

純水の高温領域における抵抗率変化特性の測定

Measurement of Pure Water Resistivity in a High Temperature Region

山中 晴彦 前島 哲也 照沼 勇斗 渡邊 和弘
柏木 美恵子 花田 磨砂也

Haruhiko YAMANAKA, Tetsuya MAEJIMA, Yuto TERUNUMA, Kazuhiro WATANABE
Mieko KASHIWAGI and Masaya HANADA

核融合研究開発部門
那珂核融合研究所
ITERプロジェクト部

Department of ITER Project
Naka Fusion Institute
Sector of Fusion Research and Development

December 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 (<http://www.jaea.go.jp>)
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 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration 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

純水の高温領域における抵抗率変化特性の測定

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 那珂核融合研究所
ITER プロジェクト部

山中 晴彦・前島 哲也^{※1}・照沼 勇斗^{※1}・渡邊 和弘・柏木 美恵子
花田 磨砂也

(2014年9月22日受理)

国際熱核融合実験炉の中核加熱装置である中性粒子入射装置で使用する 25 °C から高温領域の 180 °C までの温度範囲における純水の抵抗率を測定した。抵抗率は温度とともに減少するが、100°C 以上では、純度が異なる 9 MΩ・cm の純水と 5 MΩ・cm の純水でもほぼ同じ値まで低下することが分かった。180 °C における抵抗率は 0.36 MΩ・cm であり、この値は理論純水の計算値と良い一致を示すことを確認した。

Measurement of Pure Water Resistivity in a High Temperature Region

Haruhiko YAMANAKA, Tetsuya MAEJIMA^{※1}, Yuto TERUNUMA^{※1},
Kazuhiro WATANABE, Mieko KASHIWAGI and Masaya HANADA

Department of ITER Project, Naka Fusion Institute
Sector of Fusion Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received September 22, 2014)

Resistivity of high temperature pure water has been measured up to 180°C which is the maximum water temperature in the ITER Neutral Beam Injector. The resistivity of the pure water is decreased by increasing the water temperature. It was found that even different resistivity water of 9 MΩ · cm and 5 MΩ · cm showed almost the same resistivity at the higher temperature region of 100°C. The resistivity of 0.36 MΩ · cm was measured at the temperature of 180°C. This resistivity agreed well to the calculated value for the theoretical pure water.

Keywords : ITER, Neutral Beam Injection, Resistivity, High Temperature Pure Water

※1 Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. ITER NB 高温水供給系の構成と要求事項	1
3. 高温状態での水の抵抗値測定試験装置	3
4. 高温水の抵抗測定	5
4. 1 高温水の電圧電流特性測定結果	5
4. 2 純水の抵抗率の再現性測定	7
4. 3 純度の異なる純水の温度特性比較	8
5. ITER NB 高温水供給系の温度上昇についての検討	11
6. まとめ	12
謝辞	12
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Composition and requirement of the high temperature water feeding system in the ITER NB	1
3. Test equipment for the pure water resistivity measurement of the high temperature region	3
4. Resistivity measurement of the high temperature pure water	5
4.1 Experimental results of voltage-current characteristics for the high temperature pure water	5
4.2 Confirmation test of resistivity for pure water during the measurement	7
4.3 Temperature characteristics comparison of the pure water for different purity	8
5. Estimation of temperature rise for the high temperature water feeding system in the ITER NB	11
6. Conclusion	12
Acknowledgment	12
References	12

This is a blank page.

1. はじめに

国際熱核融合実験炉(以下「ITER」という。)の中性粒子ビーム入射加熱装置(以下「NB」という。)の一部に1 MVの高電位のビーム源へ純水とガスを絶縁して供給する高電位デッキがある。この純水供給の内、負イオン源プラズマ電極を高温に維持するため、接地電位である高電位デッキ入口において180 °Cの純水を供給する高温水系がある。

純水の抵抗率は、温度上昇とともに低下することが知られているが、水素イオンと水酸化物イオン以外のイオンが全く含まない理論純水(18.25 M Ω ・cm : @ 25 °C)については、温度0 °C～100 °C、及び200 °Cと300 °Cにおける抵抗率の計算データ¹⁾は存在するが、ITER NBで使用する(5 M Ω ・cm : @25 °C)純水の150 °C～180 °Cの領域における抵抗率は明らかになっていない。さらに、高温水を供給する制御装置の設計にあたっては、純水の温度上昇で抵抗率が低下すると、さらにリーク電流が増加し、その流入電力で水の加熱が進むことが想定されるため、使用温度領域における純水の抵抗率を正確に把握しておく必要がある。

そこで、ダイバータ受入れ試験装置(DATS)の高温水循環ループにセラミック絶縁管を取り付けて室温から180 °Cの高温までの純水の抵抗率を測定した。

2. ITER NB 高温水供給系の構成と要求事項

高電位デッキは、純水及び燃料ガスを接地電位から1 MV電位の負イオン源へ絶縁して供給するための機器である。高電位デッキでは絶縁のためにセラミック絶縁管が用いられる。一本当たりの長さ約500 mmのセラミック絶縁管を11本直列につなぐことで1 MVの絶縁を保つ設計となっている。純水の供給系のうち、負イオン源プラズマ電極を高温状態に維持するために高電位デッキの入口で150 °C～180 °Cの高温水を供給する必要がある。図2.1に高電位デッキと伝送ラインのモデルを図2.2にその概略図を示す。

表2.1にITER NB高温純水供給系の仕様を示す。150 °C～180 °Cの高温で2 MPaの圧力の純水5 M Ω ・cm(@25 °C)を接地電位より1 MVの高電位に供給することが要求されている。これらの条件の純水について高温領域での抵抗率を把握することが必要である。

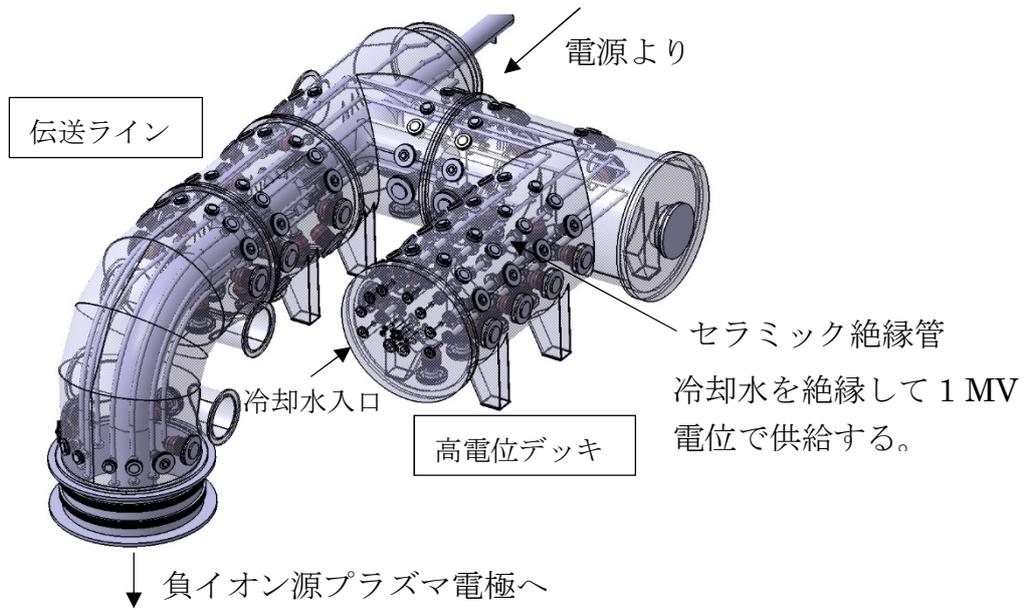


図 2.1 高電位デッキ及び伝送ラインのモデル

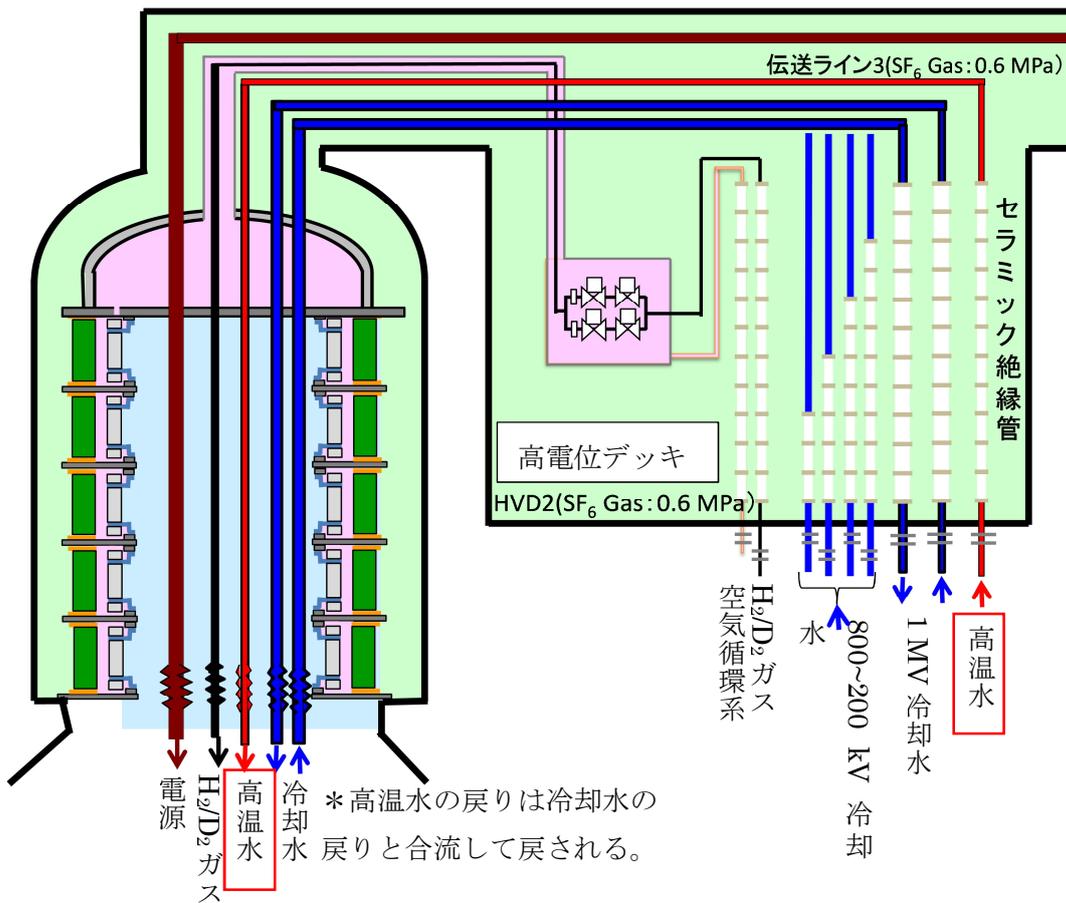


図 2.2 高電位デッキの概略図

表 2.1 ITER NB 高温純水供給系の仕様

項目	内容
絶縁性能	1 MV
入口温度	150 °C~180 °C
圧力	2 MPa
流量	0.25 kg/s
純水の抵抗率	5 MΩ・cm (@25 °C)

3. 高温状態での水の抵抗値測定試験装置

本試験で使用したセラミック絶縁管の断面図を図 3.1 に示す。セラミック絶縁管は、内直径 10 mm でセラミックスの絶縁部分の有効長さが 419 mm であり、91 kV 電位の絶縁性能を持つ。その絶縁管を 11 本直列につなぐことで 1 MV 電位の絶縁性能を持たせる。内直径は、高温水の内部を流れるリーク電流を抑制し、リーク電流による更なる加熱を抑制する目的で、できるだけ小さくすることが有利である。一方、必要な流量 0.25kg/s を満足することが必要であるため、圧力損失の条件から 10mm を内直径とした。図 3.2 にセラミック絶縁管の断面図と接続状態の写真を示す。

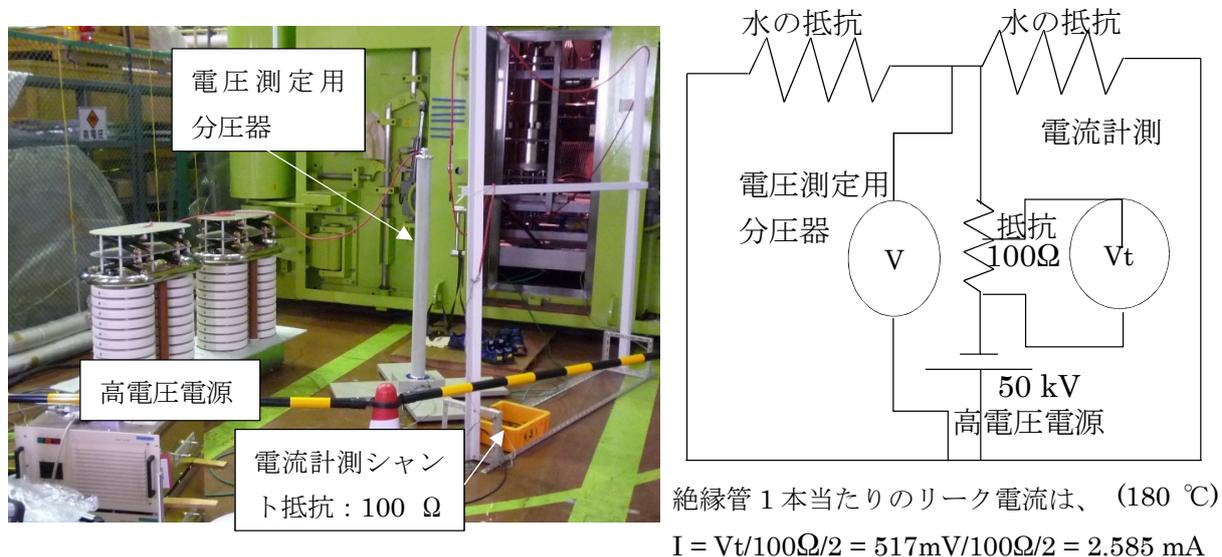


図 3.1 高温水の耐電圧試験の様子と回路図

電圧測定用分圧器により計測し、電流は、電源から試験体へ接続するラインの高電位側に 100 Ω の抵抗を接続して、その抵抗の電圧降下から求めた。試験に使用した純水は、イオン交換樹脂を通した純水である。

すでに行った常温 (15~40 °C) の冷却水における抵抗値測定試験 (40°Cの水の抵抗率 2.5 MΩ・cm) においてセラミック絶縁管 1 本当りでの絶縁性能は 110 kV(定格 91 kV の 1.2 倍) を有していることが確認されている。本試験においては抵抗率の測定が主目的であることから、印加電圧は 50 kV までとし、それぞれの温度におけるリーク電流を計測した。実測された電流はセラミック絶縁管 2 本並列に流れる電流であるため、計測した値の 1/2 が 1 本あたりに流れるリーク電流である。本試験中に水質が維持されていることを確認するために、試験体から戻ってくる高温水をクーラーで冷やした後の純水を採取して抵抗率計で測定した。図 3.3 に本試験の高温水ループと純水の抵抗率測定のための耐電圧試験概略図を示す。

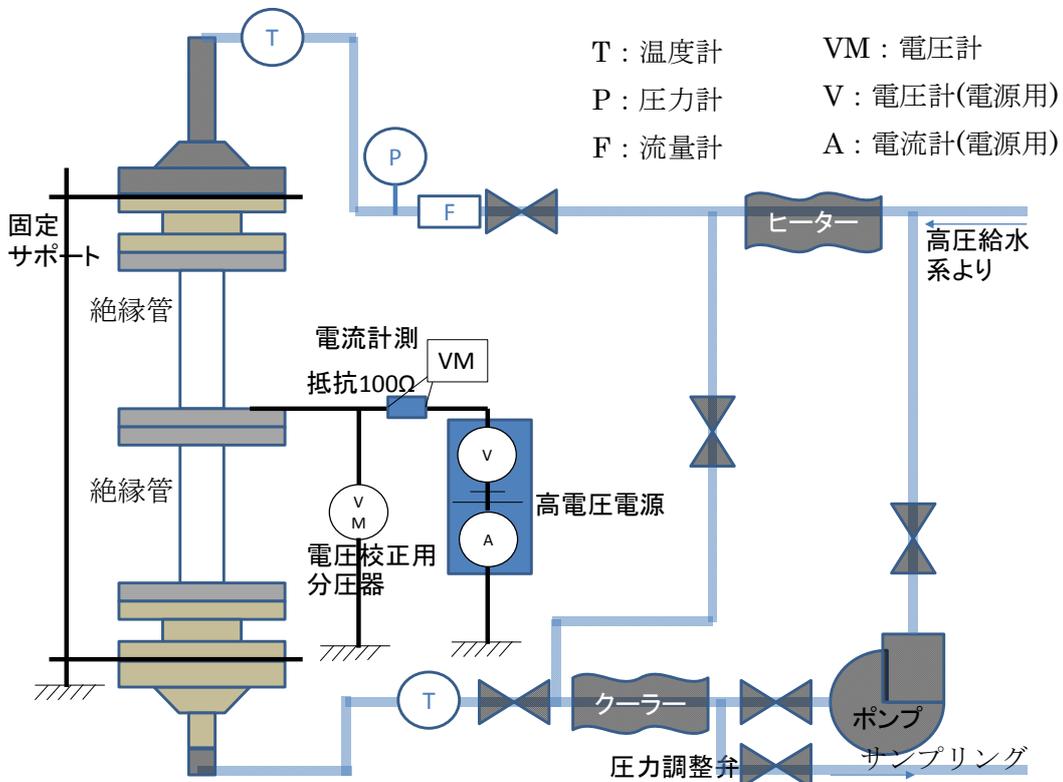


図 3.3 高温水の耐電圧試験概略図

4. 高温水の抵抗測定

4. 1 高温水の電圧電流特性測定結果

横軸に印加電圧、縦軸にリーク電流をプロットとした場合の高温水の測定結果を図

4.1.1 に示す。純水の温度を常温から約 180 °Cまで上昇させた場合の印加電圧とリーク電流の関係は、ゼロを通る傾き一定の直線を示す結果となった。このことは、各温度における純水の抵抗は、一定であることを意味しており、放電の発生などの非線形現象を含んでいないことを示している。

次にリーク電流の温度依存性を見るために、横軸に温度を縦軸にリーク電流をプロットした図を図 4.1.2 に示す。純水の温度を上昇させるにつれてその傾きが緩やかに大きくなる曲線となった。このことから、純水の抵抗率は温度依存性があることがわかる。また、抵抗率 $1/k$ として各印加電圧の時のリーク電流から算出した結果を同じグラフに示す。純水の抵抗率は、温度依存性があり、水温上昇に伴い抵抗率は指数関数的に右下がりの曲線となった。

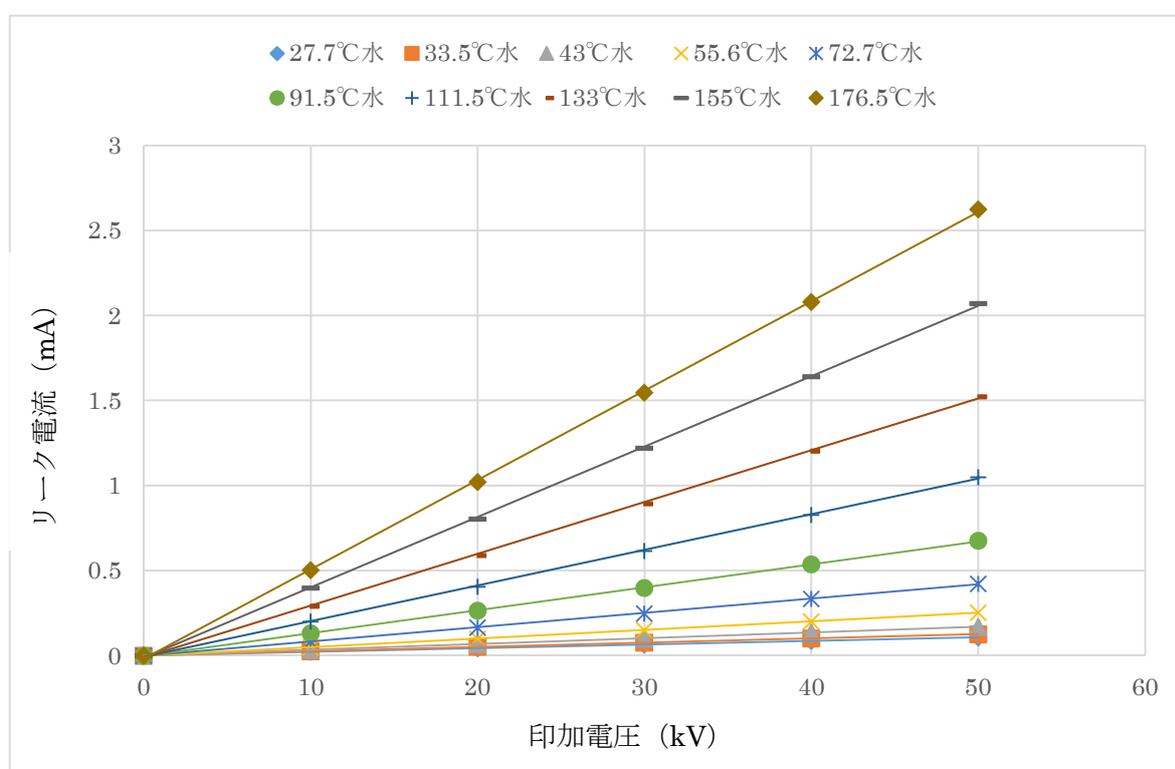


図 4.1.1 高温水の電流電圧特性

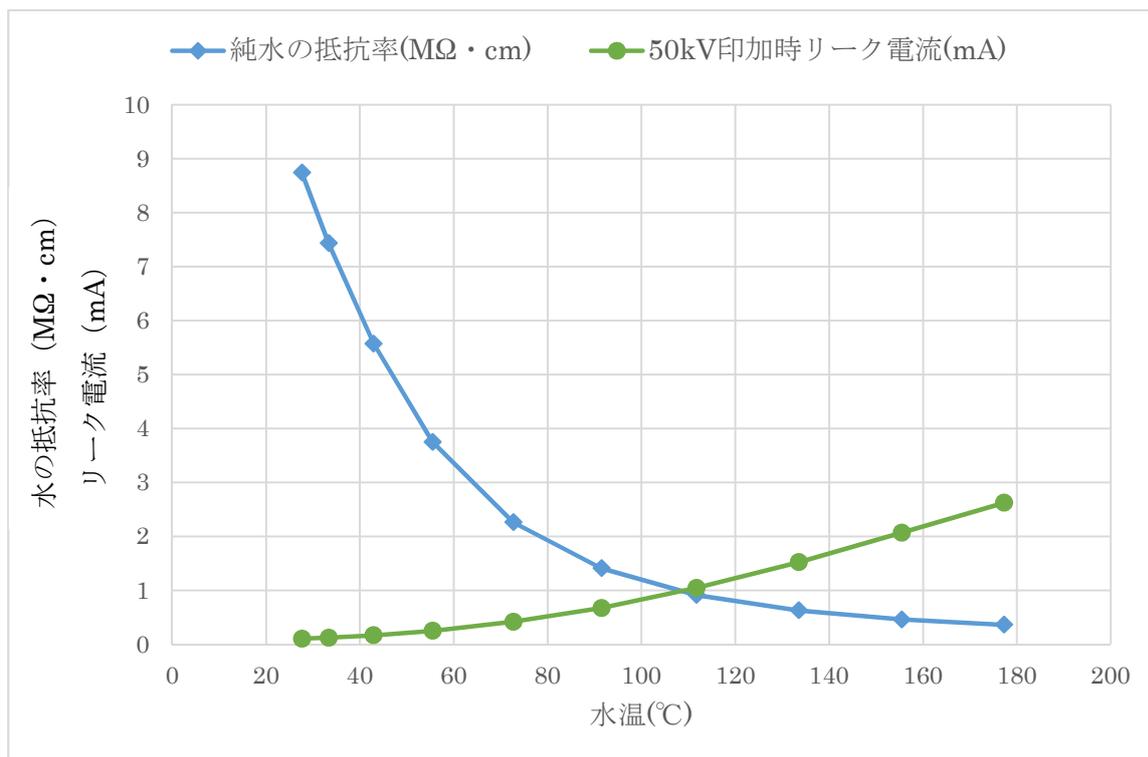


図 4.1.2 純水のリーク電流及び抵抗率の温度依存性特性

4. 2 純水の抵抗率の再現性測定

高温水の電圧電流特性の試験では、一連の測定に 180 分程度の時間を要した。この間において、水質が維持されていることを確認するために抵抗率計を用いてサンプリング水の抵抗率を測定したが、その水を空気に触れている時間及び容器に移し替える回数に依存して抵抗率が下がり、 $0.667 \sim 2.48 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm} (@ 25 \text{ }^\circ\text{C})$ と大きくばらつき、水質の維持が確認できなかった。そこで、サンプリングから抵抗率測定までの時間をできるだけ短くし、最初にサンプリング水を採取する容器で抵抗率を測定することで $3.67 \sim 4.57 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm} (@ 25 \text{ }^\circ\text{C})$ と改善したが、まだ、約 20%のばらつきがある。

そこでまず、先の試験と同じ常温における純水の抵抗率の条件で温度上昇を開始して同じ結果が得られるかどうかを確認した。次に、高温状態から温度を下降させた時の純水の抵抗率を測定して温度を上昇させた時の純水の抵抗率と変わらないことを確認した。

これらの 2 つの再現性測定を実施した結果、図 4.2.1 の通り、純水の温度を上昇させた時の結果も温度を下降させた時の結果も、先に得られた電圧電流特性の測定曲線上にのり、再現性があることを確認できた。これによって、試験中において純水の抵抗率に関する水質は、試験中に一定に維持されていたことが確認できた。

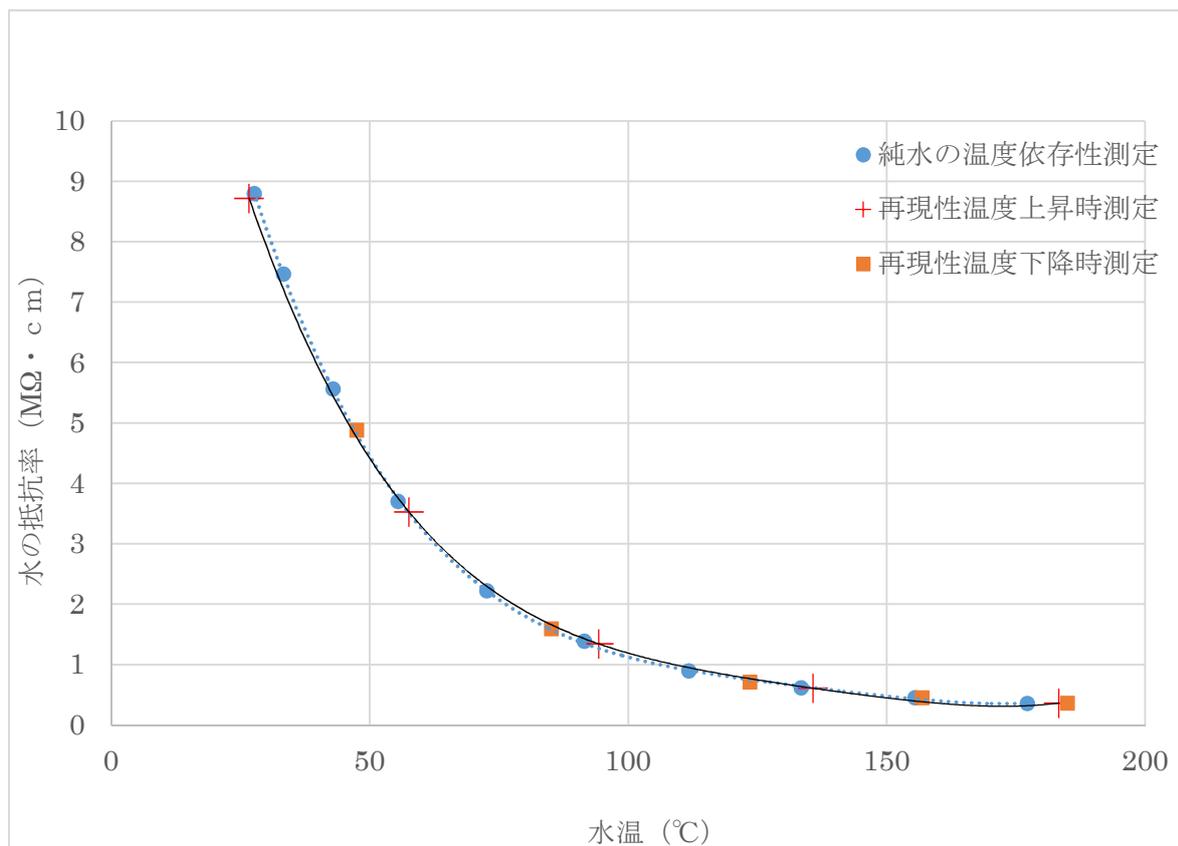


図 4.2.1 純水の抵抗率の再現性測定

4. 3 純度の異なる純水の温度特性比較

純度の異なる純水について、抵抗率の温度特性がどのように変化するか明らかにするために2種類の純度を持つ純水について抵抗率の温度依存性を測定した。図 4.3.1 に測定の結果を示す。純水の抵抗率は $9 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ (@25 °C) と $5 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ (@25 °C) について、室温から 180°C までの抵抗率を測定した。

温度が 100 °C 以下までの純水の抵抗率においては、温度上昇に伴い、その差が次第に縮まり、約 100 °C 以上の温度上昇では同一曲線上に乗る結果となった。

次に、測定中における純水の水質に変化が無いことを確認するために、高温状態から温度を下降させた場合についても抵抗率を測定した。その結果、温度を下降させた場合でも上昇させたときの抵抗率の曲線上にのり、水質が変わっていないことが確認できた。

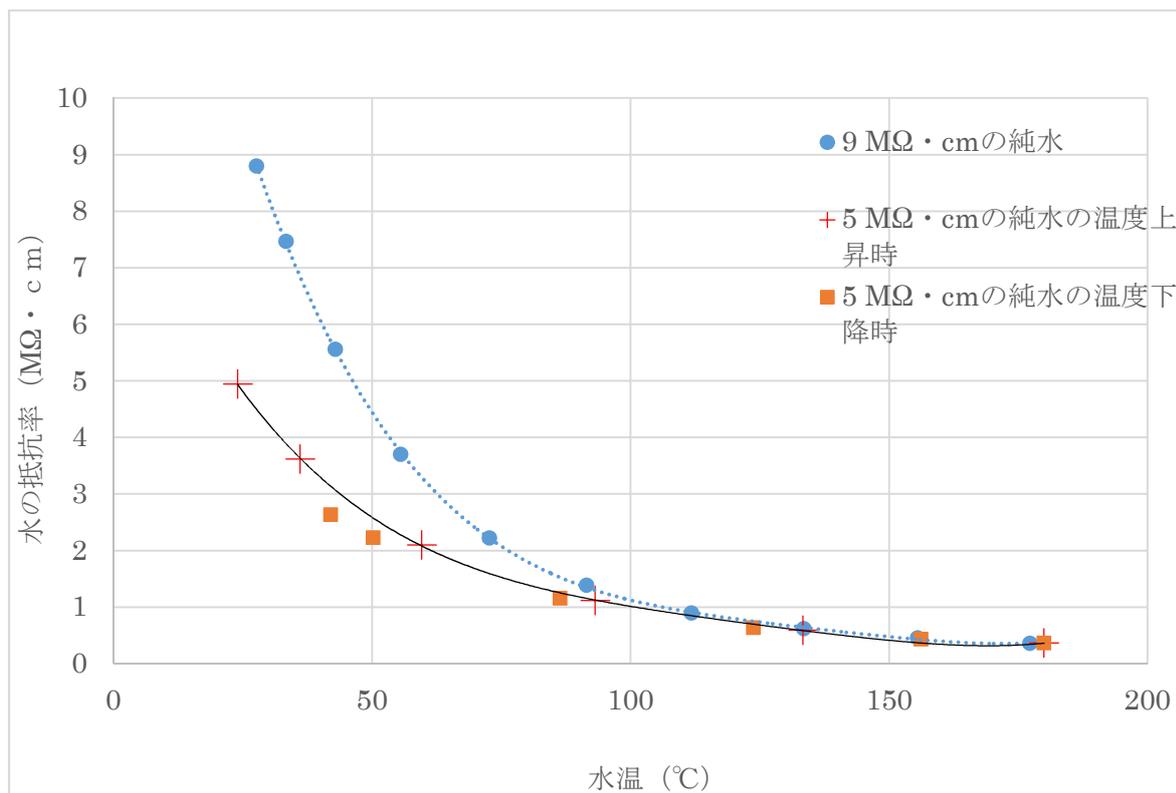


図 4.3.1 純度の異なる純水の抵抗率の温度依存特性

これらの結果より、純度の異なる純水であっても 100 °C 以上になると抵抗率はほぼ同じ値となることがわかった。

また、図 4.3.2 に本試験の結果と理論純水の抵抗率温度依存性を比較した。100 °C 以上において理論純水の抵抗率の計算値を 6 次曲線で結んだ曲線上にあり、良い一致を示すことがわかる。なお、理論純水の 200°C における抵抗率の計算値は、0.334 MΩ・cm¹⁾ である。

理論純水の抵抗率の計算式を以下に示す。

$$1/k = 1 / ((\Lambda_H \cdot [H^+] + \Lambda_{OH} \cdot [OH^-]) \cdot \rho \cdot 10^{-3}) \dots (1)$$

k : 電気伝導率 (S/cm)

Λ_H : 水素イオンの極限モル伝導率 (S・cm²/mol)

Λ_{OH} : 水酸化物イオンの極限モル伝導率 (S・cm²/mol)

[H⁺] : 水素イオンの濃度 (mol/1000g)

[OH⁻] : 水酸化物イオンの濃度 (mol/1000g)

ρ : 水の密度 (g/cm³)

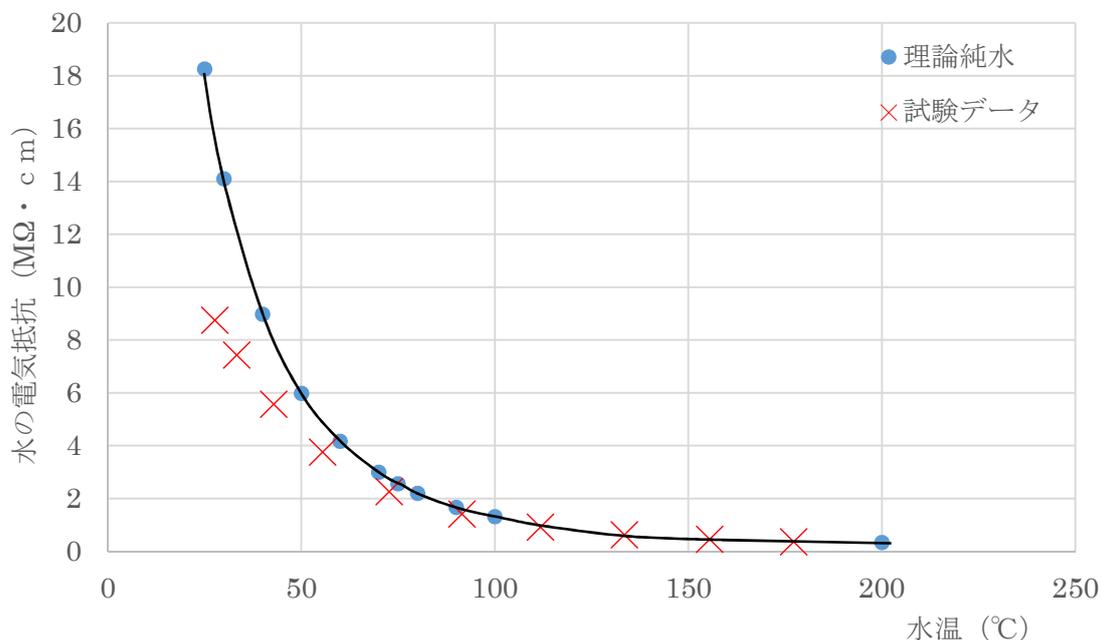


図 4.3.2 理論純水の抵抗率との比較

純水の抵抗率の温度依存性について明らかにしたが、圧力依存性についても確認した。図 4.3.3 に示すように、純水の抵抗率の圧力依存性について常温時(25 °C)と高温時(180 °C)を 0.5 MPa の範囲で圧力を変化させて測定した。

その結果、今回の測定条件の範囲では、図に示すように抵抗率の圧力依存性は無いと言える。180°Cの高温では、圧力を変えた場合、抵抗率が変化した結果となった。しかし、この変化は圧力を変化させている間にループの水温が 4 °C上昇したためで、この影響でリーク電流が 0.1 mA 変化したことによる。つまり、圧力依存性は無いと言える。表 4.3 に、リーク電流の実測値と水温の温度差についての結果を示す。

表 4.3 リーク電流の圧力依存性

	初期圧力	到達圧力	電流差	温度差	純水の抵抗率
25°C	1.5 MPa	2.1 MPa	0.003 mA	1 °C	9.8 MΩ・cm
180°C	2 MPa	2.6 MPa	0.1 mA	4 °C	0.36 MΩ・cm

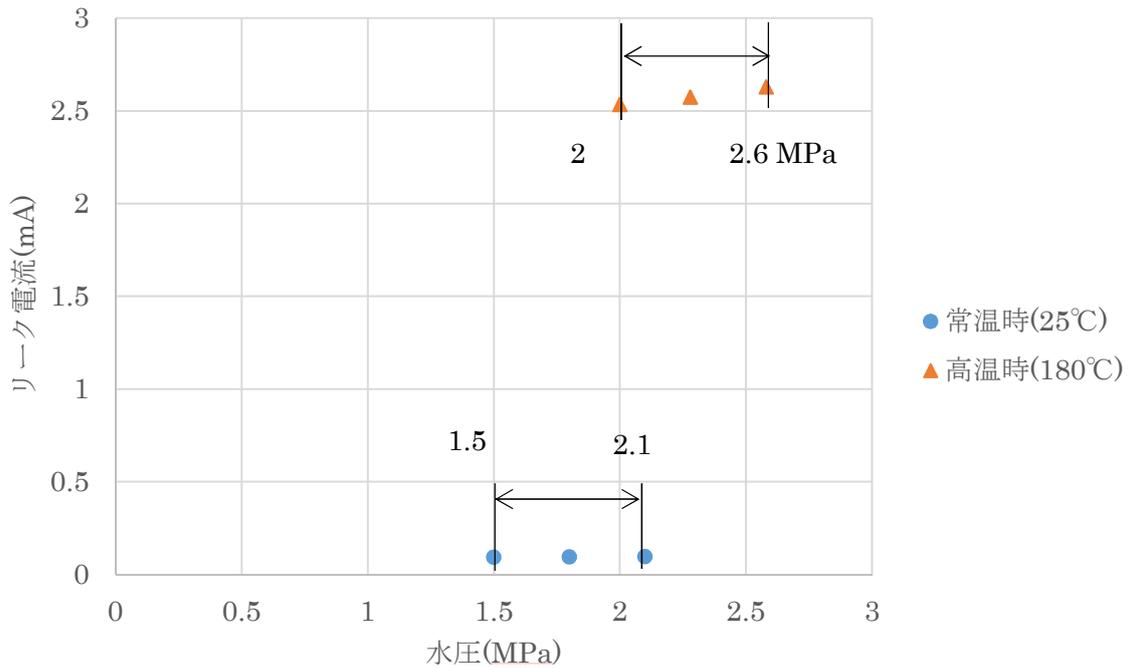


図 4.3.3 リーク電流の圧力依存性

5. ITER NB 高温水供給系の温度上昇についての検討

本実験の結果に基づき、ITER NB での高温水供給系におけるリーク電流と加熱の程度について見積もった。

ITER NB において高温水を 1 MV 電位のイオン源へ供給する場合は、1 MV の耐電圧を確保するために 11 本のセラミック絶縁管を直列に接続する。そこに圧力 2 MPa、流速 0.25 kg/s の 180 °C の高温水を流すと、以下の通りに温度上昇が計算される。

0.25 kg/s の流量の場合の 1 秒間に絶縁管を通過する水の重量 M(g)は、

$$M (g) = 0.25 \times 1000 = 250 (g)$$

流体(水)に与える熱量は、絶縁管を通る時間内のリーク電流による熱がすべて流体に与えられると考えると、

1 MV 時のリーク電流は、180°Cの純水の抵抗率が 0.36 MΩ・cm であることから 4.7 mA となる。温水に入る熱量 Q (J)は、

$$Q (J) = W (J/s) \times 1 (s) = 1 MV \times 4.7 mA \times 1 (s) = 4700 (J) \dots (2)$$

水の温度状況と熱量の関係は、

$$c (J/g \cdot K) \times \Delta T (K) = Q (J) \dots (3)$$

従って 1 秒間の温度上昇 ΔT(°C)は、

$$\Delta T (K) = Q (J) / c (J/g \cdot K) \times M (g) = 4700 / (4.2 \times 250) = 4.5 (K)$$

接地電位から 1 MV 電位までの絶縁管を通過する時間を流量から 1.45 秒と求められ、その通過する時間の水の温度上昇 ΔT (K)は、

$$\Delta T \text{ (K)} = 4.5 \text{ (K)} \times 1.45 \text{ (s)} = 6.5 \text{ (K)}$$

となる。

6. まとめ

- 1) 純水について室温から 180 °C の高温領域までの抵抗率を実測した。その結果、温度上昇とともに抵抗率は低下し、180 °C の高温水の抵抗率は 0.36 M Ω ・cm であることが分かった。
- 2) 室温において純度が異なる純水であっても、100 °C 以上の温度領域における抵抗率は同じ値で変化することが明らかになった。
- 3) 理論純水と比較しても 100 °C 以上の抵抗率は同じ値を示すことが明らかになった。
- 4) 純水の抵抗率変化に関して圧力 (1.5~2.5MPa) に対する依存性は無いことが分かった。
- 5) 測定により得た抵抗率の変化に基づき、ITER NB の高温水供給系におけるリーク電流による水温加熱の程度を見積もった。その結果、6.5 °C 程度の温度上昇であることが明らかになり、水温制御装置の設計に有益なデータが得られた。

謝辞

本研究の遂行と報告書をまとめるにあたり、有益な議論を頂いた NB 加熱開発グループの諸氏に感謝します。

試験の実施において DATS の高温水循環ループの運転指導に多大な協力をいただきました ITER トカマク本体開発グループの江里幸一郎研究主幹に感謝致します。また、本件に関する研究開発を行う機会と激励をいただきました草間義紀 ITER プロジェクト部長、森雅博核融合研究所長、山野智博核融合研究開発部門長に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 半導体基盤技術研究会編、超純水の科学、(株)リアライズ社、1990、890p.
- 2) 土田一輝*, 渡邊和弘、山中晴彦、武本純平、井上多加志、田中滋、山下泰郎 “ITER 中性粒子ビーム入射装置高電圧デッキ用ウォーターチョークの開発” 平成 23 年電気学会全国大会講演論文集, p. 230.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	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組立単位の例

組立量	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	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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

組立量	SI 組立単位			
	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	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	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	N		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	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	C		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	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	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
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
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 ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ 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。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) 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、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間は同一である。したがって、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

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角加速度	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 s A
電表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
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	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 s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	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	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

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	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=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
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベール	B	
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	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属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
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

