

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—

Investigation on Cause of Outage of Wide Range Monitor (WRM)
in High Temperature engineering Test Reactor (HTTR)
—Transport Operation Toward Investigation for Cause of Outage—

篠原 正憲 澤畑 洋明 川本 大樹 茂木 利弘
齋藤 賢司 高田 昌二 吉田 直昭 磯崎 涼佑
勝山 幸三

Masanori SHINOHARA, Hiroaki SAWAHATA, Taiki KAWAMOTO, Toshihiro MOTEGI
Kenji SAITO, Shoji TAKADA, Naoaki YOSHIDA, Ryosuke ISOZAKI
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

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

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－

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・澤畑 洋明・川本 大樹・茂木 利弘⁺¹・齋藤 賢司・高田 昌二

吉田 直昭⁺²・磯崎 涼佑⁺²・勝山 幸三⁺²

（2012年6月11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、照射燃料集合体試験施設（FMF）にてX線CT装置を用いた照射後試験を計画した。

本報告書は、WRM動作不能の原因調査、当該WRMのFMFへの輸送方法の検討及び輸送作業の結果をまとめたものである。

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

+1 安全統括部

+2 燃料材料試験部

Investigation on Cause of Outage of Wide Range Monitor (WRM)
in High Temperature engineering Test Reactor (HTTR)
—Transport Operation Toward Investigation for Cause of Outage—

Masanori SHINOHARA, Hiroaki SAWAHATA, Taiki KAWAMOTO,
Toshihiro MOTEGI⁺¹, Kenji SAITO, Shoji TAKADA,
Naoaki YOSHIDA⁺², Ryosuke ISOZAKI⁺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 11, 2012)

An event, in which one of WRMs 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 developed life is one of the issues to develop the technology basis of High Temperature Gas cooled Reactor (HTGR). Then, a post irradiation examination was planned to specify the damaged part causing the event in the WRM was also planned. For the investigation, the X-ray computed tomography scanner in Fuels Monitoring Facility (FMF).

This report describes the preliminary investigation on the cause of outage of the WRM. The results of study for transportation method of the irradiated WRM from HTTR to FMF is also reported with the record to complete the transport operation.

Keywords: HTTR, FMF, Wide Range Monitor, Transport, 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 核分裂計数管・電離箱	2
2.3 無機絶縁（MI）ケーブル	2
2.4 広領域中性子検出器（WRM）の耐熱構造	3
3. 動作不能の原因調査	4
3.1 目的	4
3.2 動作不能箇所範囲の調査	4
3.3 動作不能箇所の絞込み調査	4
4. 広領域中性子検出器（WRM）の輸送	6
4.1 概要	6
4.2 輸送方法の検討	6
4.3 輸送手順	7
5. 結言	8
謝辞	8
参考文献	9
付録1 HTTR 使用済広領域中性子検出器が核分裂性輸送物とならない理由	30

Contents

1. Introduction	1
2. Neutron Instrumentation of HTTR	2
2.1 Outline	2
2.2 Fission Counter And Ion Chamber	2
2.3 MI Cable	2
2.4 Heat Resistance Structure of WRM	3
3. Investigate the Cause of Inoperative	4
3.1 Objectives	4
3.2 Investigation of Defects Range	4
3.3 Investigation Narrowing the Place of Defects	4
4. Transport of WRM	6
4.1 Outline	6
4.2 Deliberation of Transportation Method	6
4.3 Transport Procedure	7
5. Conclusion	8
Acknowledgement	8
References	9
Appendix1 The Reason why WRM of HTTR isn't Fissile Package	30

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の改良に役立つ目的で、当該WRMの詳細な調査を行うこととした。

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無機絶縁ケーブル（MIケーブル：Mineral Insulated Cable）端子側に動作不能箇所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を実施することとした。

HTTR施設では照射後試験を行える設備・装置がないことから、大洗センター内でX線CT装置が利用できる照射燃料集合体試験施設（FMF：Fuels Monitoring Facility）へWRMを輸送し照射後試験を実施することとした。

輸送に際しては、専用の輸送容器を新たに製作すると製作期間が長期にわたること、莫大な製作費がかかることから、輸送容器との取合いを考慮してHTTR既存の設備、機器等に新たな装置及び治具を製作し、FMF所有の輸送容器を利用して短期間で輸送作業を完了した。

本報告書は、HTTRにおけるWRM動作不能の原因調査、WRMをHTTRからFMFへ輸送する方法の検討、及びWRMの輸送作業の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、圧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圧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°C、事故時約 550°C 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 核分裂計数管・電離箱

核分裂計数管・電離箱 (FC : Fission Chamber) は、核分裂反応により放出されるエネルギー (Q 値) が約 200MeV と大きく、このうち約 160MeV が核分裂生成物の運動エネルギーになるため、計測器としては S/N 比の高い検出器が期待できる。しかし、実際に FC から出力されるパルス信号は、有感物質(核分裂性核種)、塗布膜の厚さ、核分裂片の収集条件(電極間隔、電離ガス圧、電離ガス種)等に依存するため、FC を設計する際には、Fig.2.5 に示すフローに従って核分裂性核種、電離ガス等の設計仕様が決定される。

FC の電極表面には、有感物質として濃縮ウラン酸化物(U_3O_8 、 $^{235}U > 90\%$) が塗布され、対向する電極間には電離ガスとしてアルゴンに少量の N_2 を混合したガスが封入されている。外部から飛来した中性子が電極に塗られた ^{235}U と核分裂反応を起こすことにより電離ガスが電離され、電離したイオンを電極に収集することにより、中性子束に比例した信号を取出す。Fig.2.6 に ^{235}U を用いた FC の作動原理図と計測系の構成⁶⁾を示す。

2.3 無機絶縁 (MI) ケーブル

MI ケーブルは、ステンレス製の外側シースと中心線の高純度のアルミナやマグネシア等のセラミックスの粉末を絶縁物として充填したケーブルである。シース内では中心線がエアギャップ無く封入され、また、端末は完全密封処理され酸化等による劣化が起こらないようにしてい

る。現在最も耐放射線性、耐熱性さらに機械的強度に優れたケーブルであり、原子炉施設等の苛酷環境に用いられている⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。一般的な MI ケーブルの構造を Fig.2.7 に示す。

2.4 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⁽¹⁰⁾。

- (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°C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. 動作不能の原因調査

3.1 目的

WRM が動作不能となった箇所を特定するため、WRM 全 3 台について絶縁抵抗測定、静電容量測定及び特性インピーダンス波形観察等を用いて動作不能箇所の絞込み調査をした。

3.2 動作不能箇所範囲の調査

Fig.3.1 に広領域中性子計装の信号経路図を示す。信号経路図をもとに Fig.3.2 に示す調査フロー図を作成し、異常の有無を確認した。以下に調査内容を示す。

(1) 高圧電源及びディスクリ電圧の異常調査

WRM 全数について中性子計装盤から WRM までの高圧電源及びディスクリ電圧を確認したところ、異常は認められなかった。

(2) 入力波形の異常調査

WRM 動作不能発生時のパルス波形を中性子計装盤の出力端子で確認したところ、ch.1 については正常なパルス波形が観察されたが、ch.2 及び ch.3 については、パルス波形が観察されなかった。パルス波形観察結果を Fig.3.3 に示す。

(3) コネクタ部の緩み、前置増幅器及びケーブルの異常調査

前置増幅器から中性子計装盤及びスタンドパイプ室から中性子計装盤について、目視によるコネクタ部の緩み、模擬パルス入力による前置増幅器及びケーブルの異常は認められなかった。

(4) 絶縁不良、ケーブル及び WRM の接触不良調査

ch.2 及び ch.3 について、絶縁抵抗測定、静電容量測定を実施した結果、2009 年の定期検査時の測定値と比較して、高圧電源 (HV) ケーブルの静電容量が低下していることを確認した。前置増幅器から WRM までの静電容量測定結果を Fig.3.4 に示す。

以上の調査結果から、動作不能となった WRM ではパルス波形が観察されず、静電容量も低下していること。中性子計装盤からスタンドパイプ室の WRM ケーブルコネクタ部までに異常はないことが確認され、動作不能箇所はスタンドパイプ室の WRM ケーブルコネクタ部から WRM 間にあるものと判断した。

3.3 動作不能箇所の絞込み調査

前述 3.2 章より、スタンドパイプ室 WRM ケーブルコネクタ部から WRM 間に動作不能箇所があると判断し、Fig.3.5 に示す調査フロー図を作成し、異常の有無を確認した。以下に調査内容を示す。

(1) 絶縁抵抗測定

絶縁抵抗測定の結果、高圧電源 (HV) ケーブル及び信号 (SIG) ケーブル共に異常は認められなかった。

(2) 静電容量測定

静電容量測定を実施し、2006年の炉内据付後の測定値と比較した結果、ch.2及びch.3動作不能発生時の高圧電源(HV)ケーブルの静電容量が約150pF低下していた。信号(SIG)ケーブルの測定結果には有意な差はなかった。なお、ch.1の高圧電源(HV)ケーブル及び信号(SIG)ケーブルの測定結果には有意な差はなかった。ch.2及びch.3は、高圧電源(HV)ケーブルの静電容量が約150pF低下していることから、WRMエレメント端子から高圧電源側MIケーブル接続部の付近に動作不能箇所があると推定される。スタンドパイプ室のWRMコネクタ部からWRMまでの静電容量測定結果をFig.3.6に示す。

(3) 電極間電流の測定¹

高圧電源(HV)ケーブルの静電容量に低下がみられたことから、スタンドパイプ室のWRMケーブルコネクタ部からWRM間の電極間電流を測定した。WRM動作不能発生時のch.1は電極間電流が検出されたが、ch.2及びch.3は電極間電流が検出できなかった。このことから、ch.2及びch.3は、動作不能箇所があると推定される。WRMの電極間電流の測定結果をFig.3.7に示す。

(4) 特性インピーダンス波形観測

高圧電源(HV)ケーブルの静電容量に低下がみられたことから、スタンドパイプ室のWRMケーブルコネクタ部からWRM間の接触不良の位置を確認するため、TDR²法による特性インピーダンス波形観測を実施した。ch.1については異常を示す波形は観察されなかったが、ch.2については、WRMエレメント端子からMIケーブル接続部の付近で特性インピーダンスが大きくなっており、接触不良を示す波形が観察された。また、ch.3については、WRMエレメント端子からMIケーブル接続部の付近で断線を示す波形が観察された。TDR法による特性インピーダンス波形観測をFig.3.8に示す。

(5) プラトー特性測定

WRMの特性を確認するため、プラトー特性測定を実施したところ、異常は認められなかった。

以上の調査結果から、Fig.3.9に示すWRM概略図のWRMエレメントと高圧電源側MIケーブルの接続部付近である接続箇所dから接続箇所fの範囲に動作不能箇所があると判断した。

1: 検出器内部の電極に²³⁵Uが塗布されており、 α 崩壊による電流、及び使用中のF.P.が蓄積されること等による β 線、 γ 線による電流との合計をいう。

2: 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あり、パルスケーブルの片端から送信し、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)が判断できる方法である。

4. 広領域中性子検出器 (WRM) の輸送

4.1 概要

動作不能となった WRM (ch.2 及び ch.3)の交換作業を 2010 年 10 月から 11 月に実施した。炉心から取り出した WRM は、燃料交換機メンテナンスピット内(MP)で保持装置の一部及び WRM の MI ケーブルを切断し、分離した WRM 本体を WRM 収納容器に収納し、HTTR 施設内の照射物貯蔵ピット内に保管した。

2010 年 12 月から 2011 年 1 月に実施した安全性実証試験運転の終了を待って、2011 年 2 月に動作不能の原因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、大洗センター内で X 線 CT 装置が利用できる FMF へ WRM を輸送し照射後試験を実施することとした。

輸送に際しては、専用の輸送容器を新たに製作すると製作期間が長期にわたることから、FMF の輸送容器を利用して輸送を行うこととし、輸送容器との取合いを考慮して、HTTR 既存の設備、機器等に新たな装置及び治具を製作し、WRM の輸送作業を実施した。

4.2 輸送方法の検討

HTTRからFMFへの輸送に関して、(1)輸送方法の調査、(2)核燃料物質等の区分と収納限度(A₂値)の評価、(3)輸送容器の選定、(4)輸送容器の線量評価、(5)MP内の作業検討の5項目の検討を行った。

(1) 輸送方法の調査

HTTR から FMF への WRM の輸送方法は、事業所内運搬であるため、大洗研究開発センター内放射性物質等運搬規則、大洗研究開発センター（北地区）及び（南地区）核燃料物質使用施設等保安規定、大洗研究開発センター（北地区）及び（南地区）原子炉施設保安規定の要件に準拠して行うことで輸送が可能であると判断した。

(2) 核燃料物質等の区分と収納限度 (A₂ 値) の評価

WRM は、核分裂計数管内部にウラン 235 を薄く塗布している。そのため今回の運搬物は、核燃料物質又は核燃料物質によって汚染されたものにあたり、区分は「特別形放射性物質以外の核燃料物質等」で輸送を検討した。また、ここで今回の運搬物が核分裂性運搬物とならない理由は、付録 1 に示す。

収納限度 A₁、A₂とは、A型輸送物として輸送し得る収納放射性物質の放射能限度を示す数値であり、各々の核種に対して決められている。この値は、各々の核種の外部被ばく、内部被ばくにより人体に影響を与える限界値に対して十分余裕を持って決められた値である。今回の運搬物の放射エネルギーについてはコバルト60が支配的であり、事前解析により放射エネルギー総量は45.2GBqと見積もった。

上述より今回の運搬物は特別形放射性物質等以外の放射性物質等にあたり、コバルト60のA₂値400GBqを超えないため、第3類運搬物として輸送が可能であると判断した。

(3) 輸送容器の選定

今回の運搬物専用の輸送容器を新規に製作するのは、設計・製作・検査のための時間と費用が

必要となるため、大洗研究開発センター内に既存の輸送容器の中から検討した。様々な輸送容器の中から今回の運搬物の寸法、放射エネルギーを共に満足する輸送容器は、FMFで廃棄物移送用キャスクとして実績のある輸送容器（FMFキャスク3）だけであった。Table 4.1にFMFキャスク3の主要諸元及びFig.4.1に構造図を示す。ただ運搬物が収納されているWRM収納容器のままでは、キャスク3の収納容積よりも大きいため直接収納することが出来ないことが判明した。そこで、キャスク3に収納できる輸送用内容器を新規製作することでFMFキャスク3による輸送が可能である見通しが得られた。

(4) 輸送容器の線量評価

WRMを装荷した輸送容器の放射線線量率を評価し、A型輸送物の基準を満足するかについて調べた。法律によるA型輸送物の基準値は、放射線量当量率が、(1)表面で2mSv/h、(2)表面から1mで0.1mSv/hである。このため、WRMを装荷したときの輸送容器の外側の線量当量率を計算した。この結果、輸送容器の表面で約0.19mSv/h、表面から1mで約0.07mSv/hであり、A型輸送物の基準を満足すると判断した。

(5) MP内の作業検討

WRMをA型輸送物として輸送が可能である見通しを得たため、MP内での全体作業工程を策定し、その技術課題を抽出した。

MP内の作業計画をFig.4.2に示す。交換のため炉内から取り出されたWRMは、WRM収納容器に収納され、照射物貯蔵ピット内に貯蔵されている。照射物貯蔵ピット内ではWRM収納容器から輸送用内容器への移し替え作業が出来ないことから、燃料交換機（FHM）により、WRM収納容器を照射物貯蔵ピットからMPに移送し、MP内にてマニプレータを用いた遠隔操作によりWRM収納容器から新規製作した輸送用内容器へ移し替え作業を行う計画とした。

輸送用内容器へ移し替えたあと、FMFキャスク3へ収納する工程において、FMFキャスク3昇降装置の揚程が不足し、MP地下2階にて移し替えた輸送用内容器上部蓋まで吸着用マグネットが届かないことが判明した。そこでFMFキャスク3昇降装置の吸着用マグネットがアクセスできる場所まで輸送用内容器を上昇させる昇降装置をMP内に新規製作することでFMFキャスク3による輸送が可能である見通しが得られた。昇降装置概念図をFig.4.3に示す。

4.3 輸送手順

第4.2章で行った検討結果より、輸送ルートはHTTRからFMFへの事業所内運搬とし、運搬物の種類は「特別形放射性物質等以外の放射性物質等 第3類運搬物」として原子力機構内規定に準拠しておこなった。輸送容器にはFMFキャスク3を使用し、その収納容積を満足した輸送用内容器を製作することで対応した。輸送用内容器の外観図をFig.4.4に示す。輸送容器への詰替え作業は、HTTRのMPを用いて行うものとし、MP内昇降装置及びその他の備品についてはHTTRとFMFで検討・製作した。MP昇降装置用カゴの外観図をFig.4.5に示す。

輸送作業は、2011年2月10日及び2月18日にHTTRからFMFへの輸送容器の搬出を実施した。Table 4.2に輸送作業手順を示す。輸送容器の線量は、最大線量等量率が表面で0.108 mSv/h、表面から1mで0.012mSv/hであり、A型輸送物の基準を満足した。

5. 結言

WRM の動作不能事象の原因調査の一環として、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結果から、WRM エLEMENTと高圧電源側 MI ケーブルの接続部付近に動作不能箇所があると判断した。

また、FMF 施設にて照射後試験を実施するにあたり、WRM を HTTR から FMF へ輸送するための輸送方法の検討の結果、FMF への輸送が技術的に可能である見通しを得るとともに、諸手続きの上、FMF へ輸送を行い、2011 年 2 月 18 日に無事完了した。

謝辞

WRMの輸送作業にあたっては、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) ニコラス・ツルファニデイス, 阪井英次訳, “放射線計測の理論と演習”, (現代工学社、下巻, 1986)
- (7) C.J.Allan and G.F.Lynch ; “Practical consideration for the use of mineral-insulated cables in a reactor environment”, Trans. Am. Nucl. Soc., 45 (1983) pp.233-234.
- (8) T.Shikama, M. Narui and T. Sagawa ; “Radiation induced electromotive force in mineral insulated cable under reactor irradiation”, Nucl. Instrum. Meth., B 122 (1997) pp.650-656.
- (9) T.Nishitani, T.Shikama, M.Fukao, H.Matsuo, R.Snider, J.Broesch, N.Sagawa, H.Kawamura and S.Kasai ; “Irradiation effects on magnetic probes of mineral insulated cable”, Fusion Engineering and Design, 51-52 (2000) pp.153-158.
- (10)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)

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°C
原子炉出口冷却材温度	850°C (定格運転時) 950°C (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)

Table2.1 HTTR 広領域中性子検出器仕様

項目	仕様
1. 寸法	
(1) 外径	φ 38mm
(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	1010 Ω 以上
(2) SIG極C- I	同上
(3) I - O (共通)	108 Ω 以上
5. 使用条件	
(1) 周囲温度	通常時: 450°C 事故時: 550°C (ただし、コネクタ部は80°C)
(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

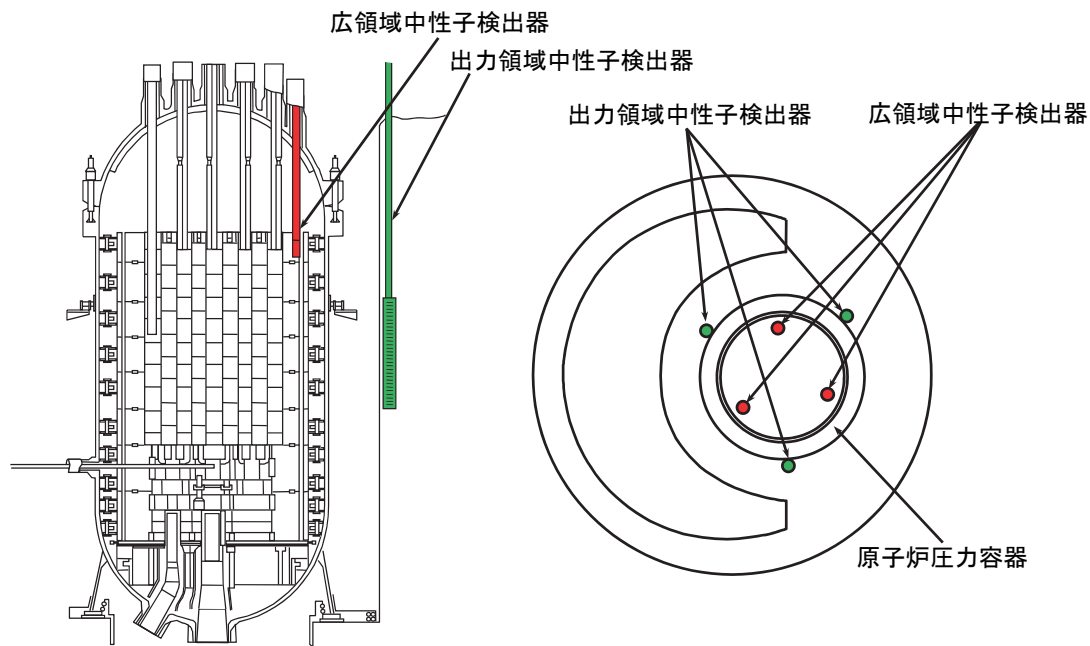


Fig.2.1 中性子検出器の配置図

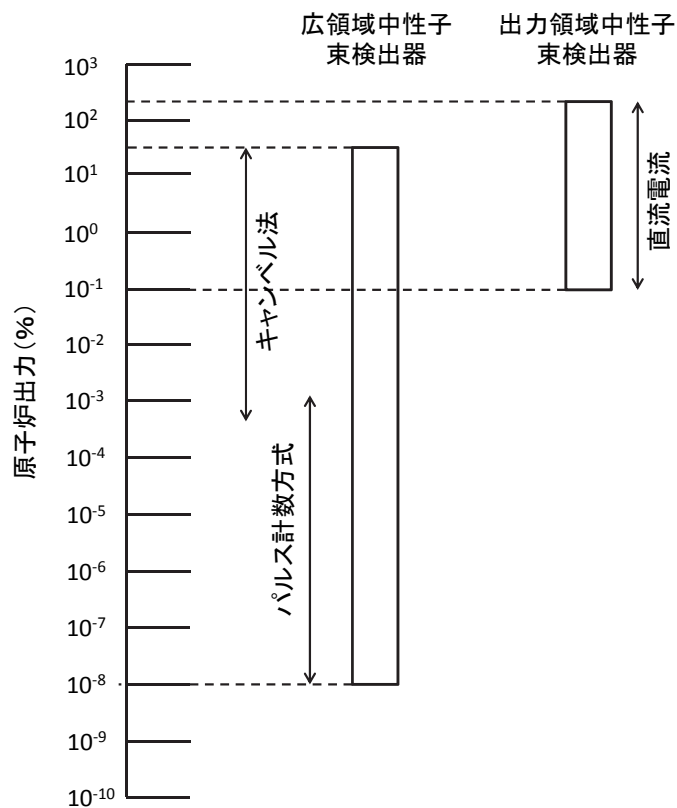


Fig.2.2 HTTR 中性子計装の測定出力範囲

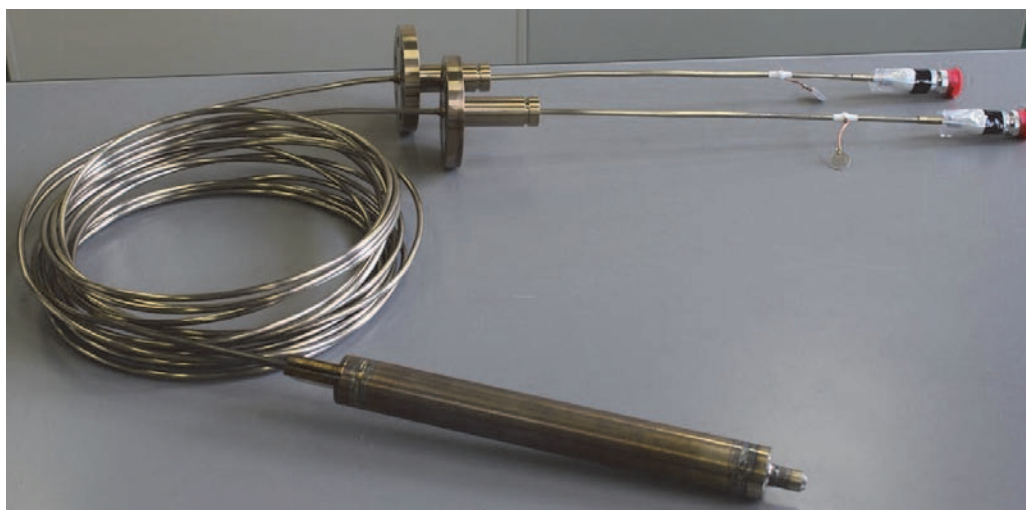


Fig.2.3 WRM 外観写真

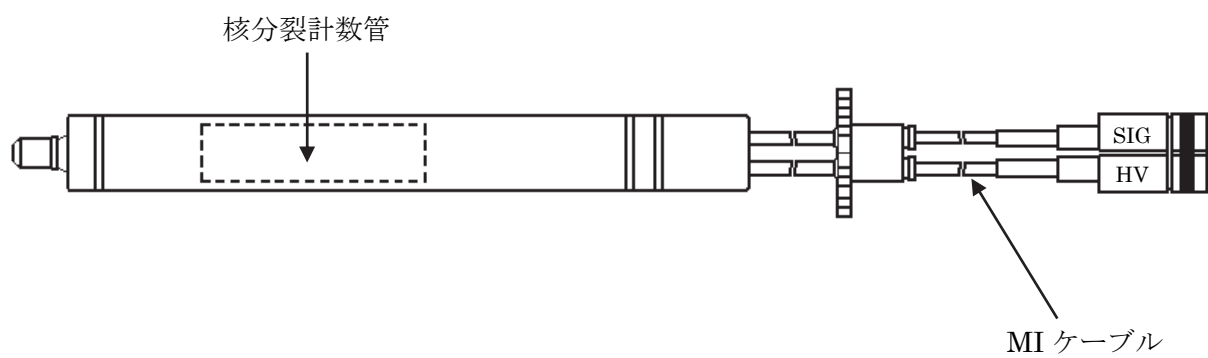


Fig.2.4 WRM 外観図

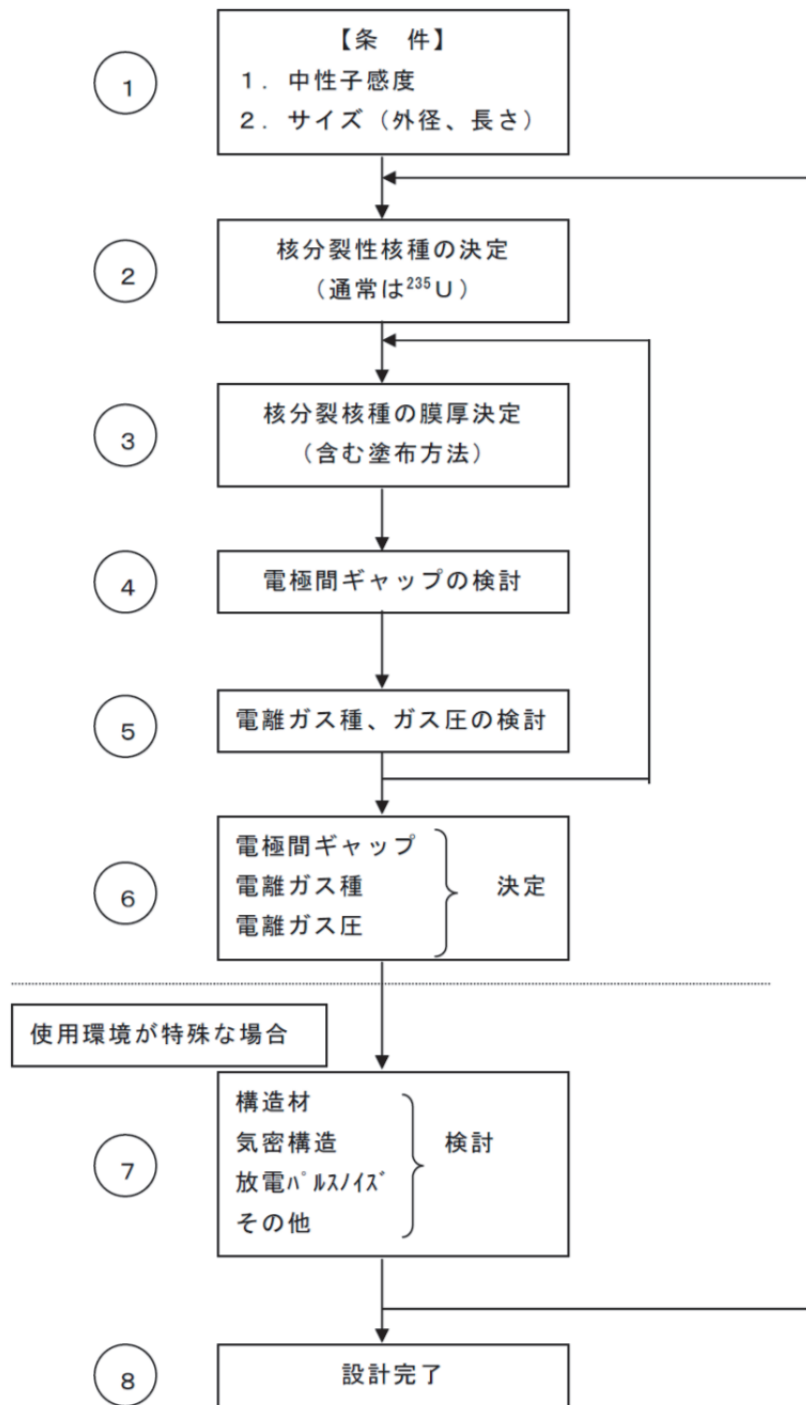


Fig.2.5 核分裂計数管・電離箱の設計フロー

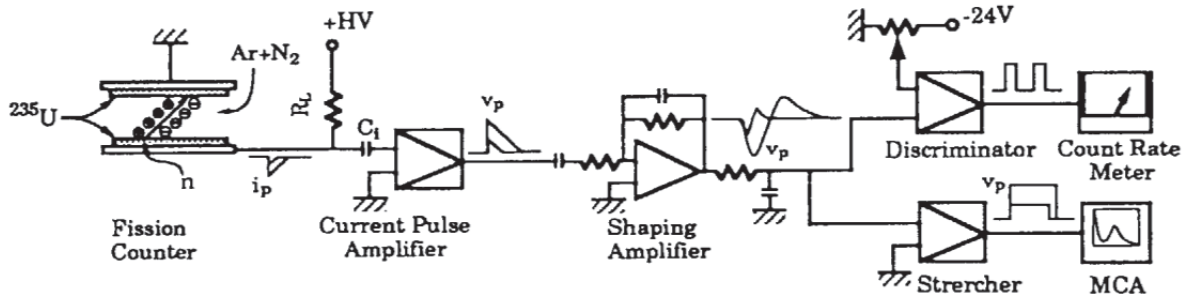


Fig.2.6 FC の作動原理と計測回路⁽³⁾

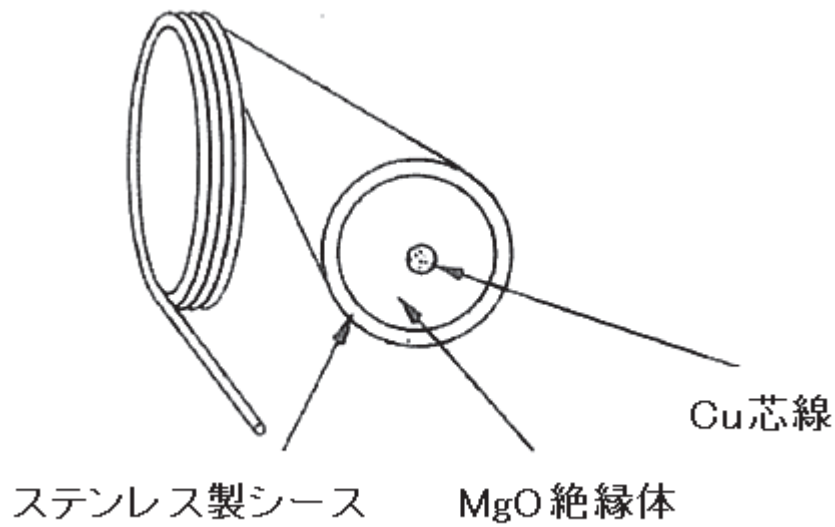


Fig.2.7 一般的な MI ケーブルの構造

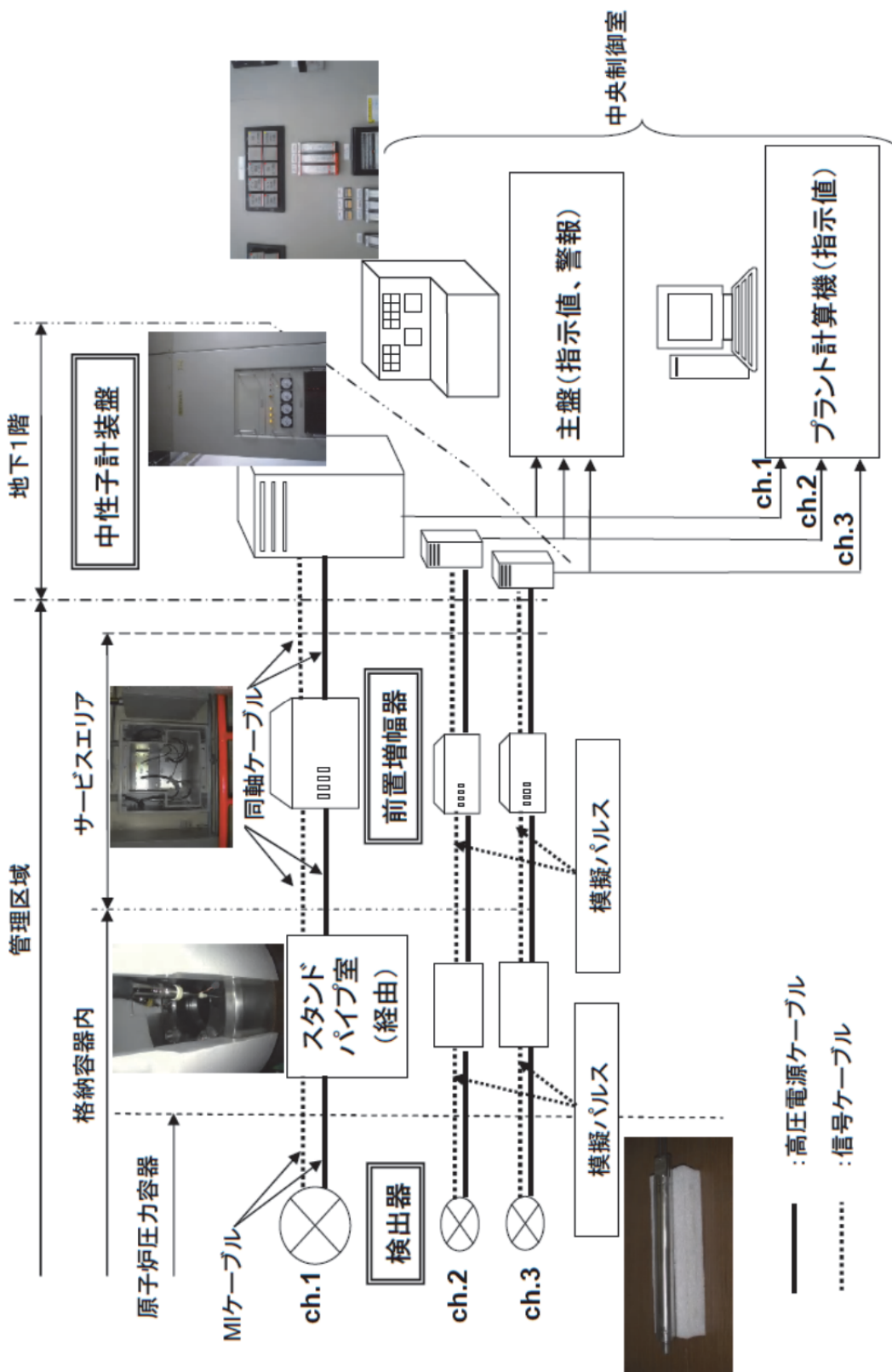


Fig.3.1 広領域中性子計装の信号経路図

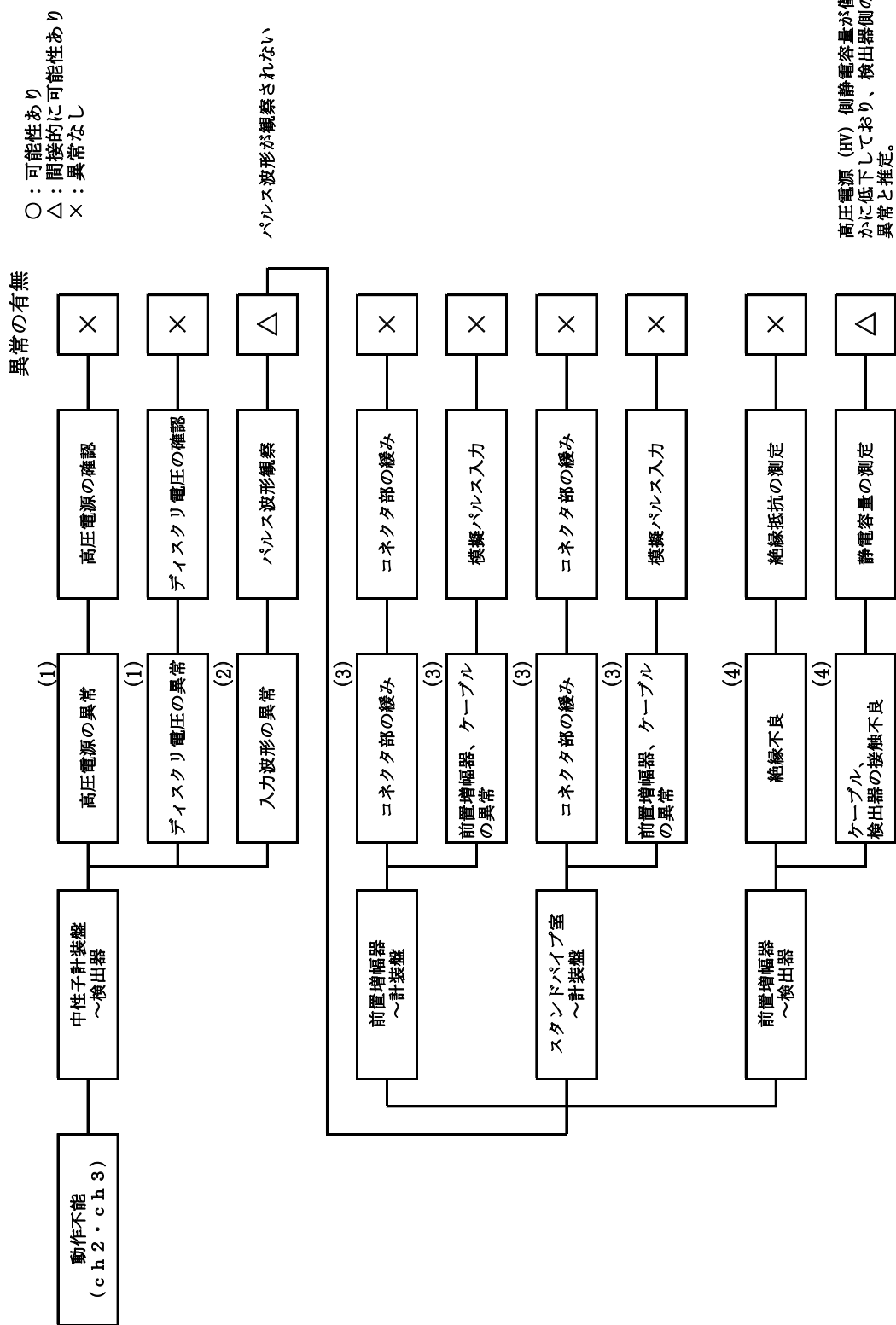


Fig.3.2 部位特定の調査フロー図

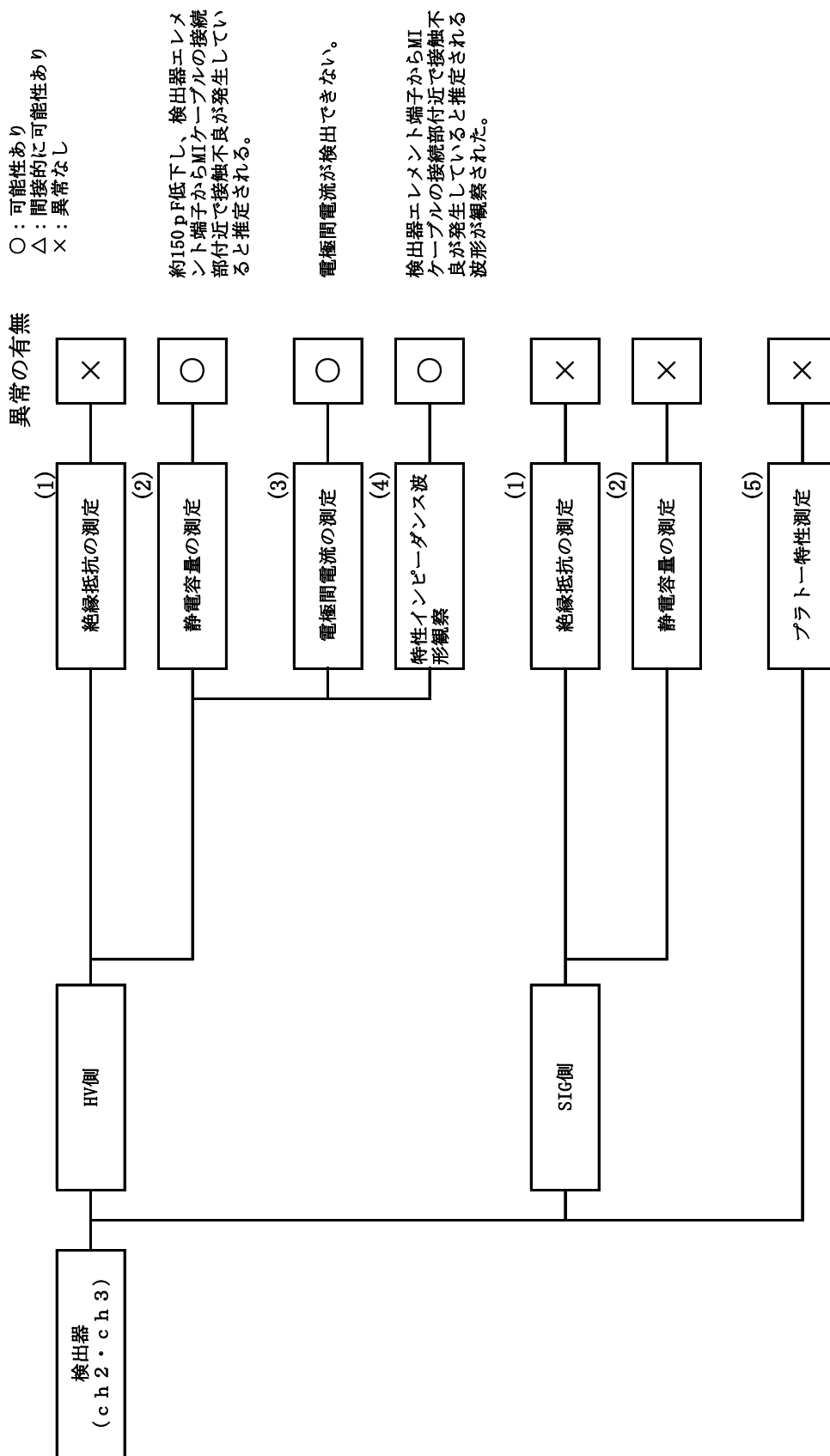


Fig.3.5 スタンドパイプ室コネクタ部から検出器間の調査フロー図

		平成 18 年 炉内据付後	/	H22.4.22 (計数率約 7cps)
ch.1	SIG	1890pF		1890pF
	HV	1940pF		1940pF
		平成 18 年 炉内据付後	H22.3.22 (計数率 1cps 以下)	/
ch.2	SIG	1880pF	1861pF	
	HV	1900pF	1748pF	
		平成 18 年 炉内据付後	H22.3.23 (計数率 1cps 以下)	H22.4.22 (計数率 1cps 以下)
ch.3	SIG	1880pF	1860pF	1860pF
	HV	1910pF	1750pF	1750pF

Fig.3.6 スタンドパイプ室の WRM コネクタ部から WRM までの静電容量測定結果

ch.1

電圧 (V)	H22.4.22 (計数率約 7cps)
1	27.6 nA
3	49.9 nA
5	51.7 nA
10	53.4 nA
30	55.8 nA
50	56.5 nA
100	57.3 nA

ch.2

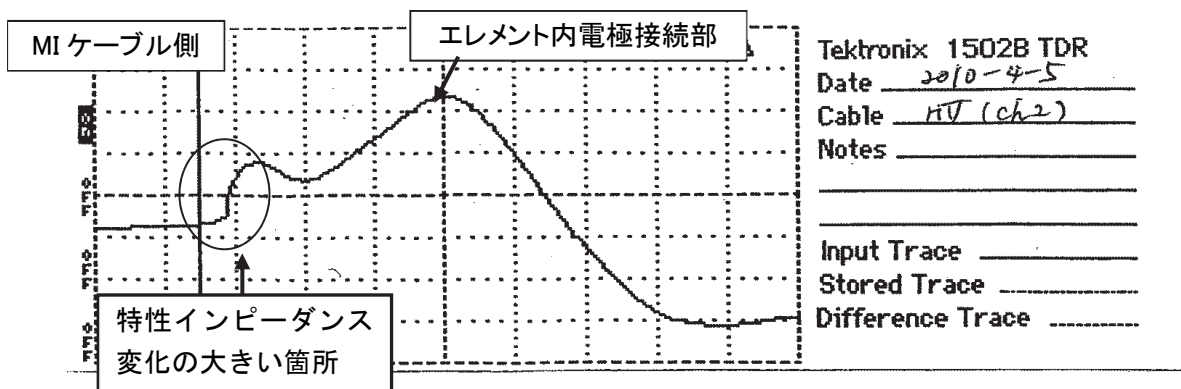
電圧 (V)	H22.3.22 (計数率 1cps 以下)	H22.3.29 (計数率約 6cps)
1	0 nA	109.8 nA
3	0 nA	166.0 nA
5	0 nA	178.0 nA
10	0 nA	181.0 nA
30	0 nA	185.0 nA
50	0 nA	186.0 nA
100	0 nA	187.0 nA

ch.3

電圧 (V)	H22.3.22 (計数率約 7cps)*	H22.3.23 (計数率 1cps 以下)	H22.3.30 (計数率約 7cps)	H22.4.22 (計数率 1cps 以下)
1	142.2 nA	0 nA	106.1 nA	0 nA
3	239.2 nA	0 nA	168.1 nA	0 nA
5	290.2 nA	0 nA	184.8 nA	0 nA
10	301.2 nA	0 nA	188.5 nA	0 nA
30	308.2 nA	0 nA	193.1 nA	0 nA
50	311.2 nA	0 nA	194.7 nA	0 nA
100	--	0 nA	196.3 nA	0 nA

* : 調査前は 1cps であったが、調査終了後に高圧電源を印加し通常の測定を開始したところ、約 7cps であった。

Fig.3.7 WRM の電極間電流の測定結果



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



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

Fig.3.8 TDR 法による特性インピーダンス波形観察

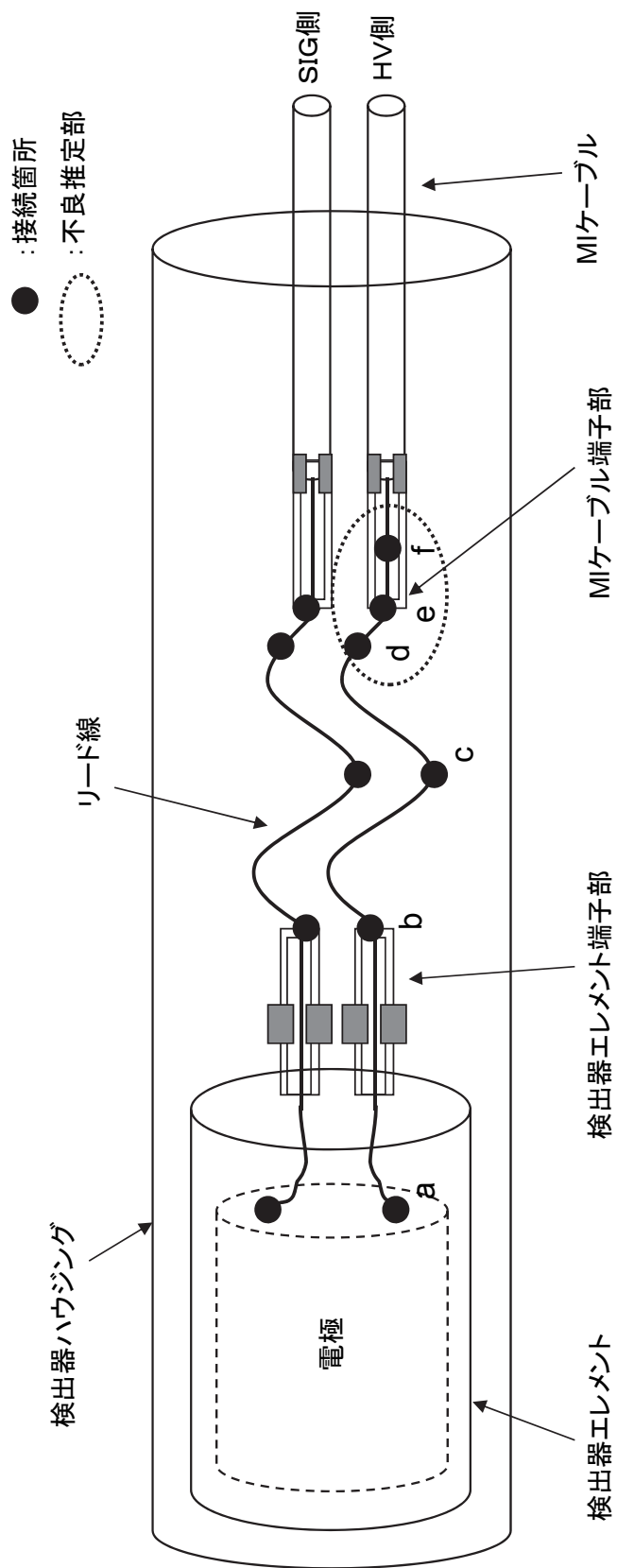


Fig.3.9 WRM 概略図

Table 4.1 FMF キャスク 3 主要諸元

キャスク本体	
項目	仕様
遮蔽能力	鉛厚95mm
最大取扱放射能量	γ 線： $^{60}\text{Co}9.25 \times 10^{10}\text{Bq}$ (Pho./s) 中性子線： $8.52 \times 10^4\text{Bq}$
総重量	約8,000kg (上・下部緩衝体約440kg含む)
全長	2,140mm (運搬時 (上・下部緩衝体付) : 2,502mm)
外径	$\phi 1,370\text{mm}$ (運搬時 (上・下部緩衝体付) : $\phi 1,638\text{mm}$)
内径	$\phi 610\text{mm}$
有効内容積	$\phi 610\text{mm} \times 1,000\text{mm}$
シャッター開閉装置	
項目	仕様
駆動方式	手動 (約5kg・cm) でシャッター開閉可能
構造	鋼構造でネジシャフトの回転によりシャッターを開閉する。本体とは着脱可能。
重量	シャッターA：約85kg シャッターB：約85kg
昇降装置、操作盤及び電磁石	
項目	仕様
昇降装置	
・全長	610mm
・外径	$\phi 840\text{mm}$
・巻上げ荷重	150kg
・揚程	約10m
・速度 (電動時)	0.4kW×4P (手動による操作可能)
操作盤	
・電源	単相AC100V
・寸動・連動切替スイッチ	寸動上昇及び下降、連続上昇及び下降、切替え可能
電磁石	
・型式	永久電磁石
・電源	DC90V (AC100Vから変換)
・形状	$\phi 175\text{mm} \times 150\text{mm}$
・吸着力	150kg (12mm以上の鋼板使用時) 120kg (15mm以上の鋼板及び0.3mmのPVCバック使用時)
安全装置	
項目	仕様
・ショックアブソーバ (上部、下部緩衝体)	落下時の衝撃吸収
・トルクリミッター	昇降装置の過負荷防止
・動作制限リミットスイッチ (上限、下限)	過巻上、過巻下防止
・シャッター脱落防止金具	運搬時のシャッター固定
・シャッターロック治具	シャッターの開閉時のロック動作固定

Table 4.2 輸送作業手順

No	項目	内容
(1)	準備作業	各設備機器の調整、MP内へ昇降装置の取付け及び輸送用内容物のMP内の所定場所に搬入する。
(2)	FMFからHTTRへのFMFキャスク3(空キャスク)搬入	HTTRが契約した輸送業者にて、FMF管理区域内からHTTR管理区域内へ空キャスクを搬入する。
(3)	WRM収納容器を挿入	WRM収納容器を、FHMにより照射物貯蔵ピットから取出し、MPへ挿入する。
(4)	WRM収納容器の蓋を開ける	収納容器蓋ネジ締め用治具により、WRM収納容器蓋のボルトを緩め、クレーンにて専用吊り治具で蓋をつかんで開ける。
(5)	WRM本体収納容器を輸送用内容物へ挿入	クレーンでWRM収納容器内のWRM本体収納容器を吊上げ、昇降用カゴ内に設置された輸送用内容物に挿入する。
(6)	輸送用内容物蓋をロックする	マニプレータを用いた遠隔操作により、輸送用内容物の蓋をロックする。
(7)	WRM収納容器を取出す	FHMによりWRM収納容器をMPから取出し、照射物貯蔵ピットへ挿入する。
(8)	ドアバルブ1(DV1)の設置	DV1をMPアダプタプレート上に設置する。
(9)	FMFキャスク3の設置	輸送容器をDV1上に設置する。
(10)	昇降装置の下降及びマグネットの下降	FMFキャスク3操作盤により、吸着用マグネットを輸送用内容物との吸着位置まで下降する。
(11)	昇降用カゴへワイヤーハンガーの取付け	MP昇降装置のワイヤーハンガーを下降し、昇降用カゴに接続する。
(12)	MP昇降装置上昇とマグネットを励磁	MP昇降装置の上昇操作及びFMFキャスク3の吸着用マグネット下降操作により輸送用内容物と吸着用マグネットを励磁させる。
(13)	輸送用内容物のFMFキャスク3への収納	FMFキャスク3操作盤によりマグネットを上昇し、輸送用内容物をFMFキャスク3に収納する。
(14)	HTTRからFMFへFMFキャスク(実入りキャスク)の輸送	HTTRが契約した輸送業者にて、HTTR管理区域からFMF管理区域へ輸送する。輸送する際は、放射線管理課による輸送容器表面の表面線量率測定し、基準値以下であることを確認するとともに、その結果をまとめる。なお、輸送に際しては、策定した輸送計画書及び輸送実施計画書に基づいて実施するものとする。

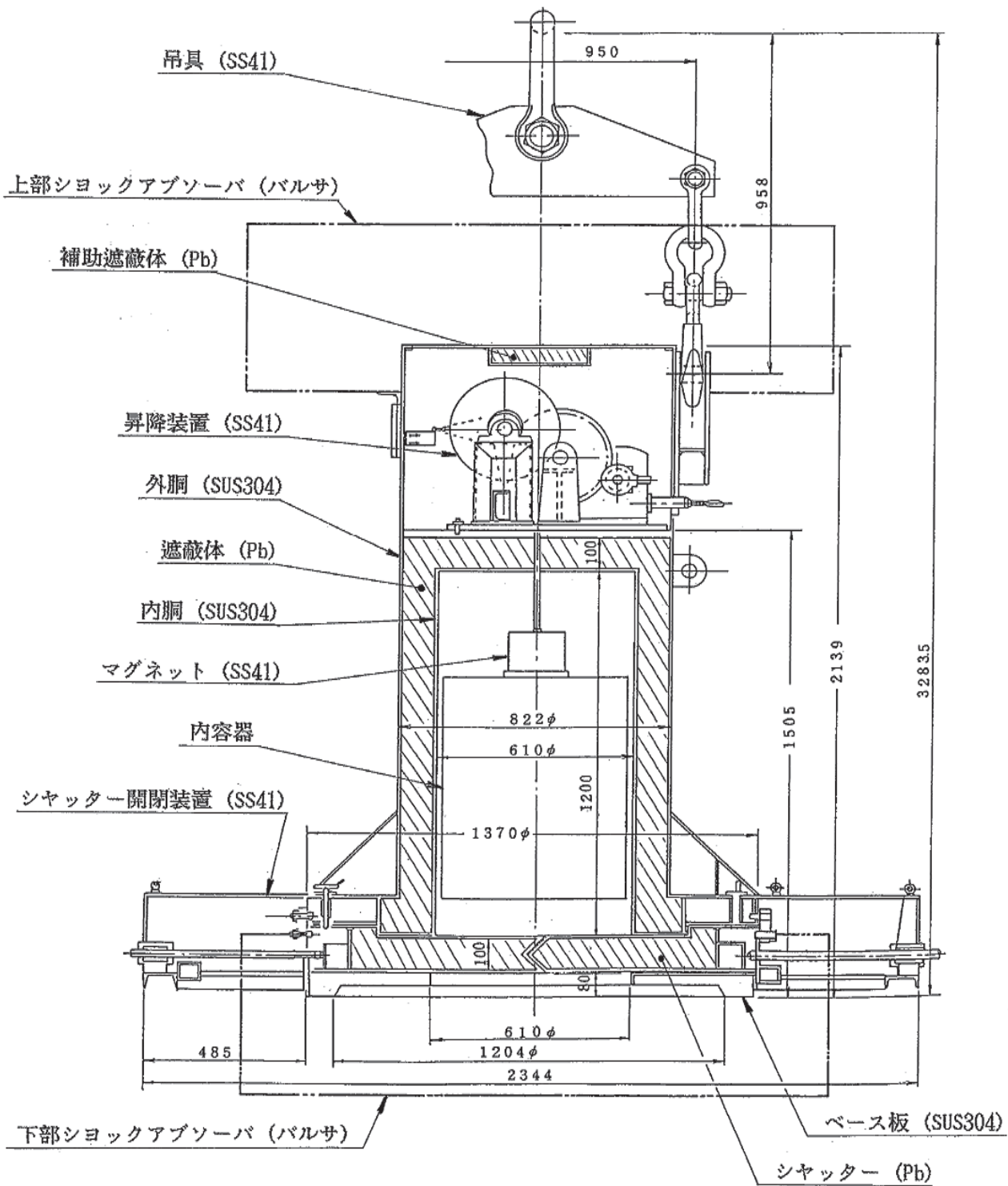


Fig.4.1 FMF キャスク 3 構造図

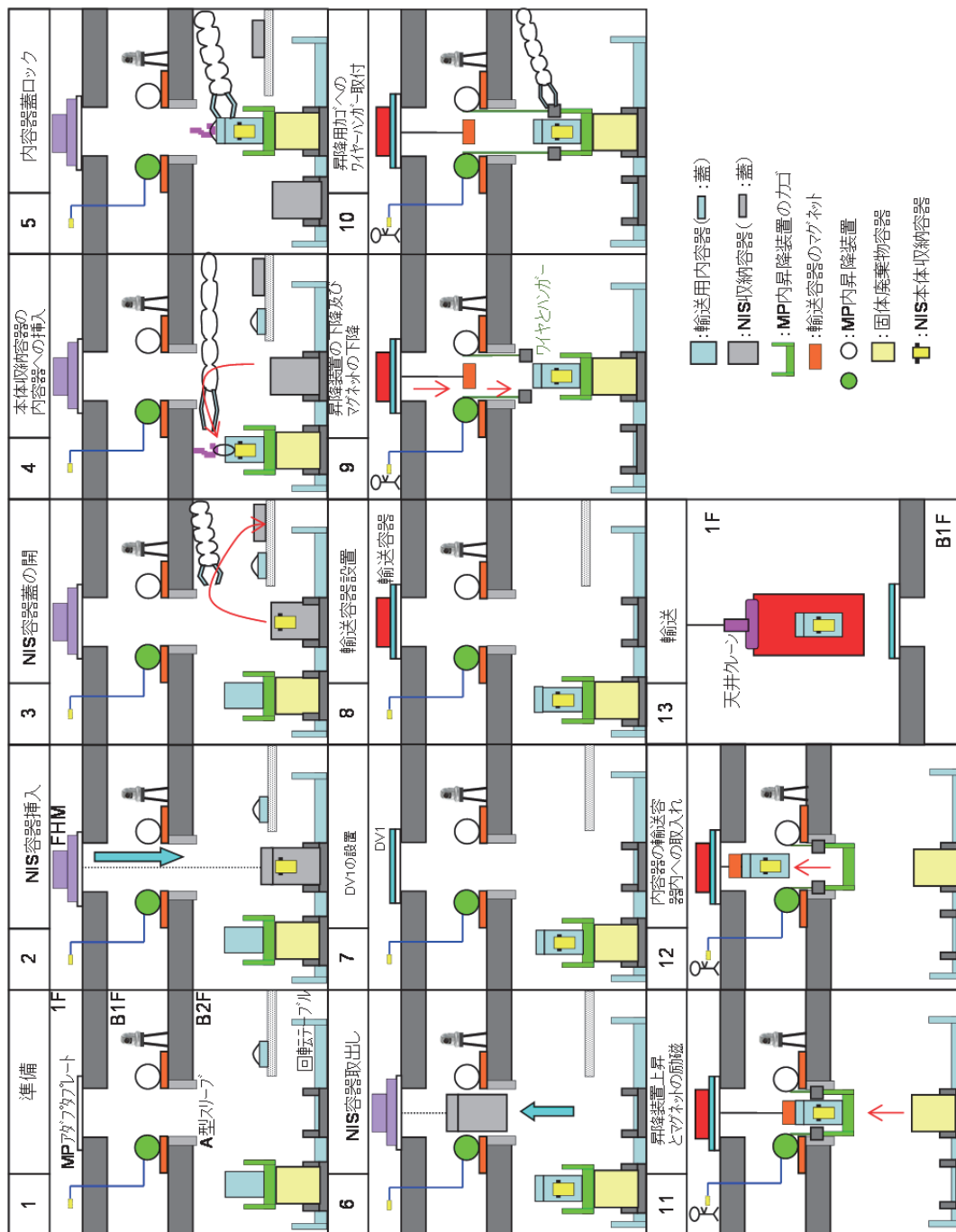


Fig.4.2 ホットセル内の作業計画

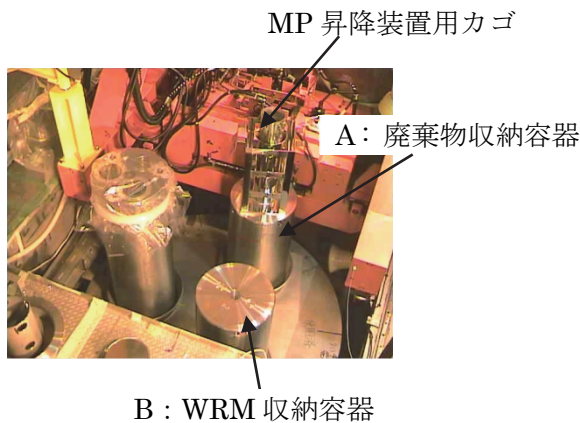
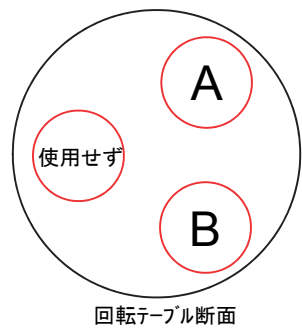
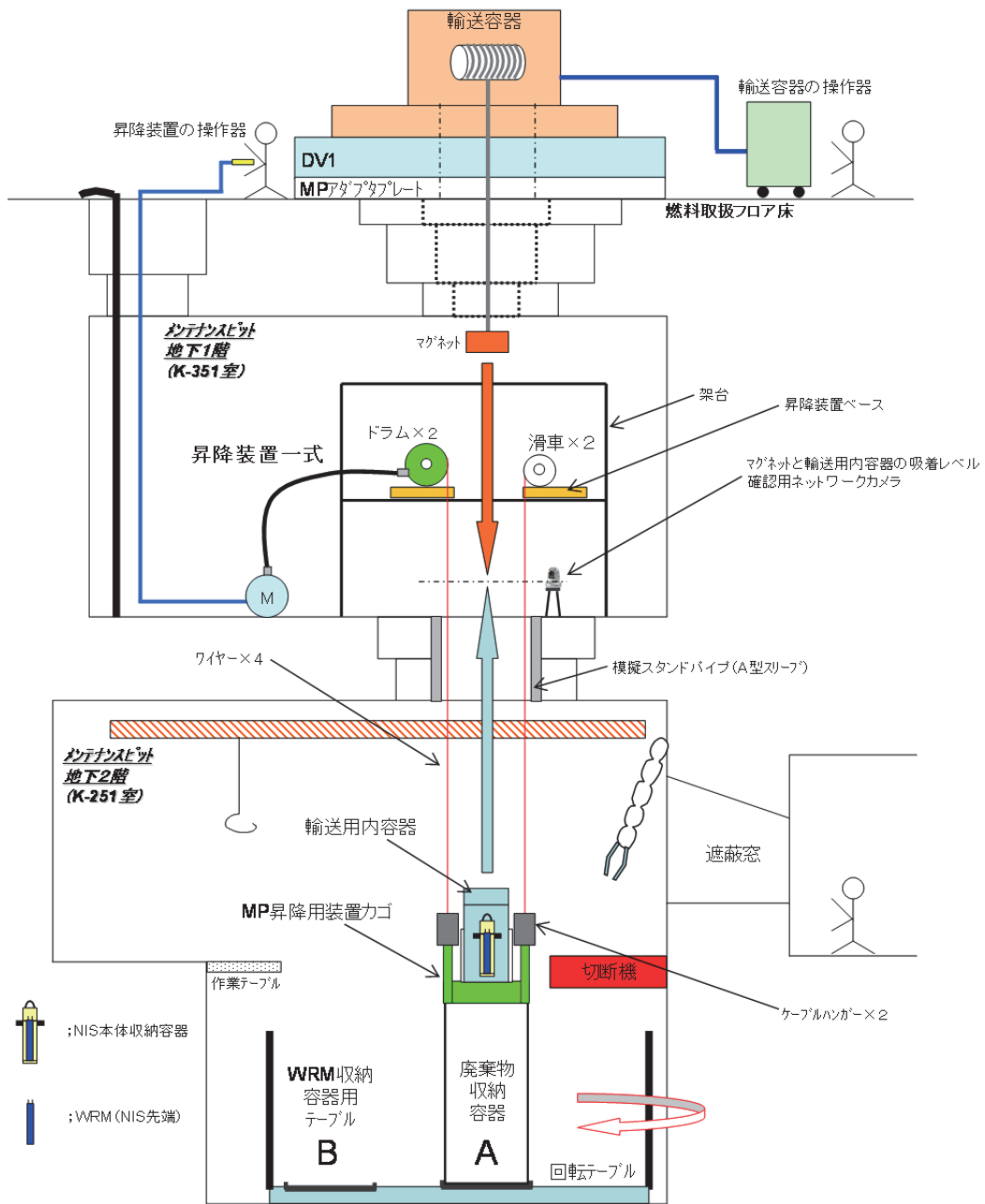


Fig.4.3 昇降装置概念図



Fig.4.4 輸送用内容器外観図

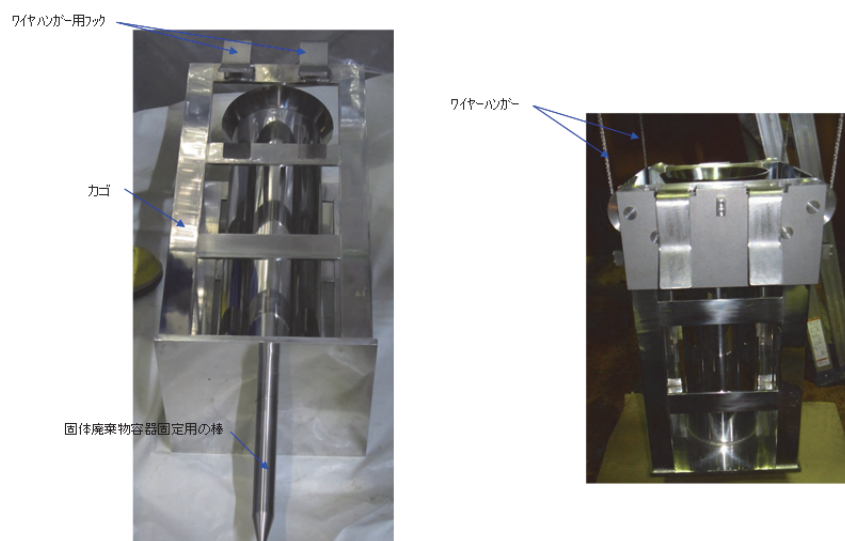


Fig.4.5 MP 昇降装置用カゴ外観図

HTTR 使用済広領域中性子検出器が核分裂性輸送物とならない理由

核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示

(核分裂性輸送物とならない核燃料輸送物)

第二十二条 規則第十一条の主務大臣の定める核分裂性物質に係る核燃料輸送物は、次の各号のいずれかに該当するものとする。

一 一の荷送人により一又は二以上の輸送物を運搬するに当たり、当該輸送物すべてに含まれるウラン二三三、ウラン二三五、プルトニウム二三九又はプルトニウム二四一（以下「核分裂性核種」という。）の総量が次式において一を超えない範囲で運搬される場合であって、次に掲げる要件のいずれかに適合する核分裂性物質を収納したもの。ただし、核分裂性物質に含まれるベリリウム及び重水素（天然に存在するものを除く。）の重量が、それぞれ次の表の上欄に掲げる核分裂性物質の状態に応じ適用される同表の中欄及び下欄に掲げる重量のうち、最小のものの一パーセントを超えないものに限る。

ウラン二三五の重量（グラム）／X＋他の核分裂性核種の重量（グラム）／Y

この場合において、X及びYは、次表による。

核分裂性物質の状態	核分裂性核種の重量	
	X（グラム）	Y（グラム）
平均水素濃度が水以下の物質との混合物である場合	四百	二百五十
平均水素濃度が水より大きい物質との混合物である場合	二百九十	百八十

- イ 個々の輸送物中の核分裂性核種の重量の合計が十五グラムを超えないもの
- ロ 水素が均一に分布している核分裂性物質であって、水素の重量に対する核分裂性核種の重量の比率が五パーセント未満であるもの
- ハ 収納されている核分裂性物質のうち、最も臨界に達しやすい〇・〇一立方メートルの体積中に含まれる核分裂性核種の重量が五グラムを超えないもの
- 二 ウラン二三五の濃縮度が一パーセント以下であって、かつ、プルトニウム及びウラン二三三の重量の合計がウラン二三五の重量の一パーセント以下であって、核分裂性核種が均一に分布している核分裂性物質（ウラン二三五が、金属、酸化物又は炭化物として存在する場合において、当該核分裂性核種が格子状配列を構成するものを除く。）を収納したもの
- 三 次に掲げる要件に適合する硝酸ウラニル溶液を収納したもの
 - イ ウラン二三五の濃縮度が二パーセント以下であること。
 - ロ プルトニウム及びウラン二三三を含む核分裂性物質であって、これらの重量の合計がウランの重量の〇・〇〇二パーセント以下であること。
 - ハ ウランの原子数に対する窒素の原子数の比率が二以上のものであること。
- 四 収納されている核分裂性核種がプルトニウムのみの核燃料輸送物であって、プルトニウムの重量が一キログラム以下のものうち、プルトニウム二三九及びプルトニウム二四一の重量の合計がプルトニウムの重量の二十パーセント以下であるもの

1. HTTR 使用済広領域中性子検出器に含まれるウラン量

HTTR 広領域中性子検出器 1 体に含まれるウラン 235 の重量は 0.16(g)であるため次式より、

$$\frac{0.16(g)}{290(g)} + \frac{0(g)}{180(g)} = 0.00055 < 1$$

また、第二十三条の一 イ 個々の輸送物中の核分裂性物質の重量の合計が十五グラムを超えないもの。に該当するため、今回の輸送対象物である中性子検出器は、核分裂性輸送物とならない。

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	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
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	1
比透磁率 ^(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	1	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	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
磁束	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)
放射線核種の放射能 ^(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	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に使用される。
 (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 (CF-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
粘り	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	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
比エントロピー	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
電表面積	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	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 ³ 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=11=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、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	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)=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	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	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 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=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	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	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

