対の開発にあたっては、保護シース外径を ϕ 1.8mm、測温接点を 3 点とし、最小温接点距離間隔を 30mm とした。なお、他の 4 つの測温接点は、ダミーシース (NCF600) を装荷した。

多対式熱電対を構成する細径の N 型熱電対は、シース径を φ 0.5mm とし、素線に Ni14.2%Cr1.4%Si 線/Ni4.4%Si 線⁵⁾を、絶縁材に酸化マグネシウム (MgO)¹⁾を用い、 シース材に高温でも使用可能なインコネル 600 (NCF600)⁶⁾を選定した。また、高温高 圧下での使用において寿命が長く、誘導雑音の影響を受けないことが要求されるため測温 接点については、シースと完全に絶縁されている非接地型¹⁾とした。さらに、多対式熱電 対の保護シースは、高温領域でも十分耐えうる NCF600 を選定した。

3. 製作及び試験検査方法

3.1 材料

多対式熱電対に装荷した細径のN型熱電対は直径0.5mmとした。このN型熱電対は、 素線、絶縁材及び保護シース材から構成されており、その素線は、+側にNicrosil(ニク ロシル:Ni14.2%Cr1.4%Si)線を、一側にNisil(ニシル:Ni4.4%Si)線を用いた。な お、この素線中のシリコン(Si)は、高温下における酸化防止のために添加されている。そ れぞれの素線の化学成分をTable 3-1 に示す。絶縁材は、高温における絶縁特性に優れ、 かつ放射線損傷の少ないMgOを用いており、その化学成分をTable 3-2 に示す。また、 N型熱電対に用いた保護シースの化学成分をTable 3-3 に示す。

3.2 製作方法

多対式熱電対を製作するため、Table 3-4 に示す製作フローを計画した。

まず、細径の N 型熱電対を所定の長さに切断し、N 型熱電対のシース先端とダミーシ ース(保護シース先端部)をレーザー溶接にて溶接する。このとき、シース先端とダミー シースの接合状態を X 線検査にて確認する。また、外径 2.1mm の保護シース(減肉加工 前)の外表面を浸透探傷試験し、3 対の N 型熱電対と 4 対のダミーシース(NCF600)を 保護シース内に束ね、ダミーシースを溶接にて溶封する。

次に、ドローベンチ(減径加工装置)を用いて、保護シースの外径をφ2.1mm からφ 1.8mm に減径加工する。減径加工後、測温接点位置のX線検査を行い、測温接点の軸方 向における寸法公差が±1mm であること確認するとともに、各測温接点が判別できるよ うに多対式熱電対の外観にマーキングをする。その後、保護シース内を真空にして He ガ スを封入し、エポキシ樹脂をパイプ端末に充填して硬化させる。樹脂の硬化後、エポキシ シール部の He リーク検査を行う。最後に、スリーブ(\ 6 SUS304) 加工を行う。

3.3 多対式熱電対の製作性確認試験

製作した多対式熱電対の機械的仕様が設計仕様を満足できるよう製作できているかを 確認するためX線検査、Heリーク検査及び浸透探傷検査を次のように計画した。

X線検査

測温接点の軸方向における寸法公差に関しては、X線検査により、細径のN型熱電対の測温接点における寸法公差が±1mm以内であることを確認する。

He リーク検査

また、He リーク検査に関しては、保護シースと3対のN型熱電対のシースのエポキシ 樹脂充填部の密封性を確認するため、保護シース内にHe ガスを封入し、エポキシ樹脂を 保護シース端末に充填した後でスリーブ加工前に検査を行う。He リーク検査方法として は、まず、シース端末を溶接にて封じ、シース端末から保護シース端末側を真空容器に挿 入し、多対式熱電対を取付ける。He ガスの漏洩は He リークデテクター(ANELVA 製、 型番:A-220M-LD)で測定し、漏洩量については JMTR キャプセルの技術基準に従い 1×10⁻⁷Pa・m³/sec 以下とし、この設定値以下であることを確認する。He リーク試験の概 略図を Fig.3-1 に示す。

③ 浸透探傷検査

さらに、多対式熱電対の保護シース全体の浸透探傷試験を室温(15℃~35℃)で行う。 まず、洗浄液により検査箇所(保護シース外表面)を洗浄処理する。次に、浸透液を塗布 し、約 10 分間放置する。その後、浸透液を除去し現像液を吹き付け約 10 分間放置した 後で発色の有無を確認し、有害な表面開口傷がないことを確認する。

健全性確認試験で用いた計測器の名称、型式及び校正年月日を Table 3-5 に示す。

3.4 多対式熱電対の電気的性能確認試験

製作した多対式熱電対の電気的性能確認の確認については、基準熱電対(白金熱電対) による基準温度との温度差を評価する校正試験、シースと素線との絶縁抵抗を測る絶縁検 査及び素線間の往復抵抗を測る導通検査を行い、その性能を確認する。加熱試験炉内での 性能試験において試験雰囲気をHeガス雰囲気とするため被試験体をガス置換専用容器に 入れ He ガス雰囲気とする。ガス置換専用容器を Photo 3-1 に示す。また、被試験体の各 測温接点の位置がわかるようにガス置換専用容器に各測温点をマーキングする (Photo 3-2)。

校正試験

校正試験に関しては、室温、400℃、600℃、800℃、1000℃及び1100℃の測定温度に ついて、ガス置換専用容器にマーキングした各測温接点部にそれぞれ基準熱電対を取付け、 3本の基準熱電対の測温接点と非試験体の各測温接点の位置をそれぞれ正確に合わせ加熱 試験炉内にセットし温度校正を行う。測定は、基準熱電対の温度が所定の測定温度に到達後、10分経過した後に行う。本試験では、加熱試験炉内の雰囲気はHeガス雰囲気とし、 基準熱電対の校正温度と多対式熱電対の測定温度との許容誤差は、その校正温度の±1%

(室温:±1.5℃、400℃:±4.0℃、600℃:±6.0℃、800℃:±8.0℃、1000℃:±10.0℃、1100℃:±11.0℃)以内を合格とする。室温(常温水)の場合の試験方法を Fig.3・2 に、また 400~1100℃の場合の試験方法を Fig.3・3 に示す。また、加熱試験炉の外観を Photo 3・3 に示し、加熱試験炉に実装した多対式熱電対と基準熱電対を Photo 3・4 に示す。
② 絶縁試験

被試験体の端子とシース間の絶縁抵抗を絶縁抵抗計(HIOKI 製、型番:SM-8213)及 び超絶縁抵抗計(アジレント・テクノロジー製、型番:4329A)を用いて室温にて測定し、 1×10⁹Ω以上であることを確認する。このとき、印加電圧は10VDCとする。また、参考 値として、各測定温度到達時おける絶縁抵抗値も測定する。

③ 導通試験

室温における各端子間の往復抵抗をホイートストンブリッジ(横河電機製、型番: 2755-97)を用いて測定する。また、参考値として、各測定温度到達時おける往復抵抗値 も測定する。

これらの性能試験において使用した計測器の名称、型式及び校正年月日を Table 3-5 に示す。

4. 結果と考察

多対式熱電対を 3.2 の制作方法で 3 体 (No.1~No.3) 製作し、3.3 の製作性確認試験及び 3.4 の電気的性能確認試験を実施した。

4.1 製作性確認試験結果

多対式熱電対の機械的仕様を確認するために行った X線検査、He リーク検査及び浸透 探傷検査の結果について以下に示す。

① X線検査結果

製作性確認試験として測温接点の軸方向における寸法公差を測定するために実施した X線検査の結果を Fig.4-1 及び Fig.4-2 に示すとともに測定結果を Table 4-1 に示す。設 計条件として定めた測温接点間距離(A点:50mm、B点:30mm、C点:30mm)に対 して製作した多対式熱電対 3 本とも測温接点の軸方向における寸法公差が設計条件と比 較して±1mm 以内であった。 ② He リーク検査結果

He ガスを封入した保護シース及びそれぞれの N 型熱電対のシース(3対)のエポキシ 樹脂充填部の密封性を確認するために製作した多対式熱電対全数について He リーク試験 を行った結果、全数とも漏洩量は 1×10⁻⁷Pa・m³/sec 以下であった。

③ 浸透探傷検査結果

多対式熱電対の保護シース全体の浸透探傷試験を行った結果、有害な表面開口傷はなく、 良好であった。

以上から Table 3-4 に示した製作フローは製作、仕様を満足できることを確認した。

4.2 電気的性能確認試験結果

多対式熱電対の性能試験として実施した校正検査、絶縁検査及び導通検査の結果を以下 に示す。

① 校正試験結果

校正試験の結果としては、各校正温度到達時に測定した基準温度及び被試験体温度を Table 4-2~Table 4-4(多対式熱電対 No.1~3)に示し、多対式熱電対1本ごとに基準温 度と被試験体の温度差と目標温度との関係をFig.4-4~Fig.4-12(多対式熱電対 No.1~3) に示す。この結果、測定温度の誤差は、その校正温度の±1%以内であり、許容誤差の範 囲内であることがわかった。

② 絶縁試験結果

絶縁試験の結果を Table 4-5~Table 4-7 (多対式熱電対 No.1~3) に示す。この結果、 すべての熱電対について室温時における絶縁抵抗値が 1×10⁹ Ω 以上であり、十分な絶縁 を有することが分かった。ところが、今回製作した細径の N 型熱電対は、Fig.4-13~ Fig.4-15 (多対式熱電対 No.1~3) に示すように温度が 400°C、600°C、800°C、1000°C、 1100°Cと上げると、急激に(指数関数的に)抵抗値が減少した。校正試験終了後、室温に て絶縁抵抗を再度測定した結果、正常値(1×10⁹ Ω 以上)を示した。これは、保護シース (NCF600)と中の素線間を MgO で絶縁しているためであり、MgO の負の温度特性によ り生じるもので、絶縁体の場合、自由電子が少ないことにより絶縁性が生じているが、高 温になることで、熱によって電子などの荷電担体が活性化される効果のほうが顕著に現れ ることにより抵抗率が下がるためと考えられる⁷⁾。

③ 導通試験結果

導通試験の結果を Table 4-8~Table 4-10 (多対式熱電対 No.1~3) に示し、Table 4-8 ~Table 4-10 に基づき往復抵抗と測定温度との関係を示したものを Fig.4-16~Fig.4-18 (多対式熱電対 No.1~3) に示す。この結果、往復抵抗は、温度の上昇とともに増加する ことがわかった。これは、電気が導通するということは、移動可能な荷電担体が存在する ということであるため、導電性は荷電担体の密度と、その動きやすさによって決まる。す なわち、導体の場合、常温で充分に自由電子があるが、その電気抵抗は、熱によって生じ る格子振動のような電子の運動を阻害する要因に支配され、そのため、導通抵抗は温度上 昇とともに増加すると考えられる。室温時及び温度校正時においても異常がないことを確 認し、開発した多対式熱電対は良好に使用できることが分かった。なお、各々の N 型熱 電対における往復抵抗値の違いは熱電対の素線の長さに影響がある。

以上から所期の性能を確認し、この方式の熱電対が問題なく製作できることを確認した。

5. 結論

1000℃以上の中性子照射環境下で使用でき、1本のシースにおいて軸方向に最大7点の 測温接点を有する多対式熱電対の開発を計画し、設計、製作及び炉外試験を通じて製作性 と電気的性能を確認し、製作法を確立したことにより、当初設定した製作条件を満足する 多対式熱電対を製作することができた。

今後は、本熱電対を用いて、実際の照射試験への適用性を検証するため、炉外試験にて 熱サイクル試験、耐久試験などを行うとともに、JMTR 改修後には照射試験を実施し、照 射特性を取得していく予定である。

謝辞

今回 N 型多対式熱電対を製作するに当たり、照射試験開発課長をはじめ課諸氏には多 大なご協力を頂きましたことを深く感謝いたします。また、本報告書をまとめる上で河村 弘照射試験炉センター長、長尾美春 JMTR 原子炉主任技術者には有意義なご助言、ご指 導を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 川口千代二、荒克行之著:原子炉の計測、幸書房、(1978).
- 2) D.D.Pollock : "The theory and properties of thermocouple elements", ASTM special technical 492, (1971) .
- 3) (独)日本原子力研究開発機構経営企画部材料試験炉計画準備室編:「JMTR で利用可 能な照射試験技術」、(2007) pp.3-10.
- M. Nakamichi, Y. Nagao, C. Yamamura, M. Nakazawa and H. Kawamura : "Characterization of hybrid self-powered neutron detector under neutron irradiation", Fus. Eng. Des. 51-52, (2000) pp.837-841.
- 5) JIS C1602 "熱電対".
- 6) JIS G4903 "配管用継目無ニッケルクロム鉄合金管".
- Y.Y.liu and D.L.Smith : "Ceramic electrical insulators for liquid metal blankets", Journal of Nuclear Materials 141-143 (1986) pp.38-43 North-Holland, Amsterdam.



材質	Nicrosil (=	クロシル)[%]	Nisil (ニシル) [%]	
成分				
	基準値	測定値	基準値	測定値
Ni	Bal	Bal	Bal	Bal
Cr	14.2	14.35	_	_
Si	1.4	1.48	4.4	4.56
Fe	-	0.15	_	0.06
Со	_	0.10	-	0.13
С	_	0.008	-	0.013
Mn	_	<0.01	-	<0.01
Мо	_	<0.01	-	<0.01
Cu	_	<0.01	-	<0.01
S	_	0.002	_	<0.001
Р	_	<0.005	-	<0.005

Table.3-1 芯線 (ニクロシル/ニシル) の化学成分

Table.3-2 絶縁材 (MgO) の化学成分

			化	2学成分[%]			
成	分	MgO	CaO	${ m SiO}_2$	Al_2O_3	Fe_2O_3	В
₩4-72	А	99.84	0.04	0.01	0.05	0.04	<10ppm
私任	В	99.82	0.03	0.01	0.08	0.04	<10ppm

型番	成分	Ni	Cr	Fe	Mn	Cu	S_i	C	Ρ	S
			14.00	6.00						
NCF600TP	規格値[%]	> 72.00	2	2	$\langle 1.00 \rangle$	$\langle 0.50$	$\langle 0.50$	$\langle 0.15$	$\langle 0.03$	<0.015
			17.00	10.00						
NCF600	細径N型熱電対シース材[%]	73.34	16.49	9.00	0.33	0.04	0.30	0.03	0.009	0
	保護シース材[%]	75.55	15.96	7.93	0.30	0.03	0.32	0.01	0.008	0

Table.3-3 NCF600TP 規格値、細径 N 型熱電対シース材及び保護シース材の化学成分

工程	作業	工程間検査	チェックポイント
シース切断	シースを指定の長さに切断す る。		
		芯線間の絶縁抵抗 10VDCにて1 × 10 ⁹ Ω以上	
▼ 測温接点加工 ┃	測温接点をレーザー溶接にて溶 接する。(3対)		接合状態
↓ ダミーシース取 付	N型熱電対3対のシース先端とダ ミーシース(測温接点調整棒)を 溶接する。		溶け込み具合
		・シース先端とダミー棒の 接合状態をX線検査にて確 認する。	
Ļ		・ ϕ 2.1パイプの外表面において浸透探傷試験を行う。	
溶接	ダミーシース(NCF600)4対とN 型熱電対3対を保護管内に束 ね、ダミー棒(保護管先端部)を 溶接封じする。		溶け込み具合
Ļ		測温接点位置においてX線 検査を行う。	
減径加工	パイプの外形を¢2.1から¢1.8 に減径加工する。		ᄢᇃᅓᅣᇗᆋ
Ļ		減径加工後、測温接点位置 のX線検査を行う。	測温接点の軸 方向における 寸法公差:± 1mm
パイプ内Heガス 封入 I	パイプ内にHeガスを封入する。		
シール	エポキシ樹脂をパイプ端末に充 填し、硬化させる。		エポキシ硬化 が始まったら 絶対に動かさ ない。
↓ ↓		エポキシシール部において Heリーク検査を行う。	検査要領書に 準ずる。
スリーブ加工 	スリーブ(<i>ф</i> 6 SUS304)加工を行 う。		
↓ 最終検査	試験検査要領書に基づいた試 験検査を実施する。		

Table.3-4 N型多対式熱電対の製作フロー

製作性確認試験で用いた計測器の一覧
Table.3-5

計測器名称	型式・仕様	安化一メ	台墨흯蓨	管理番号	校正年月日	有効期限
鋼製直尺	600mm	シンワ測定 (株)		5-10-66	2007.6.21	2008.6.20
卷尺	30m	ムラテック KDS(株)		5-11-501	2007.9.12	2008.9.11
マイクロメータ	M820-25VA	(株) ミツトヨ	1161901	5-02-34	2007.3.12	2008.3.11
ノギス	300mm	(株) ミントヨ	6022736	5-01-138	2007.6.21	2008.6.20
ディジタル・マルチメータ	2700	ケースレ	0838319	4-06-18	2007.6.6	2008.6.5
二次標準熱電対	R熱電対	(株)岡崎製作所		3-33-501	2006.3.23	2008.3.22
現用器	R熱電対	· (株) 岡崎製作所		4-04-54	2007.6.25	2008.6.24
現用器	R熱電対	(株)岡崎製作所		3-33-07	2007.6.25	2008.6.24
白金抵抗温度計	m R35	(株)岡崎製作所	AX161605	4-05-67	2007.4.6	2008.4.5
絶縁抵抗計	SM-8213	日置電機(株)	061299365	4-11-507	2007.2.6	2008.2.5
超絶縁抵抗計	4329A	アジレント・テクノロジー(株)	1521J03294	4-7-201	2007.11.15	2008.11.14
ホイートストンブリッジ	2755-97	横河電機(株)	59EV0175	4-08-04	2006.12.20	2007.12.19
He リークデテクター	A-220M-LD	アネルバ (株)	SA-015426	2-13-04	2007.4.5	2008.4.4



Fig.3-1 He リーク検査方法



Photo.3-1 ガス置換専用容器



Photo.3-2 ガス置換専用容器に施した測温点位置のマーキング



- ① 基準測温抵抗体
- ② 被試験品
- 高精度デジタル
 マルチメータ
- ④ 試験槽(常温水)⑤ 基準接点(0℃)





400~1100℃の場合

- ① 基準熱電対
- ② 被試験品
- 高精度デジタル マルチメータ
- ④ 加熱試験炉
- ⑤ 基準接点 (0℃)
- ⑥ 超高純度 He ガス



Fig.3-3 校正検査方法(400~1100℃)



Photo.3-3 加熱試験炉外観



Photo.3-4 加熱試験炉に実装した多対式熱電対と基準熱電対





Fig.4-1 X 線検査結果



Fig.4-2 X線検査結果(Fig.4-1の90℃方向)



Table.4-1 N型多对式熱電対測温接点間距離測定結果

目標温度	基準熱電対	基準熱電対	N 型熱電対	N 型熱電対	╝┽╔╝
[°C]	測定点	温度[°C]	測定点	温度[℃]	設定[し]
	1	26.49	1	26.94	0.45
25	2	26.49	2	26.94	0.45
	3	26.49	3	27.02	0.53
	1	400.5	1	402.09	1.59
400	2	402	2	403.7	1.7
	3	403.4	3	405.16	1.76
	1	597.36	1	599.55	2.19
600 800	2	598.25	2	601.23	2.98
	3	600.73	3	602.64	1.91
	1	796.23	1	799.19	2.96
	2	797	2	800.21	3.21
	3	798.83	3	801.21	2.38
	1	991.69	1	994.87	3.18
1000	2	992	2	995.51	3.51
	3	993.77	3	996.29	2.52
	1	1089.46	1	1092.64	3.18
1100	2	1089.54	2	1093.06	3.52
	3	1091.07	3	1093.82	2.75

Table.4-2 校正試験結果(多対式熱電対 No.1)





Fig.4-4 多対式熱電対 (No.1) の校正試験結果 (N型熱電対①)



Fig.4-5 多対式熱電対 (No.1) の校正試験結果 (N型熱電対②)



Fig.4-6 多対式熱電対 (No.1) の校正試験結果 (N型熱電対③)

目標温度	基準熱電対	基準熱電対	N 型熱電対	N 型熱電対	⋼≭୲∽୲
[°C]	測定点	温度[°C]	測定点	温度[℃]	設定[0]
	1	25.18	1	25.9	0.72
25	2	25.18	2	25.93	0.75
	3	25.18	3	25.9	0.72
	1	401	1	402.92	1.92
400	2	402.5	2	404.48	1.98
	3	403.8	3	405.24	1.44
	1	602.18	1	604.77	2.59
600 800	2	603.5	2	606.13	2.63
	3	605	3	607.13	2.13
	1	798	1	801.36	3.36
	2	798.83	2	802.15	3.32
	3	800	3	802.89	2.89
	1	999.36	1	1003.08	3.72
1000	2	999.54	2	1003.47	3.93
	3	1000.21	3	1003.39	3.18
	1	1094.85	1	1098.45	3.6
1100	2	1094.86	2	1098.59	3.73
1100	3	1095.14	3	1098.61	3.47

Table.4-3 校正試験結果(多対式熱電対 No.2)





Fig.4-7 多対式熱電対 (No.2) の校正試験結果 (N型熱電対①)



Fig.4-8 多対式熱電対 (No.2) の校正試験結果 (N型熱電対②)



Fig.4-9 多対式熱電対 (No.2) の校正試験結果 (N型熱電対③)

目標温度	基準熱電対	基準熱電対	N 型熱電対	N 型熱電対	╝╪╔╝
[°C]	測定点	温度[°C]	測定点	温度[℃]	設定[し]
	1	25.18	1	25.93	0.75
25	2	25.18	2	25.93	0.75
	3	25.18	3	25.9	0.72
	1	398.9	1	400.64	1.74
400	2	399.8	2	402.2	2.4
	3	401.5	3	403.17	1.67
	1	602.27	1	604.79	2.52
600 800	2	603.25	2	606.13	2.88
	3	604.64	3	607.13	2.49
	1	797.42	1	800.62	3.2
	2	798	2	801.39	3.39
	3	799.08	3	802.3	3.22
	1	996.85	1	1000.17	3.32
1000	2	997	2	1000.59	3.59
	3	997.62	3	1001.08	3.46
	1	1094.46	1	1097.85	3.39
1100	2	1094.43	2	1098.06	3.63
1100	3	1094.64	3	1098.51	3.87

Table.4-4 校正試験結果(多対式熱電対 No.3)





Fig.4-10 多対式熱電対 (No.3) の校正試験結果 (N型熱電対①)



Fig.4-11 多対式熱電対(No.3)の校正試験結果(N型熱電対②)



Fig.4-12 多対式熱電対 (No.3) の校正試験結果 (N型熱電対③)

測定温度[℃]	測定した熱電対	絶縁抵抗[Ω]
	N 型熱電対①	$5.0 imes 10^{13}$
25	N 型熱電対②	$5.0 imes 10^{13}$
	N 型熱電対③	$2.0 imes 10^{13}$
	N型熱電対①	$1.5 imes 10^{9}$
400	N 型熱電対②	$1.3 imes 10^{9}$
	N 型熱電対③	$1.3 imes 10^{9}$
	N 型熱電対①	$8.0 imes 10^{6}$
600	N型熱電対②	$6.0 imes 10^{6}$
	N 型熱電対③	$7.0 imes 10^{6}$
	N型熱電対①	$1.8 imes10^5$
800	N型熱電対②	$1.5 imes 10^5$
	N 型熱電対③	$1.6 imes 10^{5}$
	N型熱電対①	$8.1 imes 10^{3}$
1000	N型熱電対②	$8.4 imes 10^{3}$
	N 型熱電対③	$9.5 imes 10^{3}$
	N型熱電対①	$2.4 imes10^3$
1100	N 型熱電対②	$2.3 imes10^3$
	N型熱電対③	$2.6 imes 10^{3}$

Table.4-5 多対式熱電対(No.1)の絶縁測定結果

Table.4-6	多対式熱電対	(No.2)	の絶縁測定結果
-----------	--------	--------	---------

測定温度[℃]	測定した熱電対	絶縁抵抗[Ω]
	N型熱電対①	$1.5 imes 10^{13}$
25	N 型熱電対②	$1.5 imes 10^{13}$
	N型熱電対③	$1.0 imes 10^{13}$
	N 型熱電対①	$2.0 imes 10^{9}$
400	N型熱電対②	$4.0 imes 10^{8}$
	N 型熱電対③	$5.0 imes 10^{8}$
	N 型熱電対①	$4.0 imes 10^{5}$
600	N型熱電対②	$2.0 imes10^6$
	N型熱電対③	$2.0 imes 10^{6}$
	N 型熱電対①	$1.3 imes10^5$
800	N型熱電対②	$6.0 imes10^4$
	N型熱電対③	$7.5 imes 10^4$
	N型熱電対①	$7.1 imes 10^{3}$
1000	N型熱電対②	$4.6 imes 10^{3}$
	N型熱電対③	$5.3 imes10^3$
	N 型熱電対①	$2.2 imes 10^{3}$
1100	N型熱電対②	$1.8 imes 10^{3}$
	N型熱電対③	$1.9 imes 10^{3}$

Table.4-7 多対式熱電対(No.3)の絶縁測定結果

測定温度[℃]	測定した熱電対	絶縁抵抗[Ω]
	N型熱電対①	$2.0 imes 10^{13}$
25	N型熱電対②	$1.2 imes 10^{13}$
	N 型熱電対③	$2.5 imes 10^{13}$
	N型熱電対①	$3.5 imes10^9$
400	N型熱電対②	$4.0 imes 10^{9}$
	N 型熱電対③	$1.5 imes10^9$
	N 型熱電対①	$1.5 imes 10^{7}$
600	N 型熱電対②	$3.0 imes 10^{7}$
	N 型熱電対③	$5.0 imes10^6$
	N 型熱電対①	$2.2\! imes\!10^5$
800	N型熱電対②	$3.0 imes10^5$
	N 型熱電対③	$1.3 imes10^5$
	N 型熱電対①	$1.2\! imes\!10^4$
1000	N型熱電対②	$1.5 imes 10^4$
	N 型熱電対③	$8.6 imes 10^{3}$
	N 型熱電対①	$2.7\! imes\!10^3$
1100	N型熱電対②	$3.3 imes10^3$
	N型熱電対③	$2.5 imes10^3$



Fig.4-13 多対式熱電対(No.1)の絶縁測定結果



Fig.4-14 多対式熱電対(No.2)の絶縁測定結果





測定温度[℃]	測定した熱電対	導通抵抗[Ω]
	N型熱電対①	612
25	N 型熱電対②	597
	N 型熱電対③	591
	N型熱電対①	625.1
400	N 型熱電対②	605
	N型熱電対③	598
	N型熱電対①	625.2
600	N型熱電対②	609
	N型熱電対③	602
	N型熱電対①	629
800	N 型熱電対②	612.5
	N型熱電対③	605.5
	N型熱電対①	633.5
1000	N型熱電対②	616.5
	N型熱電対③	609
	N型熱電対①	635.5
1100	N型熱電対②	618
	N型熱電対③	611

Table.4-8 多対式熱電対(No.1)の導通測定結果

Table.4-9 多対式熱電対(No.2)の導通測定結果

測定温度[℃]	測定した熱電対	導通抵抗[Ω]
	N型熱電対①	596
25	N 型熱電対②	594
	N型熱電対③	585
	N型熱電対①	604
400	N型熱電対②	601
	N型熱電対③	592
	N 型熱電対①	609
600	N型熱電対②	606
	N型熱電対③	596
	N 型熱電対①	612.5
800	N型熱電対②	609.5
	N型熱電対③	599.5
	N型熱電対①	617.5
1000	N型熱電対②	613.5
	N型熱電対③	602.5
1100	N型熱電対①	619.5
	N型熱電対②	615.5
	N型熱電対③	605

Table.4-10 導通検査結果(多対式熱電対 No.3)

測定温度[℃]	測定した熱電対	導通抵抗[Ω]
	N型熱電対①	604
25	N 型熱電対②	595
	N型熱電対③	592
	N 型熱電対①	612.5
400	N 型熱電対②	603.5
	N 型熱電対③	598.5
	N 型熱電対①	617
600	N型熱電対②	608
	N型熱電対③	603
	N型熱電対①	621
800	N型熱電対②	611.5
	N型熱電対③	606.5
	N型熱電対①	625.5
1000	N型熱電対②	616
	N型熱電対③	610
1100	N 型熱電対①	627.5
	N 型熱電対②	618.5
	N型熱電対③	612



Fig.4-16 多対式熱電対 (No.1) の導通測定結果



Fig.4-17 多対式熱電対(No.2)の導通測定結果



Fig.4-18 多対式熱電対(No.3)の導通測定結果

付録 I JMTR における N 型熱電対の使用実績

現在に至るまでに JMTR において使用されたシース熱電対の仕様を Table I-1 に、 各種熱電対の測温範囲を Fig. I-1 に示す。また、高温測定用熱電対の使用実績を Fig. I-2 に示す。

下図はTable I -1 及び Fig. I -1 は(独)日本原子力研究開発機構経営企画部材料試験炉 計画準備室編、「JMTR で利用可能な照射試験技術」、(2007) p.3 より抜粋

種類	K型(C/A)	N型(Nicrosil-Nisil)	W/Re型
測定温度 (使用実績)	~1000°C	800°C~1100°C	1000°C~1900°C
シース径 (mm)	φ 0.5, φ 1.0, φ 1.6	\$\$1.0, \$\$1.5	¢ 1.6
シース材	SUS304, SUS316, インコネル600	SUS316, インコネル600	Nb-1%Zr. Mo
絶縁材	MgO	MgO	BeO

Table I-1 JMTR におけるシース熱電対の仕様



Fig. I-1 各種熱電対の測温範囲



付録Ⅱ ハルデン炉で使用している熱電対について

ハルデンプロジェクトでは照射中の温度測定用熱電対として1964~1966年に種々の 試験を実施している¹⁾。その結果、外径 1mm のインコネルシースにアルミナ(Al₂O₃) 絶縁したクロメル/アルメル熱電対が正確で信頼性があり、燃料中心温度測定用の外径 1mm のモリブデンシースにマグネシア(MgO)またはベリリア(BeO)絶縁のタング ステン/レニウム合金製熱電対は寿命が短いと報告している¹⁾。

その後、ハルデンでは燃料中心温度用熱電対は 2000℃まで、ときには 2500℃までの 測定をするために外径 1.5~1.6mm のタンクステン/25%レニウム合金(又はモリブデ ン/50%レニウム合金)シースに高純度ベリリア(BeO)絶縁したタングステン/レニウ ム合金系の熱電対(W3%Re/W25%Re、W5%Re/W26%Re)を使用している^{2)・4)}。ただ し、W-Re 合金製熱電対は照射下では W→Re→Os に核変換するため補正が必要となる ³⁾。

参考文献

- 1) HPR 74 Experience with in-pile thermocouples at HBWR (1967).
- 2) ハルデン共同研究合同運営委員会発行:「ハルデン計画」、(1984).
- 3) C. Vitanza and T. E. Stien: Journal of Nuclear Materials 139 (1986) pp.11-18.
- 4) O. Aarrestad and H. Thoresen: In-core instrumentation and core assessment, Proceedings of a Specialists' Meeting, (1996).

付録Ⅲ 照射中の燃料中心温度について

ハルデンプロジェクトで実施したペレットー被覆管ギャップ幅を変えたときの燃料 中心温度と線出力密度の関係から線出力密度 300W/cm における燃料中心温度はではギ ャップ幅が 230µm で 1050-1100℃になっている。また、燃焼度をパラメータとした場 合の非加圧燃料棒の線出力密度と燃料中心温度の関係では燃焼初期(0GWd/t)では 300W/cm で中心温度は 900℃強であるが、6MWd/kgUO₂(約 6.8GWd/t)では 300W/cm で 1300℃弱になっている¹⁾。

同様にハルデンプロジェクトで実施したギャップガスの効果を調べるため、He を充 填した燃料と Xe を充填した燃料の出力起動時におけるペレット中心温度の計算値と実 測値を比較した結果では、He を充填した燃料においても出力 300W/cm で中心温度は 1000℃以上になっている²⁾。

ハルデンプロジェクトのVitanzaらが実施したW-3%Re/W-25%Re熱電対の照射による合金元素の核変換に伴う熱電対の補正の試験では、燃焼初期の燃料棒平均出力(熱電対位置の出力ではない)は約 300W/cm であり、その時の燃料中心温度は約 1100℃である³⁾。

JNES プロジェクトで実施した BWR9×9A 型燃料についての挙動解析コードによる 解析結果では照射初期の軸方向下部位置は線出力密度が約 30kW/m であり、その位置 の燃料中心温度の計算値は約 1100℃となっている⁴⁾。(Fig.Ⅲ-1 及び Fig.Ⅲ-2 参照)

以上の結果から BWR 燃料において燃焼初期の 300W/cm における燃料中心温度は 900℃~1100℃程度である。



Fig.Ⅲ-1 2F1Z2D9燃料要素出力履歴(軸方向下部出力+10%)



Fig.Ⅲ-2 2F1Z2D9 燃料要素ペレット中心温度(軸方向下部出力+10%)

独立行政法人 原子力安全基盤機構:平成 18 年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証 成果報告書 付録 I (9×9A型燃料照射後試験結果)、平成 19 年 12 月より抜粋

参考文献

- (1) ハルデン共同研究合同運営委員会発行、「ハルデン計画」(1984)
- (2) 日本原子力産業会議発行、「動力炉 燃料・材料ガイドブック」(1998)
- (3) C. Vitanza and T. E. Stien ; Journal of Nuclear Materials 139 (1986) pp.11-18
- (4) 独立行政法人 原子力安全基盤機構:平成 18 年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実 証成果報告書 付録 I (9×9A型燃料照射後試験結果)、(2007)

表1. SI 基本単位				
甘木昌	SI 基本単位			
本平里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	S		
電 流	アンペア	А		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光 度	カンデラ	cd		

如去早	SI 基本単位			
和1.12.里	名称	記号		
面 積	平方メートル	m ²		
体積	立法メートル	m ³		
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s		
加 速 度	メートル毎秒毎秒	m/s^2		
波 数	毎 メ ー ト ル	m-1		
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m^3		
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg		
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2		
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m		
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	$mo1/m^3$		
輝 度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2		
屈 折 率	(数の) 1	1		

表5. SI 接頭語

衣 0. 51 顶原阳					
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}	ピョ	р
10^{6}	メガ	М	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	у

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位 SI 組立畄位

	四年立 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11 11			
組立量	夕敌	記早	他のSI単位による	SI基本単位による
	2日 1小	記与	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン ^(a)	rad		$\mathbf{m} \cdot \mathbf{m}^{-1} = 1^{(b)}$
立 体 角	ステラジアン ^(a)	$\mathrm{sr}^{(\mathrm{c})}$		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周 波 数	、ヘルツ	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	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率,放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷,電気量	フーロン	С		s•A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁東	ウェーバ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光東	ルーメン	1m	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$
照度	ルクス	1x	1m/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 質量エネル	HIZ	Cu	T/kg	22
ギー分与, カーマ		Gy	J/ Kg	m•s
線量当量,周辺線量当				
量,方向性線量当量,個	シーベルト	Sv	J/kg	m ² • s ⁻²
人禄量当量, 組織線量当				

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 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"1"は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位			
組工重	名称	記号	SI 基本単位による表し方	
粘度	モパスカル 秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$	
力のモーメント	ニュートンメートル	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$	
表 面 張 ナ	リニュートン毎メートル	N/m	kg • s ⁻²	
角 速 厚	ミラジアン毎秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$	
角 加 速 厚	E ラジアン毎平方秒	rad/s^2	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	E 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	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム 毎ケルビン	$J/(kg \cdot K)$	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
質量エネルギー		x (1	2 _2 _1	
(比エネルギー)	シュール毎キロクフム	J/kg	m ² • s ² • K ¹	
熱伝導率	³ ワット毎メートル毎ケ ルビン	₩/(m•K)	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{K}^{-1}$	
体積エネルギー	ジュール毎立方メート ル	J/m^3	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{A}^{-1}$	
体 積 電 荷	クーロン毎立方メート ル	C/m^3	$m^{-3} \cdot s \cdot A$	
電気変位	クーロン毎平方メート ル	C/m^2	$m^{-2} \cdot s \cdot A$	
誘 電 🖣	「ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	
透磁率	国ヘンリー毎メートル	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{A}^{-2}$	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$	
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケル	T (1 12)	2211	
モル熱容量	L ビン	J/(mol·K)	m [*] •kg•s [*] •K [*] •mol [*]	
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$	
吸収線量率	ミグレイ 毎秒	Gy/s	$m^{2} \cdot s^{-3}$	
放 射 強 厚	E ワット毎ステラジアン	W/sr	$\mathbf{m}^4 \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} = \mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3}$	
放射輝 厚	リット毎平方メートル	$W/(m^2 \cdot sr)$	$\mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} = \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3}$	

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	0	$1^{\circ} = (\pi / 180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	1B=(1/2)1n10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で 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 単位であらわされる数値			
電子ボルト	eV	$1 \text{eV}=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{J}$			
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg			
天 文 単 位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m			

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と 併用されるその他の単位

伊用されるその他の単位					
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値	
海		里		1 海里=1852m	
1	ツ	F		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s	
P		ル	а	$1 \text{ a=} 1 \text{ dam}^2 = 10^2 \text{m}^2$	
ヘク	ター	ル	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²	
バ	_	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa	
オンク	「ストロ・	- 4	Å	1 Å=0. 1nm=10 ⁻¹⁰ m	
バ	-	\sim	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$	

表9 固有の名称を含むCGS組立単位

	名称		記号	SI 単位であらわされる数値			
工	N	グ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダ	イ	\sim	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポ	ア	ズ	Р	1 P=1 dyn⋅s/cm²=0.1Pa・s			
ス	トーク	ス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s			
ガ	ウ	ス	G	1 G 110 ⁻⁴ T			
T.	ルステッ	F	0e	1 Oe 🛔 (1000/4π) A/m			
7	クスウェ	ル	Mx	1 Mx #10 ⁻⁸ Wb			
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$			
朩		ŀ	ph	$1 \text{ ph}=10^4 1 \text{ x}$			
ガ		ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{m/s}^2$			

	表10. 国際単位に属さないその他の単位の例						
名称				記号	SI 単位であらわされる数値		
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq		
\mathcal{V}	\sim	トク	゛ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy		
\mathcal{V}			L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv		
Х	線	単	位		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm		
ガ		ン	7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$		
ジ	ャン	(ス:	キー	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$		
フ	л.	ル	5		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m		
メー	ートル	系カラ	ット		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4} kg		
ŀ			ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大 気	〔圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
力	口	リ	-	cal			
Ξ	ク		ン	u	$1 \text{ u} = 1 \text{ um} = 10^{-6} \text{ m}$		

この印刷物は再生紙を使用しています