

高温工学試験研究炉（HTTR）の 使用済広領域中性子検出器の動作不能調査

－原因調査及び照射後試験－

Investigation on Cause of Outage of Wide Range Monitor (WRM)
in High Temperature engineering Test Reactor (HTTR)
-Post Irradiation Examination (PIE) Toward Investigation of the Cause-

篠原 正憲 茂木 利弘 齋藤 賢司 高田 昌二
石見 明洋 勝山 幸三

Masanori SHINOHARA, Toshihiro MOTEGI, Kenji SAITO, Shoji TAKADA
Akihiro ISHIMI and Kozo KATSUYAMA

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

August 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 (<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

高温工学試験研究炉（HTTR）の使用済広領域中性子検出器の動作不能調査
－原因調査及び照射後試験－

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

篠原 正憲・茂木 利弘⁺¹・齋藤 賢司・高田 昌二

石見 明洋⁺²・勝山 幸三⁺²

（2012 年 6 月 12 日受理）

2010 年 3 月の原子炉停止中に、広領域中性子検出器（WRM）が開発時の動作実績期間より短い使用時間で動作不能となる事象が発生した。本事象の原因調査を行い、WRM の使用期間を向上させることは高温ガス炉の基盤技術開発において重要である。そこで、事象発生部位の特定及び破損原因を調査するため、製作メーカーにて WRM 模擬試験体を製作し、短絡状態を模擬した特性インピーダンス波形測定並びに照射燃料集合体試験施設（FMF）にて高エネルギー X 線 CT 検査装置を用いた照射後試験（PIE）を実施した。

本報告書は、WRM の動作不能の原因調査及び PIE 結果をまとめたものである。

Investigation on Cause of Outage of Wide Range Monitor (WRM)
in High Temperature engineering Test Reactor (HTTR)
— Post Irradiation Examination (PIE) Toward Investigation of the Cause —

Masanori SHINOHARA, Toshihiro MOTEGI⁺¹, Kenji SAITO, Shoji TAKADA,
Akihiro ISHIMI⁺² and Kozo KATSUYAMA⁺²

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

(Received June 12, 2012)

An event, in which one of WRM's were disabled to detect the neutron flux in the reactor core, occurred during the period of reactor shut down of HTTR in March, 2010. The actual life time of WRM was unexpectedly shorter than the past developed life time. Investigation of the cause of the outage of WRM toward the recovery of the life time up to the past developed life is one of the issues to develop the technology basis of High Temperature Gas cooled Reactor (HTGR).

Then, two experimental investigations were carried out to reveal the cause of the outage by specifying the damaged part causing the event in the WRM. The one is a post irradiation examination using the X-ray computed tomography scanner in Fuels Monitoring Facility (FMF) to specify the damaged part in the WRM. The other is an experiment using a mock-up simulating the WRM fabricated by the fabricator. The characteristic impedance of the damaged WRM was measured by Time Domain Reflectometry, which was compared with that of the mock-up, which could narrow down the damaged part in the WRM.

This report summarized the results of the PIE and the experimental investigation using the mock-up to reveal the cause of outage of WRM.

Keywords: HTTR, FMF, Wide Range Monitor, Post Irradiation Examination

⁺¹ Safety Administration Department

⁺² Fuels and Materials Department

目次

1. 緒言	1
2. 高温工学試験研究炉（HTTR）の中性子計装	2
2.1 概要	2
2.2 広領域中性子検出器（WRM）の耐熱構造	2
3. 時間分域反射率測定（TDR）法による動作不能箇所の絞込み調査	4
3.1 目的及び方法	4
3.2 模擬試験体の測定結果	4
3.3 広領域中性子検出器（WRM）測定結果	4
4. 照射燃料集合体試験施設（FMF）における試験装置	5
4.1 照射燃料集合体試験施設（FMF）の概要	5
4.2 高エネルギーX線 CT 検査装置	5
5. 照射後試験（PIE）	6
5.1 目的及び方法	6
5.2 照射後試験（PIE）結果	6
6. 結言	8
謝辞	8
参考文献	9

Contents

1. Introduction	1
2. Neutron Instrumentation of HTTR	2
2.1 Outline	2
2.2 Heat Resistance Structure of WRM	2
3. Narrowing the place inoperative survey by TDR	4
3.1 Objectives and Methods	4
3.2 Measurement results of the Mock Specimen	4
3.3 Measurement Results of WRM	4
4. Exam Device of FMF	5
4.1 Outline of FMF	5
4.2 High Energy X-ray Computed Tomography Scanner	5
5. PIE	6
5.1 Objectives and Methods	6
5.2 Results of PIE	6
6. Conclusion	8
Acknowledgement	8
References	9

This is a blank page.

1. 緒言

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、高温ガス炉技術基盤の確立及び高度化を図ることを目的として、我が国で初めての高温ガス炉（HTGR：High Temperature Gas Reactor）である高温工学試験研究炉（HTTR：High Temperature engineering Test Reactor）を建設し⁽¹⁾、2004年4月に原子炉出口冷却材温度 950℃の運転を達成し⁽²⁾、2010年1月から3月にかけて高温連続運転を完遂し⁽³⁾、HTGRの基本特性データを取得した。HTTRの主要諸元を Table 1.1 に示す。

HTTR の中性子計装の一つである核分裂計数管・電離箱型である広領域中性子検出器（WRM：Wide Range Monitor）は、原子炉圧力容器内に設置され、約 450℃の高温環境下で原子炉の起動から中間出力領域までの熱中性子束を計測できるように開発されたものである⁽⁴⁾。HTTR 用 WRM は、JRR-4 等での長期作動試験の動作実績⁽⁵⁾は 600℃の高温環境下で 404 日間であった。

2010 年 3 月の原子炉停止中に 3 台の WRM のうち ch.2、ch.3 が動作不能となった。当該 WRM は、使用開始後からの定格出力換算日数は約 140 日であった。開発時の動作実績期間より短い期間で動作不能事象が発生したことから、動作不能箇所の特定及び原因調査を行い WRM の改良に役立てる目的で、当該 WRM の詳細な調査を行うこととした。

2010 年 4 月に実施した絶縁抵抗測定、静電容量測定及び特性インピーダンス波形観察等の電氣的調査により Fig.1.1 に示す WRM 概略図の無機絶縁ケーブル（MI ケーブル：Mineral Insulated Cable）端子側の接続箇所 d から接続箇所 f の範囲に動作不能の原因があることを明らかにした。そこで、電氣的調査結果の確認及び検出器高度化のための技術開発を目的に、高エネルギー X 線 CT 検査装置を用いた照射後試験（PIE：Post Irradiation Examination）を実施するため、照射燃料集合体試験施設（FMF：Fuels Monitoring Facility）へ動作不能となった WRM を輸送した⁽⁶⁾。

これと並行して、原因調査の一環として、製作メーカーにて WRM 模擬試験体を製作し、短絡状態を模擬した特性インピーダンス波形測定を実施し、短絡箇所にインピーダンスの最大値が発生することを明らかにした。

2011 年 2 月から 3 月にかけて実施した PIE では、FMF の高エネルギー X 線 CT 検査装置により、WRM の透過像撮影及び断層像撮影を実施し、検出器本体に接触不良につながる変形等の構造上の問題はないこと、Fig.1.1 に示す接続箇所 f 部近傍のリード線に異常が発生していることを明らかにした。

本報告書は、WRM の動作不能の原因調査及び PIE 結果をまとめたものである。

2. 高温工学試験研究炉（HTTR）の中性子計装

2.1 概要

原子炉の中性子計装は、核分裂によって生ずる中性子が形成する中性子束を直接測定し、核反応に関する情報を速やかに得ることを目的としている。HTTR の中性子計装は、広領域中性子計装と出力領域中性子計装の 2 系統からなり、原子炉の起動領域から定格原子炉出力の 120% までの中性子束レベルを測定する。HTTR は炉内温度が高いことから、炉心内ではなく固定反射体に広領域中性子計装を、压力容器の外側に出力領域中性子計装をそれぞれ設置している。それぞれの中性子検出器の装荷位置及び測定出力範囲を Fig.2.1 及び Fig.2.2 に示す。WRM は、Fig.2.1 に示すように原子炉压力容器内の固定反射体ブロックの上部に 3 台設置され、定格運転時約 450℃、事故時約 550℃の高温ヘリウム雰囲気で使用される。

WRM は、原子炉の停止状態から定格出力の 30%(9MW)までの中性子束を計測し、また異常な出力上昇に対して原子炉スクラム信号を発信するために用いられる。WRM は 30%出力までをカバーすることとなっているが、定格運転時においても WRM を炉外に取出さないため、100%出力運転時でも WRM がその健全性を保てることを示す必要がある。また、WRM は原子炉の未臨界の確認のためにも使用されるため、低温未臨界時に所定レベル以上の計数率を確保できることを確認する必要がある。HTTR ではこれらの条件を満たすべく、中性子源及び WRM 感度等の諸元を決定している。WRM の基本仕様を Table2.1 に、外観写真及び外観図を Fig.2.3、Fig.2.4 に示す。

WRM は、核分裂電離箱を使用しているため、出力の低い起動領域では核分裂計数管としてパルス計数法で、原子炉出力の比較的高い領域では電流のゆらぎを利用したキャンベル法で計測するワイドレンジモニタであり、1 台の WRM で 10 桁の中性子束領域を測定することができる。

2.2 広領域中性子検出器（WRM）の耐熱構造

HTTR の WRM は、高温環境下で長期にわたり正常に動作し、破損や劣化の生じないものとするため、以下に示す構造上種々の工夫を行った⁽⁷⁾。

- (1) 電極は同筒形とし、膨張係数の差により発生する半径方向のギャップを小さくするため、電極を支持するセラミック絶縁物は、小径の棒状とし電極円筒軸上に設置した。
- (2) 高温でのばねの緩和に伴う問題を避けるため、電極間などの軸方向の寸法誤差や熱膨張差を吸収するためのばねは設けず、電極は片端を固定し、他端は軸方向の運動を自由に許す摺動構造とした。
- (3) 容器は二重構造とし、電極を含む計数管本体部分は独立な内側気密容器に収納し、内側と外側の容器の間には、内側容器内の電離ガスと等しい圧力のガスを封入した。内側容器の内外で圧力がバランスしているため、内側容器には圧力がかからず、信号線引出しのため内側容器の一部を形成する金属－セラミックシールは、高温にしても内圧の上昇により破損することはない。なお、金属－セラミックシールは封着部の形状寸法に改良を加えた結果、常温－700℃の急熱急冷熱サイクルに耐えるものとなっている。
- (4) 濃縮ウランは、対抗する電極の両表面にコーティングしてあるので、片側のみコーティングしたものに比べ、中性子感度とガンマ線感度の比がほぼ 2 倍改善されている。また同じ中性

子感度を得るのに電極径などの工作精度に対する要求は緩和される。

- (5) WRM 信号ケーブルには耐熱性の観点から MI ケーブルを使用し、二重構造の外側容器に 2 本の MI ケーブルが一体的に接続されている。そのため、コネクタに付随して生じる接触不良や放電パルスノイズ発生の問題から解放されている。また陰陽電極にそれぞれ独立にケーブルを取付けているので、高電圧の供給と信号の取出しが別々に行え、直流電流計測も精度良く行える。
- (6) MI ケーブルの構造は三同軸であり、中心導体は銅クラッドインコネル、内側のシールド導体、銅パイプ及び外側のシールド導体はインコネルである。高温での安定性の観点からは、すべてインコネルを使用するのが好ましいが、パルス伝送特性や外来雑音に対する耐性の観点からは、固有抵抗の小さい銅が好ましく中心導体と内側シールド導体にはあえて銅を使用している。

3. 時間分域反射率測定（TDR）法による動作不能箇所の絞込み調査

3.1 目的及び方法

製作メーカーにて WRM 模擬試験体を製作し、エレメント端子側を短絡させた場合（Case A）と、MI ケーブル端子側を短絡させた場合（Case B）の2つの状態を模擬して、TDR¹法による特性インピーダンス波形測定し、短絡箇所の違いによる観測波形の相違を確認した。Fig.3.1 に TDR 法による測定方法と条件を示す。

また、動作不能となった WRM（ch.2 及び ch.3）において 2010 年 4 月に実施した TDR 法による特性インピーダンス波形測定結果と比較することで動作不能箇所の絞込みを行った。

3.2 模擬試験体の測定結果

TDR 法によるインピーダンス波形測定において、正常な状態では、MI ケーブルのインピーダンスは一定であり、MI ケーブル端子部 f からインピーダンスが増加し、エレメント電極接続部 a で最大値を示すことを確認した。

正常な状態と比較して、Case A はエレメント内部リード線の長さに相当するだけ、インピーダンスの最大値を示す位置が MI ケーブル端子側に移動した。Case A の測定結果を Fig.3.2 に示す。また、Case B では、インピーダンスの最大値を示す位置が MI ケーブル側から MI ケーブル内部リード線の長さに相当する位置に移動した。Case B の測定結果を Fig.3.3 に示す。

観測波形 Case A 及び Case B より、短絡させた箇所にインピーダンスの最大値が発生することを確認した。

3.3 広領域中性子検出器（WRM）測定結果

2010 年 4 月、スタンドパイプ室の WRM ケーブルコネクタ部から、ch.2 及び ch.3 の HV 側の特性インピーダンスを測定した。測定結果をそれぞれ Fig.3.4 及び Fig.3.5 に示す。

模擬体を用いた測定結果と、ch.2 の測定結果を比較すると、接触不良部に現れる特性インピーダンスの急激な上昇が MI ケーブル端子部側にあること、エレメント端子部側でのインピーダンス波形に変化がないことが分かる。これより、接続箇所 a 及び b は、健全であると推定される。したがって、接触不良が発生している場所は、接続箇所の c から f までの範囲内にあることを明らかにした。

また、模擬体を用いた測定結果と ch.3 の測定結果を比較すると、ch.3 の特性インピーダンスについても、MI ケーブルのインピーダンスが立ち上がる近傍で、インピーダンスが急激に上昇していることから、模擬試験により確認した MI ケーブル端子部近傍で断線している可能性が高い。したがって、ch.2 と同様に、断線が発生している場所は、接続箇所の c から f までの範囲内にあることを明らかにした。

¹ TDR（Time Domain Reflectometry：時間分域反射率測定）：ケーブル障害の試験方法の一つで、パルスケーブルの片端から送信すると、ケーブルにインピーダンスの変化があれば、パルスの一部が反射することを利用して、障害位置の特定や障害内容（断線、短絡等）が判断できる機器。

4. 照射燃料集合体試験施設 (FMF) の試験装置

4.1 照射燃料集合体試験施設 (FMF) の概要

原子力機構大洗研究開発センターFMFでは、高速増殖炉燃料の開発のために、主に高速実験炉「常陽」で使用された燃料集合体や燃料要素の非破壊試験などを実施し、健全性などを確認している。本施設は1978年から操業を開始し、これまで200体を超える燃料集合体などの検査を実施し、高速増殖炉燃料の開発に必要なデータを取得している。

4.2 高エネルギーX線CT検査装置⁽⁸⁾

FMFには、燃料集合体内に装填されている燃料要素の配置状況を把握するために開発した高エネルギーX線CT検査装置が1999年6月から稼働している。Fig.4.1に高エネルギーX線CT検査装置の概略図を、Table 4.1に主な仕様を示す。本装置はスキャナ、試料駆動機構、画像処理計算機及び中央制御盤等で構成される。試験体は、試料駆動機構によりCTダクト管を通してスキャナに送られる。スキャナは試験体を中心に旋回し、各方向のX線透過データを取得し、それら透過データから画像再構成によりCT画像を作成している。

照射した燃料集合体を撮像するためには、燃料集合体を構成する燃料ペレット、被覆管、ラッパ管等の様々な物質をX線が透過する必要がある。また、照射した燃料集合体からノイズの原因となる高い γ 線が放出されることから、この γ 線に対し透過X線の強度を相対的に高め、その影響を低減させる必要がある。このため最大12MVの高エネルギー高出力X線発生装置を採用し、さらにこの発生装置がパルス状のX線を発生させることが出来ることに着目し、パルス状のX線と同期したX線検出システムを導入することで、検出器に入射する燃料集合体からの γ 線の影響を低減している。

さらに2010年の開発では、この既存の装置に、燃料要素内の燃料ペレットの状況をさらに詳細に観察するために高解像度X線CT検査技術を適用し、高解像度化を実現した。開発にあたっては、X線の検出器をX線源に対し扇状に100個配置して、従来の3倍以上に増やした。また、X線を絞り込み画像性能を確保するために検出器の前にはスリット付きのタングステン製コリメータを設置していたが、このスリット幅を従来の3分の1となる0.1mmで加工する技術を確認し、100本設けることに成功した。これらにより、CT画像の1画素の大きさを世界最高レベルの高い解像度0.1mm角にまで微細化でき、非常に小さな空孔や空隙の存在といった燃料要素の内部状況を鮮明な画像で観察することが可能となった。Fig.4.2に高解像度化に伴う模擬試験体のCT画像の比較を示す。

本装置では、最大12MVの高エネルギーX線を利用していることから、鉄換算厚さ約20cm程度の構造物を高精度で内部観察することが可能であり、今後、本技術を一般の工業製品の非破壊検査に利用することにより、その品質向上に貢献することも期待されている。

5. 照射後試験 (PIE)

5.1 目的及び方法

WRM の動作不能箇所を特定するため、高エネルギーX線 CT 検査装置を用いた非破壊検査により、WRM の動作不能箇所を観察した。

はじめに、高エネルギーX線 CT 検査装置により WRM 全域の透過像撮影を実施し、検出器内部の全体構造、接続部の位置等を観察する。その透過像撮影の位置データをもとに Fig.1.1 に示す MI ケーブル端子側の接続箇所 b から接続箇所 f の範囲を 0.5mm ピッチ (コリメータ : 2mm) で撮影し、動作不能箇所を確認した。

また、高エネルギーX線 CT 検査装置は、高速実験炉「常陽」で使用された燃料集合体や燃料要素の非破壊試験を円滑に実施できるように設計されており、HTTR から輸送した WRM をそのまま装置に設置することが出来ない。このため WRM を高エネルギーX線 CT 検査装置へ設置するための取合いを考慮した HTTR 用 XCT 設置治具を製作した。Fig.5.1 に HTTR 用 XCT 設置治具概念図を示す。

PIE には WRM 製作メーカーの担当者も立ち会い、X線 CT 検査を実施する部位の確認や試験結果の評価を JAEA と共同して行った。

5.2 照射後試験 (PIE) 結果

(1) 透過像撮影結果

検出器内部の全体構造、接続部の位置等の観察及び検出器本体に変形や損傷がないことを確認するため、WRM 全域の透過像撮影を実施した。

透過像撮影結果より、検出器内部の全体構造、接続部の位置等が確認でき、断層像撮影のための位置データを取得することが出来た。また、WRM ch.2、ch.3 とともに検出器本体には動作不能につながる変形などの構造上の問題は見られなかった。

(2) 断層像撮影結果

透過像撮影の位置データをもとに、接続箇所 b から接続箇所 f の範囲の健全性を確認するため、検出器エレメント端子部と MI ケーブル部の間を 0.5mm ピッチ (一部 0.2mm ピッチ) で断層像撮影を実施した。WRM ch.2 及び ch.3 の接続箇所 b から接続箇所 f の観察結果をそれぞれ Fig.5.2 及び Fig.5.3 に示す。

ch.2 については、接続箇所 f 近傍の HV 側のリード線に、CT 値²が著しく低下している箇所が観測された。CT 値の低下は、クラックや線径の低下等によりリード線の空間密度の低下が起きている箇所であり、接触不良の可能性が大きい。接続箇所 f 近傍における、HV、SIG 側のリー

² CT 値 (Computed Tomography number : コンピュータ断層撮影値) : 単位体積に含まれる物質の平均吸収値であり、被写体の密度の違いによりエックス線吸収値が異なることを利用して数値化したものである。CT 値は水を基準として、水の CT 値を 0、空気を-1000 にしており、CT 値が高いものは白、低いものは黒で描出される。

ド線の CT 値を健全部の CT 値により規格化³して、Fig.5.4 に比較して示す。それ以外に異常は見られなかった。

ch.3 についても同様に、接続箇所 f 近傍の HV 側の Ni 線に、CT 値が著しく低下している箇所が観測され、接触不良の可能性が大きい。接続箇所 f 近傍における、HV、SIG 側のリード線の CT 値を健全部の CT 値により規格化して、Fig.5.5 に示す。それ以外に異常は見られなかった。

断層像撮影結果より、ch.2 及び ch.3 で CT 値の低下が確認され、接続箇所 f 近傍でリード線に異常が発生していることが確認できた。TDR 法による動作不能箇所の絞込みと断層像撮影結果から、ch.2 及び ch.3 の動作不能の発生箇所は、両者ともに接続箇所 f 近傍の HV 側のリード線であると特定した。

³ 健全部の CT 値による規格化：健全と判断されている検出器エレメント端子部の Ni 線の CT 値の平均値により規格化した。これにより、Ni に欠損がなければ規格化 CT 値は 1.0 となり、リード線の断線、線径の低下、傾斜があれば、CT 値は 1.0 より低下する。

6. 結言

WRM の動作不能事象の原因調査の一環として、模擬試験体における TDR 法による動作不能箇所、絞込み調査及び PIE 結果から、WRM ch.2 及び ch.3 の動作不能の発生箇所は、両者ともに接続箇所 f 近傍の HV 側のリード線であると特定した。

謝辞

WRM の原因調査及び PIE にあたっては、HTTR 運転管理課、HTTR 技術課及び燃料材料試験部 集合体試験課 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。

また本報をまとめるに当たり有益な助言をいただいた高温工学試験研究炉部 藤本研究主幹に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 斎藤伸三 他, “Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)” , JAERI 1332,(1994)
- (2) 高松邦吉 他, “高温工学試験研究炉の出力上昇試験（高温試験運転）－試験方法及び結果の概要－” , JAERI-Tech 2004-063,(2004)
- (3) Masanori Shinohara, et al., “LONG-TERM HIGH-TEMPERATURE OPERATION IN THE HTTR (1) OUTLINE AND MAIN TEST RESULTS” , HTR2010, Prague, Oct. 18-20, 2010
- (4) N.Wakayama,et.all : 「 Development of experimental VHTR instrumentation 」 IAEA-IWGGCR June,(1982)
- (5) 若山直昭、他 : 「高温ガス炉計装用各種センサーの現状と開発研究課題」 日本原子力学会 Vol.22,(1980)
- (6) 篠原正憲 他, “高温工学試験研究炉（HTTR）の使用済広領域中性子検出器の動作不能調査－原因調査及び輸送作業－”, JAEA-Technology 2012-025,(2012)
- (7) 友田利正、他 : 「原子炉核計装用高温核分裂計数管 電離箱の開発」 三菱電機技報 vol.57,(1983)
- (8) 勝山幸三、他 : 「超高解像度高エネルギーX線 CT 検査装置の開発」 日本興業出版 検査技術 2月号,(2011)

Table 1.1 HTTR の主要諸元

原子炉熱出力	30MW
1 次冷却材	ヘリウムガス
原子炉入口冷却材温度	395℃
原子炉出口冷却材温度	850℃（定格運転時） 950℃（高温試験運転時）
1 次冷却材圧力	4MPa
炉心構造材	黒鉛
炉心有効高さ	2.9m
炉心等価直径	2.3m
出力密度	2.5MW/m ³
燃料	二酸化ウラン・被覆粒子/黒鉛分散型
ウラン濃縮度	3～10%（平均 6%）
燃料体形式	ブロック型
原子炉圧力容器	鋼製（2.25Cr-1Mo 鋼）
冷却回路数	1 ループ（中間熱交換器及び加圧水冷却器）

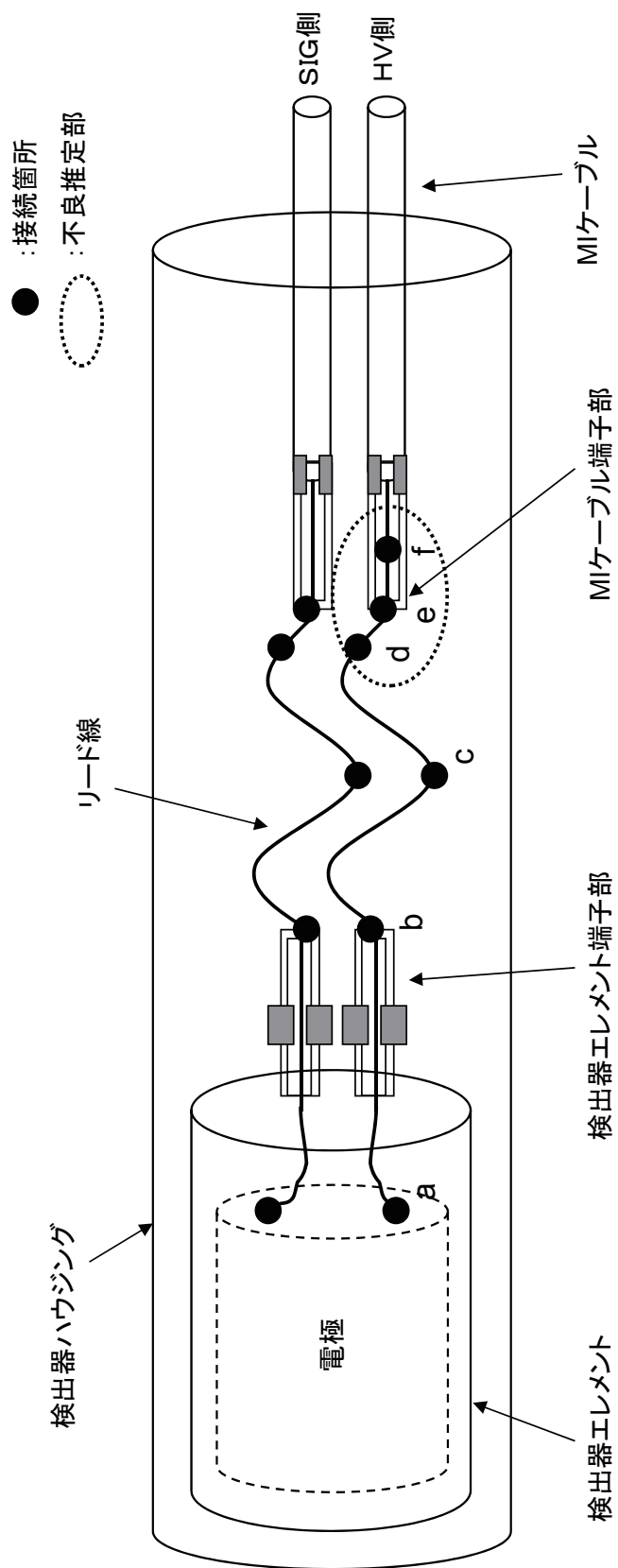


Fig.1.1 WRM 概略図

Table2.1 HTTR 広領域中性子検出器仕様

項目	仕様
1. 寸法	
(1) 外径	$\phi 38\text{mm}$
(2) 検出器全長	387mm
(3) ケーブル長	約8m
2. コネクター	TRC-3SP-M
3. 材料	
(1) 主要材料	インコネル
(2) 電離箱絶縁材	アルミナセラミック
(3) 中性子有感物質	濃縮ウラン
(4) 封入ガス	Ar+N ₂ +He
4. 絶縁抵抗	
(1) HV極C- I	$10^{10}\Omega$ 以上
(2) SIG極C- I	同上
(3) I - O (共通)	$10^8\Omega$ 以上
5. 使用条件	
(1) 周囲温度	通常時: 450℃
	事故時: 550℃
	(ただし、コネクタ部は80℃)
(2) 熱中性子束	$1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
(3) γ 線束	$1 \times 10^8 \text{Gy/h}$
(4) 最高使用圧力	4.7MPaG
6. 動作定格	
(1) 動作電圧	約300V
(2) 熱中性子感度(パルス)	$0.1 \text{cps} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \pm 20\%$
(3) 熱中性子感度(直流)	$\text{約} 1.6 \times 10^{-14} \text{A} / (\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \pm 20\%$
(4) 電流パルス	$1.6 \mu \text{A}$
(5) 電荷パルス	$6.5 \times 10^{14} \text{C}$
(6) 電荷収集時間	150ns以下

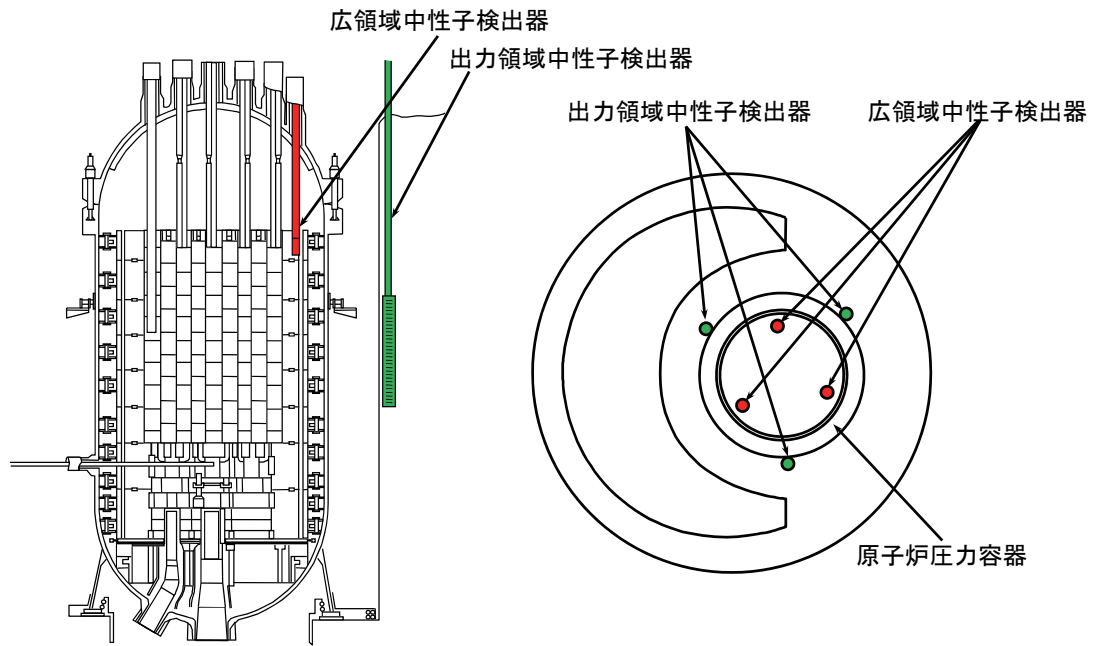


Fig.2.1 中性子検出器の配置図

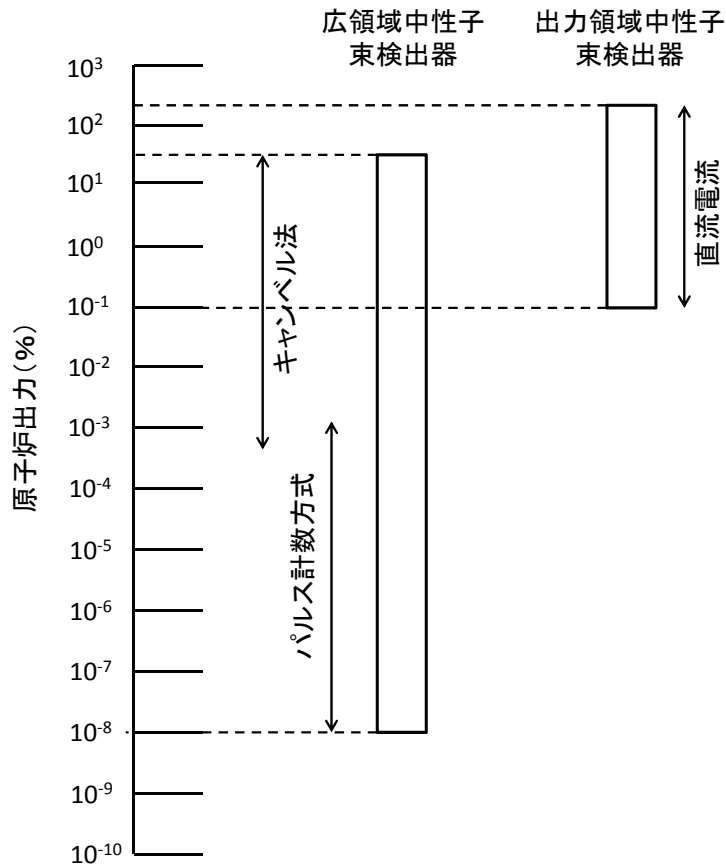


Fig.2.2 HTTR 中性子計装の測定出力範囲

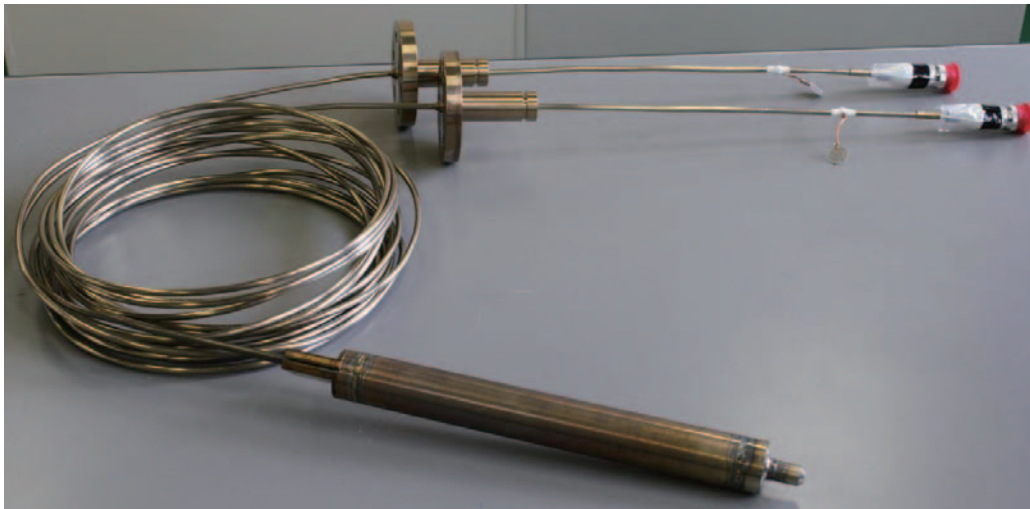


Fig.2.3 WRM 外観写真

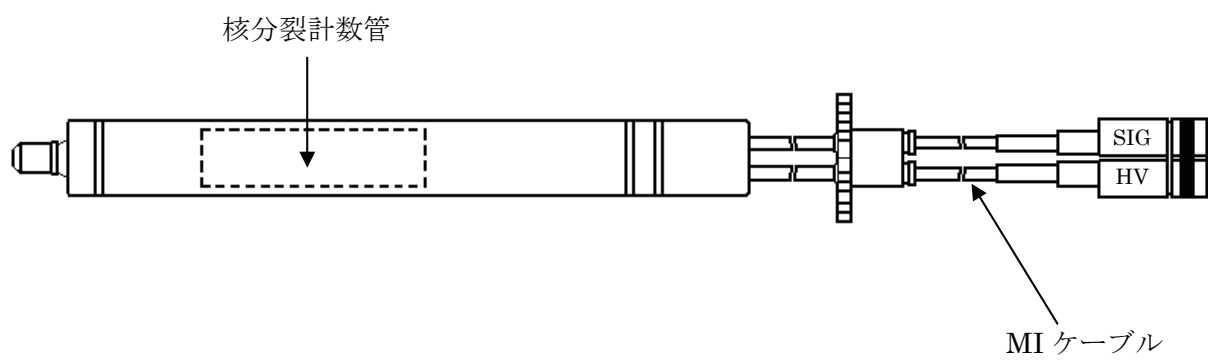


Fig.2.4 WRM 外観図

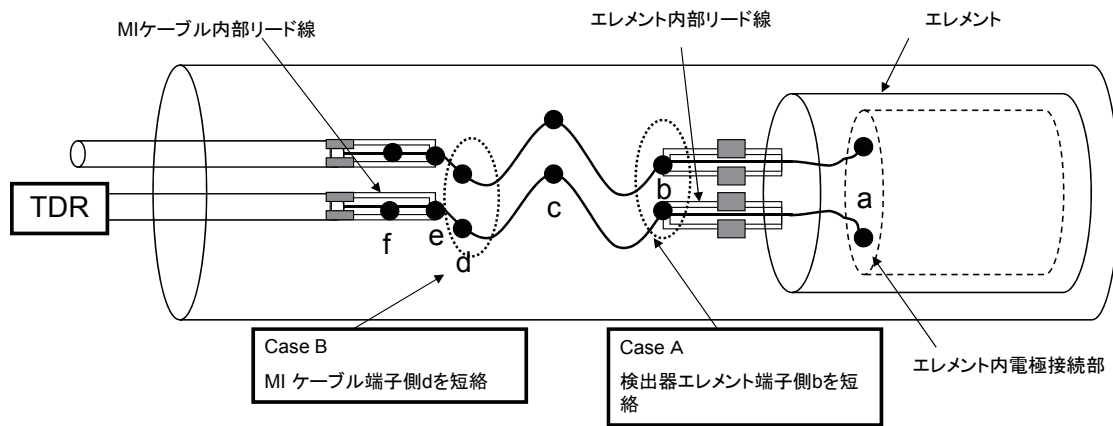


Fig.3.1 TDR 法による試験方法と条件

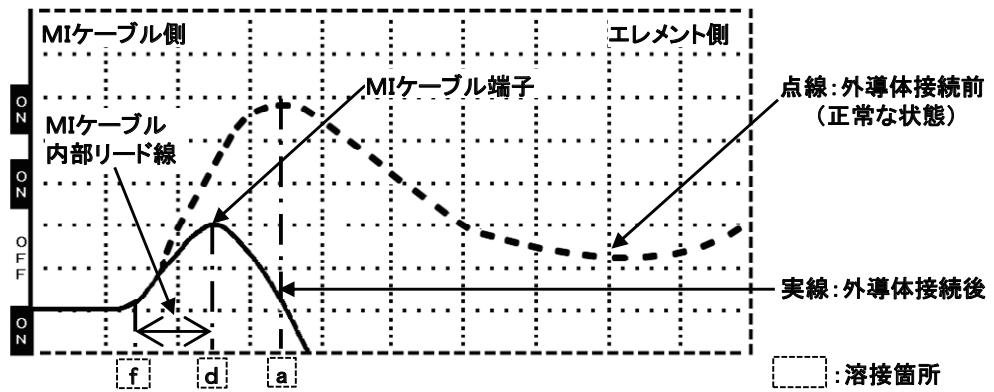


Fig.3.2 MI ケーブル端子側 d で短絡させた場合 (Case A) の測定結果

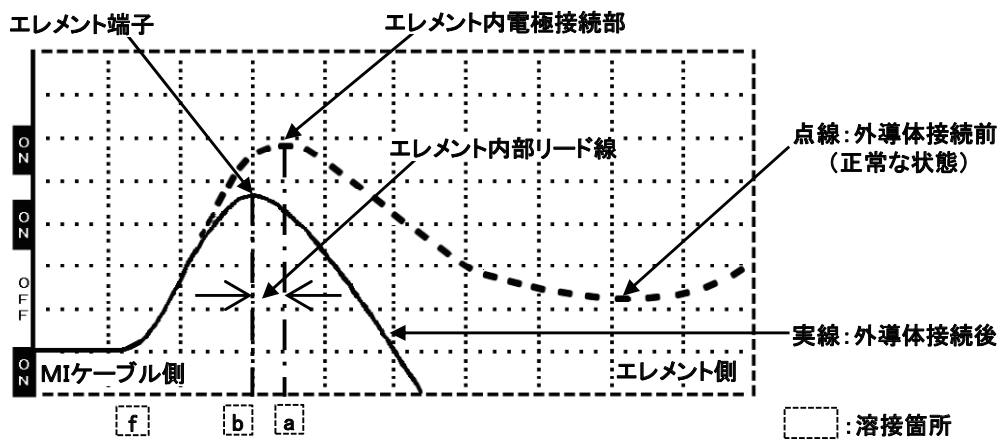


Fig.3.3 エレメント端子側 b を短絡させた場合 (Case B) の測定結果

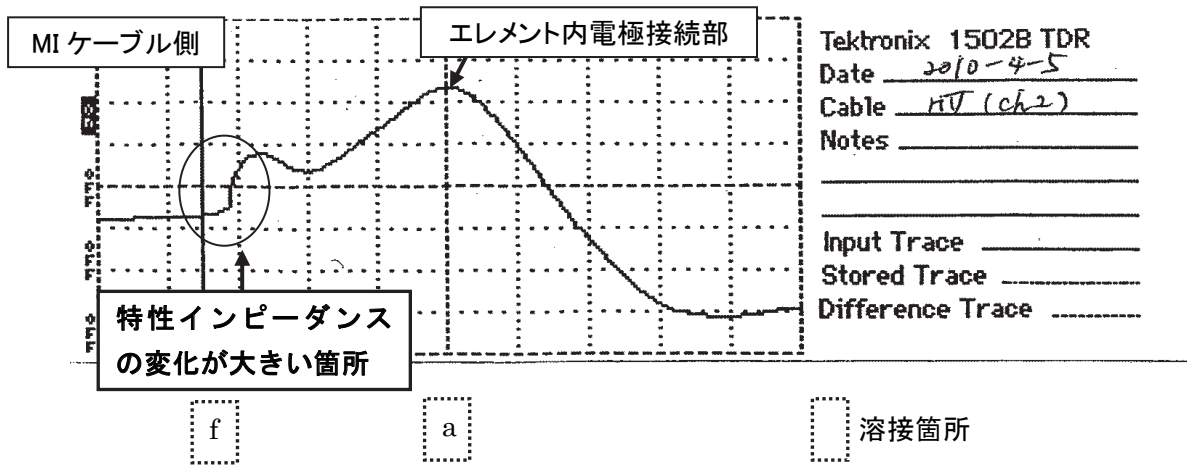


Fig.3.4 ch.2(HV 側) の特性インピーダンス (平成 22 年 4 月 5 日)



Fig.3.5 ch.3(HV 側) の特性インピーダンス (平成 22 年 4 月 22 日)

Table 4.1 高エネルギーX線CT検査装置の主な仕様

項目	内容	
CTスキャン方式	第2世代 (T-R) 方式	
スキャナ	3軸駆動 回転駆動精度: 30秒 並進駆動精度: 0.02mm 昇降駆動精度: 0.05mm	
X線源	非破壊検査用直線電子加速器 最大電子エネルギー: 12MV 最大出力: 520mC/kg/min at 1m	
X線検出部	高解像度化前	高解像度化後
	検出器材料: CdWO_4 コリメータスリット寸法: 0.3mm(W)×2mm(H) チャンネル数: 0.2° ピッチ×30個	検出器材料: Si系半導体 コリメータスリット寸法: 0.1mm(W)×2mm(H) チャンネル数: 0.06° ピッチ×100個

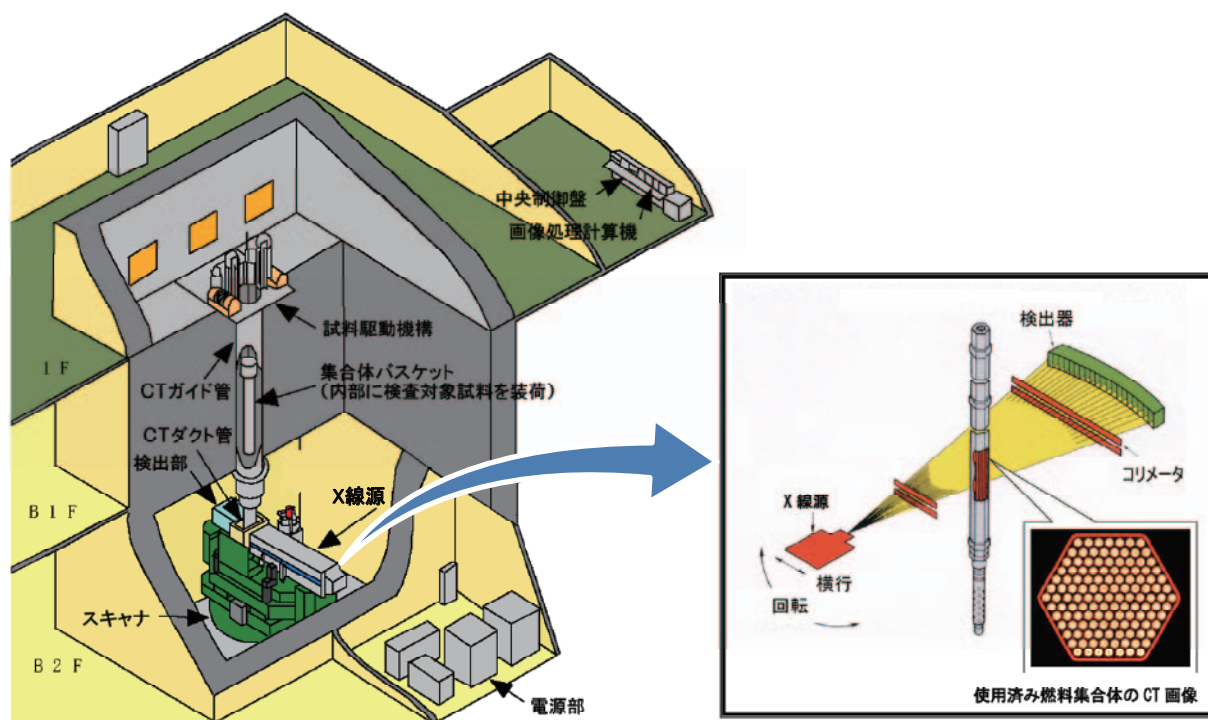


Fig.4.1 高エネルギーX線 CT 検査装置の概略図

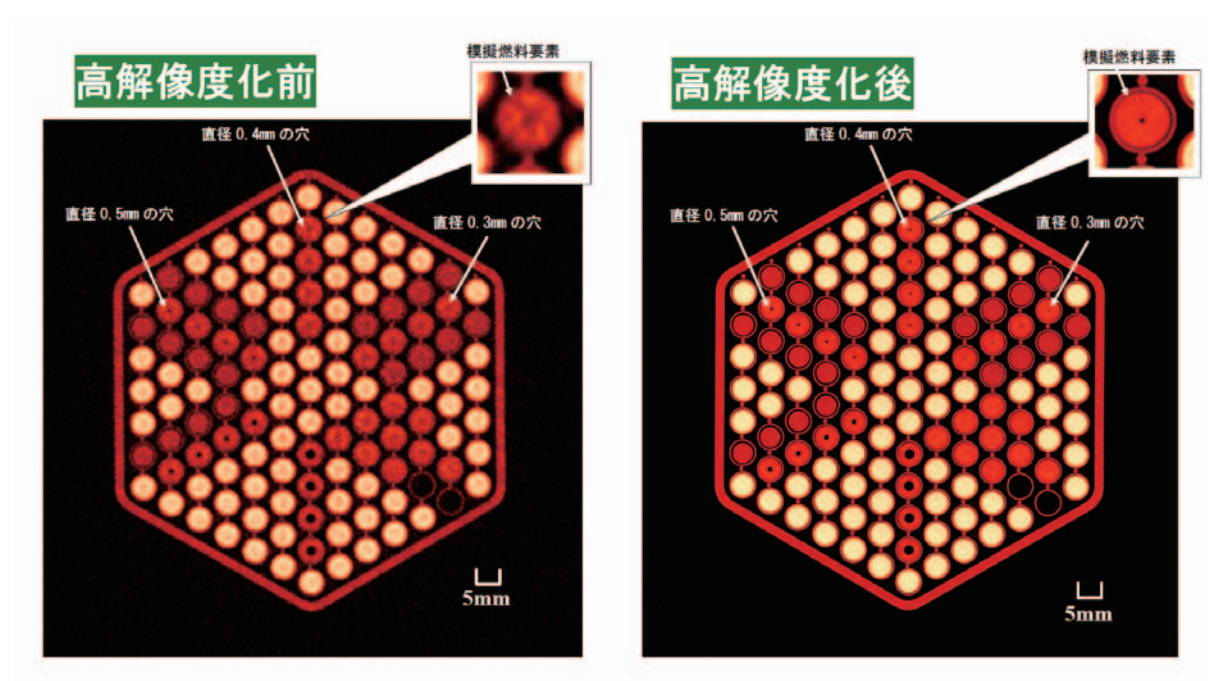


Fig.4.2 高解像度化に伴う模擬試験体の CT 画像の比較

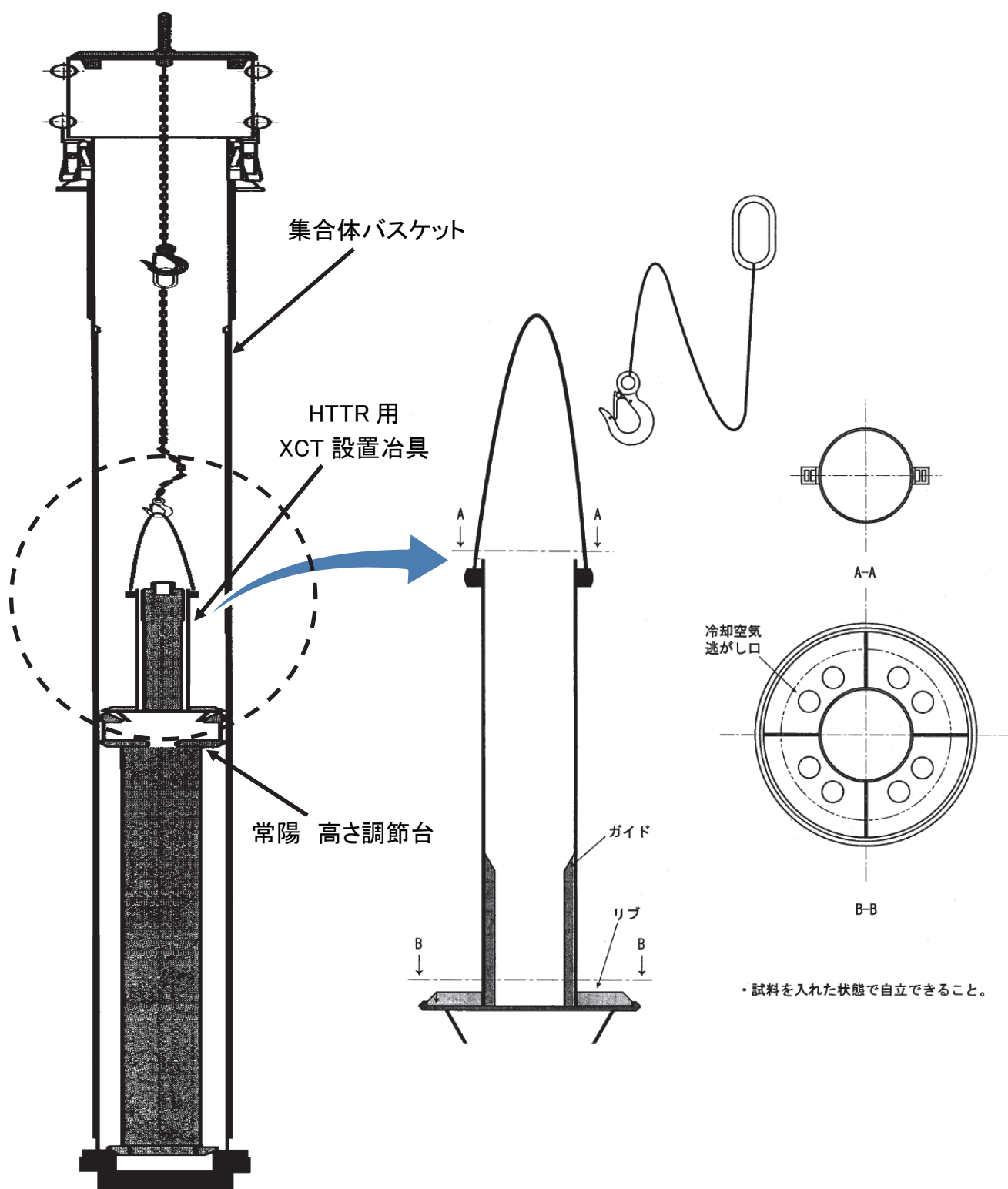


Fig.5.1 HTTR 用 XCT 設置治具概念図

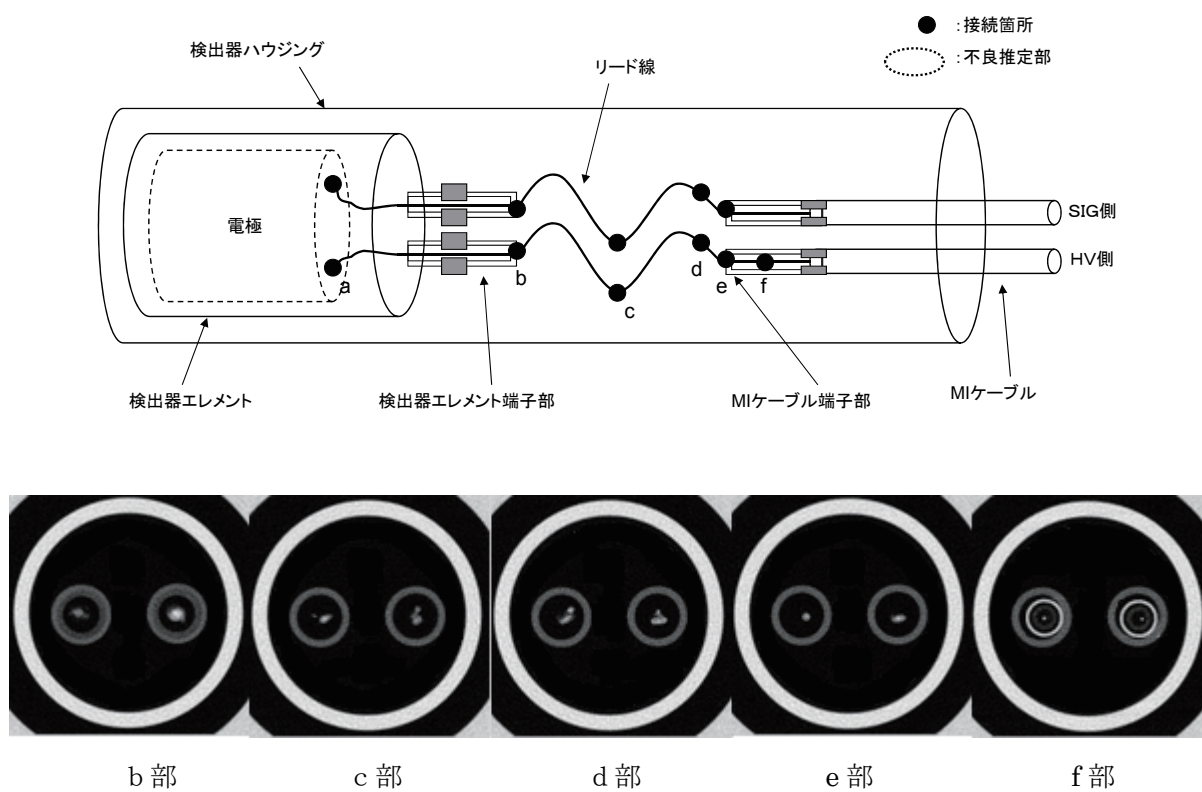


Fig.5.2 WRM 断層像撮影結果 (ch.2)

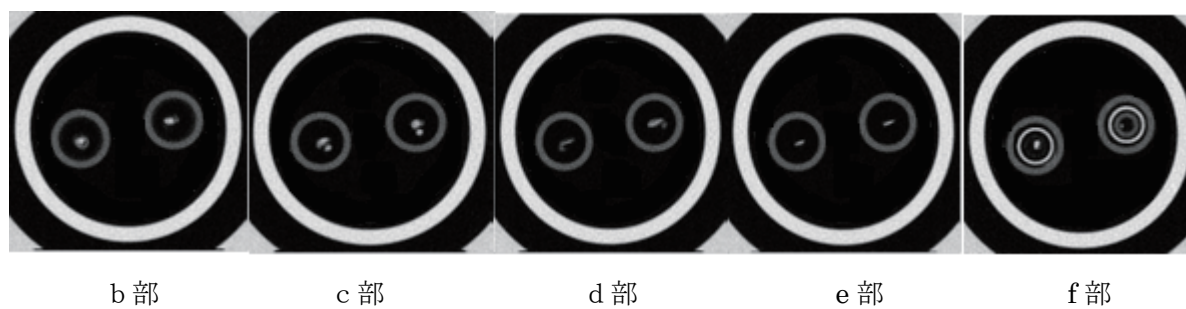


Fig.5.3 WRM 断層像撮影結果 (ch.3)

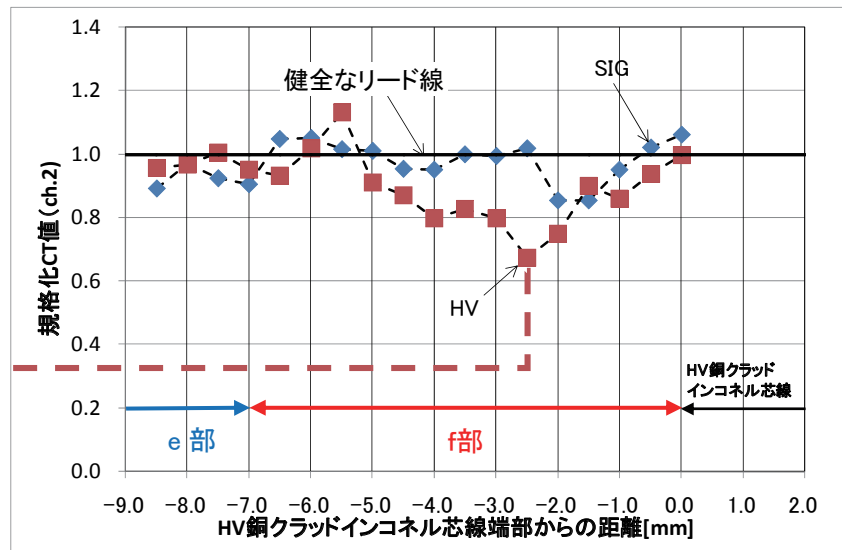
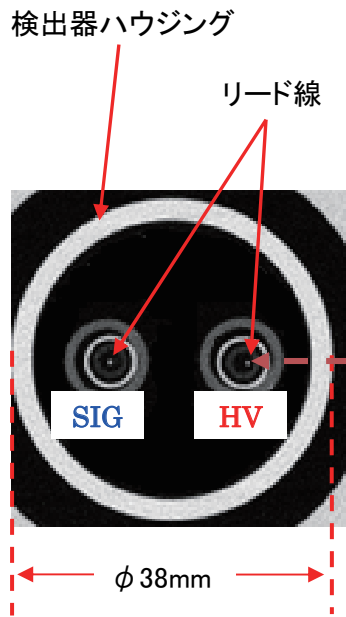


Fig.5.4 CT 値 (ch.2 接続箇所 f 近傍)

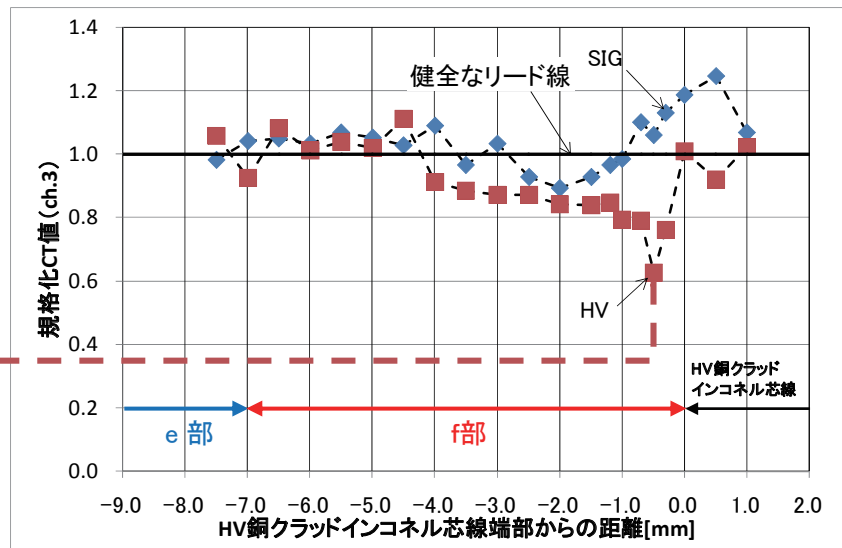
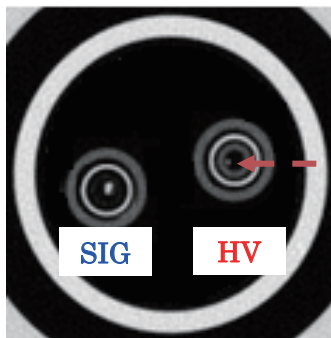


Fig.5.5 CT 値 (ch.3 接続箇所 f 近傍)

This is a blank page.

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
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	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	数メートル	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
電界の強さ	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	キログラム毎立法メートル	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	1
比誘電率 ^(b)	(数字の) 1	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
光照射度	ルーメン	lm		K
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	cd sr ^(c)	m ² cd 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	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大きさは同一である。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
粘着力のモーメント	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
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎平方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	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
表面電位	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 sA
吸収線量	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 ⁻¹ 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	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で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	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	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
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベベル	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
エルグ	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 =0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトリ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ⁷ /4π)A m ⁻¹

- (c) 3 元素の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=1cGy=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
カロリー	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)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

