

原子力災害対応用ロボットの性能試験法

－貫通孔を介した展開後の走破性能試験（JAEA-TM-0004、JAEA-TM-0005）－

Test Methods for Robots for Nuclear Emergency Response and Decommissioning

-Tests for Moving Performances of Robots (JAEA-TM-0004 and JAEA-TM-0005)-

川端 邦明 山田 大地 阿部 浩之

Kuniaki KAWABATA, Taichi YAMADA and Hiroyuki ABE

福島研究開発部門

福島研究開発拠点

櫛葉遠隔技術開発センター

Naraha Center for Remote Control Technology Development

Fukushima Research Institute

Sector of Fukushima Research and Development

November 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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。
本レポートの転載等の著作権利用は許可が必要です。本レポートの入手並びに成果の利用(データを含む)は、
下記まで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ウェブサイト (<https://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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.
Reuse and reproduction of this report (including data) is required permission.
Availability and use of the results of this report, please contact
Institutional Repository and Utilization Section, JAEA Innovation Hub,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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, 2021

原子力災害対応ロボットのパフォーマンス試験法
—貫通孔を介した展開後の走破性能試験 (JAEA-TM-0004、JAEA-TM-0005)—

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点
楢葉遠隔技術開発センター

川端 邦明、山田 大地、阿部 浩之*

(2021 年 8 月 17 日受理)

本稿は、原子力災害対応および廃炉作業に用いるロボット等の遠隔操作機器（以下、ロボット）の性能を定量的かつ相対的に評価するための試験法について記述したものである。東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、1F）での事故発生後から現在まで、作業やタスクに応じて多種多様な遠隔操作ロボットが導入されている。このような作業経験と教訓は、将来のロボットの設計、開発に重要であることから、我々はこれらを参考にしてロボット性能評価のための試験方法の開発に取り組んでいる。近年の廃炉作業においては、原子炉格納容器内の核燃料デブリの分布や状態に関する調査が実施されている。格納容器内部へロボット等の投入・展開は、放射性物質の飛散の防止のために小口径の貫通孔を介して行われている。著者らが 1F の 1,2 号機での作業実施について調査したところ、貫通孔を介して格納容器内に展開した後にロボットによって調査作業を実行するためには、貫通孔にケーブルを通した状態で、貫通孔の出口から下方にある床面上での自在な走行および貫通孔の出口から下方に位置する傾斜面上での自在な走行について高い性能が必要であることがわかった。本稿は、これらの性能に注目して、定量的かつ相対的なロボットの性能比較・評価に資する、貫通孔を介した展開後の床面上走破性能試験と貫通孔を介した展開後の傾斜面上走破性能試験の 2 つの試験手順について記述するものである。試験実施の参考のために、具体的な試験環境の例とテスト実行のデモンストレーションの様子についても掲載している。

Test Methods for Robots for Nuclear Emergency Response and Decommissioning
–Tests for Moving Performances of Robots (JAEA-TM-0004 and JAEA-TM-0005)–

Kuniaki KAWABATA, Taichi YAMADA and Hiroyuki ABE*

Naraha Center for Remote Control Technology Development
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Naraha-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

(Received August 17, 2021)

This report describes the test procedures for performance evaluation of remotely operated robot utilized for nuclear emergency responses and decommissioning that provide to compare among the robot's performances quantitatively and relatively. After the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of the Tokyo Electric Power Company Holdings Inc. (FDNPS) occurred, remotely operated robots have been deployed and utilized in the response tasks. Such post-accident work experiences and lessons learned are very valuable for developing the robots in the future. Therefore, we were motivated to develop the test methods for performance evaluation of the robot by referring with such experiences and lessons. In recent decommissioning tasks, reconnaissance on the distribution and status of nuclear fuel debris inside the Primary Containment Vessel (PCV) have been carried out. The insertion and deployment of robots into PCV were carried out through a penetration pipe with small diameter to prevent the scattering of radioactive materials. According to the authors' survey on such works have carried out in Units 1 and 2 of FDNPS, in order to carry out the reconnaissance work by the robot deployed into the PCV, it was clarified that the robots are required to run freely on the floor located below the exit of the penetration pipe and run freely on the inclined surface located below the exit of the pipe. This document describes two test procedures for performance evaluation of the robot connected with the cable such as running on the floor after being deployed through a penetration pipe and running on the inclined surface after being deployed through a penetration pipe. Typical course layout and the demonstration of test running are also illustrated for the references.

Keywords: Test Methods for Robot, Running on the Floor after Being Deployed through a Pipe,
Running on the Inclined Surface after Being Deployed through a Pipe

*Ascend Co., Ltd.

目 次

1	緒言	1
2	原子力災害対応用ロボットの性能評価のための試験法について	3
3	原子力災害対応におけるロボットを用いた作業と経験	5
4	貫通孔を介した展開後の床面上走破性能試験（番号 JAEA-TM-0004）	7
4.1	目的	7
4.2	評価対象	7
4.3	評価の概要	7
4.3.1	試験方法	7
4.3.2	具体的な試験環境の例	9
4.4	参考試験・環境条件	13
4.5	試験実施の例	14
4.6	試験実施内容の記録について	15
4.6.1	専用フォーマット	15
4.6.2	専用フォーマットへの記入例	16
4.7	参考事例	17
5	貫通孔を介した展開後の傾斜面上走破性能試験（番号 JAEA-TM-0005）	18
5.1	目的	18
5.2	評価対象	18
5.3	評価の概要	18
5.3.1	試験方法	18
5.3.2	具体的な試験環境の例	20
5.4	参考試験・環境条件	23
5.5	試験実施の例	24
5.6	試験実施内容の記録について	25
5.6.1	専用フォーマット	25
5.6.2	専用フォーマットへの記入例	26
5.7	参考事例	27
6	まとめ	28
	謝辞	29
	参考文献	29

Contents

1	Introduction	1
2	Test Method for Performance Evaluation for Nuclear Emergency Response Robots	3
3	Executed Tasks and Experiences by the Robots deployed in FDNPS	5
4	Test for Running on the Floor after being deployed through a Penetration Pipe (JAEA-TM-0004)	7
4.1	Purpose	7
4.2	Evaluation Target	7
4.3	Examination Outline	7
4.3.1	Test Method	7
4.3.2	Examples of Test Environment	9
4.4	Test Conditions to Consider	13
4.5	Examples of Demonstration	14
4.6	Test Result Record	15
4.6.1	Dedicated Record Format	15
4.6.2	An Example Entry	16
4.7	Reference Cases	17
5	Test for Running on the Inclined Surface after being deployed through a Penetration Pipe (JAEA-TM-0005)	18
5.1	Purpose	18
5.2	Evaluation Target	18
5.3	Examination Outline	18
5.3.1	Test Method	18
5.3.2	Example of Test Environment	20
5.4	Test Conditions to Consider	23
5.5	An Example of Demonstration	24
5.6	Test Result Record	25
5.6.1	Dedicated Record Format	25
5.6.2	An Example Entry	26
5.7	Reference Cases	27
6	Summary	28
	Acknowledgements	29
	References	29

1 緒言

2011年3月11日に発生した東日本大震災の影響によって東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（以下、1F）で事故が発生し、原子炉建屋内は人の立ち入りが困難な状態になった。このため、作業員の被ばくリスク低減を考慮して、事故直後からロボットを用いた作業が実施されている^{[1]-[5]}。これまでに行われたロボットによる作業のほとんどが成功裏に実施されているものの、事前想定が難しい要素が含まれる作業環境での遠隔操作による作業実施は容易ではなく、作業中にトラブルが発生しているケース^[6]もある。これらの経験や事例は、今後の原子力災害対応用ロボットの開発時や現場展開時に、ロボットの性能として留意すべき点を示唆していると考えられる。また、作業環境やタスクが設定された場合にどのロボットを適用すべきかを判断するためにロボットの性能を事前に評価・確認・整理しておくことは、安全かつ着実な原子力災害対応作業や廃炉作業の実施に大変重要なことである。

このような観点から、米国の標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology、以下、NIST）では、ロボットが災害対応のために持つべき性能の評価を定量的かつ相対的に行うことを目的とした、災害対応ロボット用標準試験法（Standard Test Methods for response robots、以下、STM）^{[7]-[9]}の開発が行われている。STMは災害対応ロボットの性能評価と対象としていることから、一部原子力災害対応時にも必要とされる性能についての試験法も含まれているが、1Fでの作業例を見れば、必ずしも全てをカバーしているわけではない。このため我々は、1Fでのロボットを用いた作業経験を参考に、原子力施設内における災害対応を行うためのロボットに必要とされる性能を定量的に評価するための手段を構築することを目的として、原子力災害対応用ロボットの性能試験法について研究開発に取り組んでいる。ここで、性能試験法開発のねらいとは、対象となる作業およびタスクを実施するためにロボットが持つべき基盤的な性能を定量化することであり、この定量化された値に基づいて他のロボットとの相対的な性能比較を可能とすることである。

これまでに我々は、原子力災害対応用ロボットの持つべき性能のうち、原子炉建屋内での調査作業実施のために必要不可欠である走破性能を試験する方法について開発を行い、その手順について報告している^[10]。これに引き続いて本稿では、原子力災害対応用ロボットの持つべき性能のうち、原子炉格納容器内での調査作業実施のために必要不可欠である、貫通孔を介して閉鎖空間内に展開された後のケーブル付きロボットの移動性能について定量的な評価を行うための試験手順について記している。これまでの1Fにおけるロボットを用いた原子炉格納容器内での調査作業の記録を参照すると、小口径の貫通孔を通過可能なサイズ、かつ、ケーブルを接続したロボットが貫通孔を通じて展開された後に、平面上での走行や傾斜面上での走行に基づいて作業が行われており、作業中のトラブル発生についての報告もある^{[11],[12]}ことから、これら进行评估すべき項目であると判断した。ここで、小口径貫通孔を介してケーブルに接続されたロボットを閉鎖空間に展開した際の走破性能に関する試験法についてはNISTのSTMにも存在しないため、ここでは上記した3項目の性能試験法を設定することとした。我々は、性能試験法の開発のために、それぞれの性能に求められるエッセンスを取り扱った試験の要件を整理、設定し、それをミニマルに

実現する試験環境と手順を具体化するアプローチをとった。エッセンスとしては、小口径の貫通孔を介してケーブル付きロボットを展開した後に、平坦な床面上でロボットを走行制御することが重要となる。また、小口径の貫通孔を介してケーブル付きロボットを展開した後に、傾斜面上でロボットを走行制御することが重要となる。本稿は、これらを基にして、貫通孔を介した展開後の床面上走破性能試験（JAEA-TM-0004）、貫通孔を介した展開後の傾斜上走破性能試験（JAEA-TM-0005）についてまとめ、試験実施者が本稿を一読することで試験が実施可能となるよう留意して、試験方法や具体的な試験環境の例、試験実施の例等を記したものである。

【用語の定義】

本稿で用いる用語について、以下のように定義する。

ロボット：物理的世界で目標を達成するため、センシングと行動を制御できるように設計された機械システム。

試験実施者：試験実施にあたり、ロボットへの動作指令および管理を行う者を指す。

試験監督者：試験実施にあたり、試験前の各手順の確認、試験実行管理、試験結果・内容の記録を客観的に行う者を指す。

試験監視者：試験実施にあたり、試験環境周辺にて試験中のロボットの状態を監視する者を指す。試験中の緊急時には試験実施者および試験監督者に走行継続不能と申告する。試験対象であるロボットの挙動やスペックに詳しい者が望ましい。

2 原子力災害対応ロボットのパフォーマンスのための試験法について

本章では、本稿で扱うパフォーマンスのための試験法の考え方と、試験法の設定プロセス等について述べる。

原子力災害、特に 1F での事故のような防災対策の範囲外である想定外事象の場合、災害状況の事前予測は困難であり、発災後に現場に人の立ち入りが制限されることから状況の把握ですら難しくなる。原子力災害対応とはつまりこのような事前予測困難な状況に如何に対応するか、ということにある。このような状況下において安全、着実に原子力災害対応にロボットを適用するためには、作業要求が発生した際に迅速にその内容や状況に適したロボットを選択できるように、各ロボットの持つ性能とそれがどの程度であるかについて事前に把握し、見極めておくことが大変重要である。パフォーマンスの評価に用いられる「性能標準」(製品に求められているパフォーマンスを指定すること)を設定してそれを満たすか否かを見るアプローチがあるが、事前予測が困難な状況を含む原子力災害に対応するための性能基準をどう規定するか、という潜在的な課題があるため、このアプローチを原子力災害対応ロボットのパフォーマンス評価に適用することが難しい。性能基準をどう設定すべきかの議論そのものが大変困難なものであり、このことは自然災害対応や事故対応等に対応するロボットのパフォーマンス評価においても同様である。つまり、災害対応時に安全、着実な対応作業を実施するためには、作業要求に対してできるだけ適したロボットを選定して投入する、というアプローチを取ることが实际的である。このことから、NIST では、災害対応ロボットの持つべきパフォーマンスを評価する標準的な試験方法を提供するための試みとして STM の開発を進めている^[7-9]。ここで STM におけるロボットのパフォーマンス評価の考え方とは、ロボットの災害現場で要求される作業を遂行するために重要なパフォーマンスに関して、性能基準を定めて行うものではなく、ロボットのパフォーマンスを定量化する標準的な試験方法を提供し、試験実施によって得られた定量値によって客観的にロボット間のパフォーマンス比較を行うことにある (図 2-1)。

前述のように事前予測が難しい環境で作業を行う原子力災害対応ロボットの性能基準の設定が困難であることを考えれば、この STM のようなロボットの性能について定量化することで客観的にパフォーマンスを把握・比較するパフォーマンス評価の考え方は、実際的なアプローチとして有用であるといえる。このことから我々は NIST により開発されている STM のコンセプトに則って、原子力災害対応ロボットに必要とされるパフォーマンスを定量化して評価する標準的な試験方法の開発に取り組んでいる。

ここで、NIST の取り組み、考え方を参考にして、標準的な試験方法とは以下を満たすものとしている。

- ・ 試験実施を希望する者が、共通した試験条件、試験手順によって試験が実施できること。
- ・ 試験環境は、試験対象性能が要求される状況を抽象化したものとなっており、かつ、特殊な施設や装置を用いずに設置できること。
- ・ 試験対象性能を分かりやすい定量値として表すことができ、特殊な機器を用いずとも測定を行うことが可能であること。
- ・ 設定されている試験条件・環境を規定している主要な(できるだけ少数の)パラメータを変更することで、試験条件や手順を変容させずに難易度を調節できること。

また、試験法を開発、設定するにあたり、我々が実施している具体的な手順は以下のようである。

まず 1F の事故現場に投入された遠隔操作ロボットとその作業内容、状況等に関する調査に基づいて原子力災害対用ロボットが持つべき性能の抽出を行う。これにより抽出された性能のうち、既に NIST の STM 開発において取り上げられている性能については開発対象から除外する。この結果残った性能が原子力災害対用ロボットを評価するために必要なものとなる。対象となる性能が必要とされる状況を抽象化した模擬環境(試験場)として設計し、試験実施手順ともあわせて試験法としてまとめていく。試験法としてまとめていく過程では、具体的な試験環境を設定し、ロボットを用いた検証実験に基づいた修正、改良を行っていく。

以上が著者らの原子力災害対用ロボットの性能評価を行うための試験法についての考え方および開発や設定の手順であり、次節以降では実施した対象性能の抽出や試験実施手順および諸条件、具体的なコース例等について記載している。

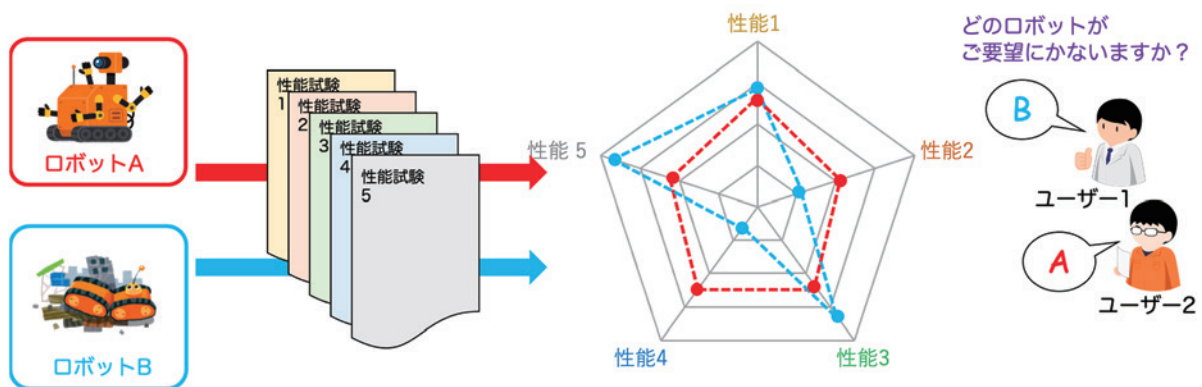


図 2-1 性能評価のための試験法の概念図

3 原子力災害対応におけるロボットを用いた作業と経験

本章においては、前章でふれた 1F での事故への対応、つまり原子力災害対応作業や廃炉作業のうち、原子炉格納容器内を調査するために用いられた代表的な遠隔操作ロボットとその成果、また、作業実施の際に得られた経験等について述べる。

原子炉建屋内の中央に設置されている原子炉格納容器の内部は、事故の影響等によって想定が困難な状況になったことから、ロボットによる調査作業は原子炉格納容器内の状況を少しでも把握するためには必要不可欠であり、得られた情報は後の燃料デブリ取り出し等の作業計画立案に活用される極めて重要なものである。以下に、事故後に行われた 1F 原子炉格納容器内の調査作業の具体例と作業を実施したロボットの例について紹介する。

1号機の原子炉格納容器内の調査作業については、まず事前調査として、1号機の原子炉格納容器に設置されている X-100B と名付けられている貫通孔内に設置した内径 0.1 メートルのガイドパイプから、センサやサンプリング装置を内部に挿入することで、内部の状態の目視確認や雰囲気気線量の測定、滞留水の水位測定および採取が行われた^[13]。この結果をうけて、より詳細な原子炉格納容器内部の状態や燃料デブリの広がり状態等を把握するために、PMORPH^[14]と呼ばれる自走式の遠隔操作ロボットを用いて調査作業が実施された^{[15][16]}。PMORPH は、X-100B 内のガイドパイプから原子炉格納容器内部に展開された後、ペDESTAL外部の 1 階グレーチング上を走行して構造物の状態や線量率等の情報収集に大きく貢献した。一方で、調査作業実施中に当初予定していたアクセスルートの一部に障害物（落下物と推定）が認められたことからルートを変更したところ、グレーチング接合部の隙間に右クローラがはまり込んでスタックし、原子炉格納容器内にロボット 1 台が残置されることになった^[11]。また、2号機の原子炉格納容器内の調査作業については、事前調査として X-53 と名付けられている貫通孔内に設置したガイドパイプからセンサを内部に挿入することで、内部状態に関する目視確認等が行われた^[17]。この調査結果をうけて実施された調査作業では、遠隔操作型の自走式調査装置（通称 サソリ型ロボット）^[14]が、X-6 と名付けられている貫通孔内に設置された内径 0.11 メートルのガイドパイプを介して内部に展開され、制御棒駆動機構交換用レール（以下、CRD レール）上およびペDESTAL内部のプラットフォーム上で走行を行い、ペDESTAL内部の情報収集に大きく貢献した^[18]。特に、原子炉圧力容器直下のプラットフォームの脱落や、プラットフォーム上堆積物の存在、原子炉格納容器内部に高線量線源の存在等が明らかになり、さらなる内部調査や燃料デブリ取り出しの計画立案に重要となる情報をもたらした。しかしながら、サソリ型ロボットが CRD レール上を走行中に、堆積物の影響等で駆動部が動作しづらくなって走行が困難となる事象が発生し、このため、ロボット 1 台が次の作業やアクセスの障害とならない位置にて残置されることになった^[12]。

このように、1F において実施されたロボットによる原子炉格納容器内調査作業では概ね成功裏に実施されて大きな成果を得ている一方で、幾つかのトラブルが発生している。これらの作業経験は、原子力災害対応ロボット開発や操作訓練を行う上で、留意すべき貴重な教訓として捉えるべきである。特に、原子炉格納容器内でのロボットによる調査作業は、内部の放射性物質を外部に放出しないために、小口径の貫通孔やガイドパイプを介してケーブル付きのロボットが展開されて、展開後は展開口にケーブルを通した状態で原子炉格納容器内を移動することで行われており、ロボットの移動性能は作業推進に大きく影響を及ぼすものである。そこで前述の内部調査の実施例

から、ケーブル付きロボットが貫通孔を介して展開された状況下において、平坦な床面上での走行と、緩やかな傾斜面上での走行が重要であると考えた。また、NIST が開発を行っている STM においてこれらに該当する性能試験法については検討、議論がされていないことから、原子力災害対応ロボットの持つべき走破性能として、貫通孔を介した展開後の床面上走破性能と、貫通孔を介した展開後の傾斜面上走破性能を抽出して、性能試験を行うための標準的な方法について開発に取り組むこととした。前述のように、開発した性能試験法のねらいとは、各対象性能について定量化を行うことで、ロボットを利用・選定するユーザーによるロボット間の性能比較を容易にするための基盤的枠組みを提供するものである。

次章以降で、本稿で扱う原子力災害対応用ロボットの性能評価を行うための試験法の考え方についての説明および本節で述べた性能を評価するための試験法について諸条件、手順等をまとめたものについて記す。

4 貫通孔を介した展開後の床面上走破性能試験

(番号 JAEA-TM-0004)

4.1 目的

本試験は、原子力施設内における調査・情報収集タスクを実施するための機器・システムを搭載したロボットを対象とし、当該ロボットに必要とされる「貫通孔の先に足場がなく、体長より十分深い下方にある床面上を走破する性能」について、定量的に評価を行うことを目的としている。

4.2 評価対象

本試験の評価対象は、貫通孔から展開されたケーブル付きロボットの床面上における走破性能である。

4.3 評価の概要

本試験においては、下記に記した試験方法および試験環境によって評価を行うものとする。尚、試験結果については専用フォーマット（4.5 を参照）に必要事項を記載することで記録を残す。

4.3.1 試験方法

4.3.1.1 試験条件と試験環境構成要素

ここでは、試験実施に関する諸条件と試験環境の代表的な構成要素について記述している。

- 試験実施者はロボットから知覚的に隔離されており、ロボットに搭載したセンサから取得されたデータに基づいて操作することで試験を実施する。
- 同一試験環境での移動を繰り返し実行した結果によって性能評価を行うこととする。
 - 例えば、試験環境内の走行コース両端にスタート地点と折り返し地点を設定し、この間を往復移動することで試験を実施する方法があり、試験環境の設置規模をコンパクトにするために有効である。
- 制限時間は 30 分間とする。
 - ここで、試行回数をより多く取れば、より信頼性の高い性能評価が実施できるわけだが、試験対象ロボットの同一機体を用いて同日に複数種類の性能試験を実施すること（充電やバッテリー交換作業の時間、操作者の休憩時間等のインターバルも含めて）を考慮して時間制約を設けた。
- 試験環境の具備すべき構成要素として、以下をコース内に含むものとする。
 - 試験対象であるロボットが挿入可能な口径をもつ、十分硬い直線状の配管が水平に設置されている。
 - 設置した配管の一方の端部を出口側開口部とし、その出口側開口部を境界として上下左右に広がる垂直な平面状の壁が設置されている。
 - 配管の出口側開口部から十分垂直下方に、平坦な床面が設置されている。

4.3.1.2 確認・計測・記録項目

ここでは、試験実施にあたって確認する事柄、計測する事柄、記録する事柄について記述している。

- 試験開始前、試験監督者は試験実施者とともにロボットおよび試験環境の外観検査を行い、専用フォーマットに結果を記録する。
- ロボットに接続されたケーブルが配管の出口側開口部から入口側開口部を通じて試験コース外部に出ていることを確認する。
- 到達判断については、コース中に指定ゾーンを設定して、ロボット全体が完全に指定ゾーンに入っていることで、到達している、とする。
 - ここで、上述の往復移動による試験の実施の場合であれば、試験コースのスタート／ゴール地点と折り返し地点にそれぞれゾーンを設けて、ロボット全体が完全にこのゾーンに入っていることでその地点に到達した、と判断する。この場合、ゾーン高さは通路面高さと同程度になるように設置する。
- 試験監督者は、走行にかかった総合時間を計測し、計測値を専用フォーマットに記録する。
- 試験監督者は、コースレイアウトの基準走行距離を用いて、時間あたりの平均移動距離（メートル毎分）を算出する。算出値を専用フォーマットに記録する。
- 試験監視者により試験中の緊急事態が判断された場合は、試験実施者へ停止を指示し、試験実施者は速やかにロボットの動作を停止させ、試験継続不能となったことを試験監督者に通告する。
- 試験途中でロボットが走行継続不能となった場合は失敗として試験終了とし、その時点での上記の計測値、失敗までの算出値を専用フォーマットに記録する。
- 制限時間を超えた場合は試験終了とし、その時点での算出値を専用フォーマットに記録する。
- 試験終了後、試験監督者は試験実施者とともにロボットおよび試験環境の外観検査を行い、結果を専用フォーマットに記録する。

4.3.1.3 試験手順

前述の諸条件等を確認の上、試験の開始から終了までを以下の手順で行うものとする。

- 試験実施者が、ロボットをスタート地点となるエンドゾーンに設置する。このとき、ロボット本体が走行コース上にはみ出さないように注意すること。
- 試験実施者は、試験を開始する準備が整った時点で準備完了を試験監督者に通知する。
- 試験監督者は、通知を受けて試験開始を試験実施者に通知し、4.3.1.2に記載されている項目に従って計測、記録を開始する。
- 試験実施者は、試験実施中に状況に応じて配管入口側開口部の外部においてケーブルの調整・操作を行うことができる。ただし、ケーブルの操作によりロボットの動作へ著しく影響を及ぼしてはならない。
- 試験実施者は、試験の終了した場合もしくは、試験継続不能となった場合には、試験監督者にこれを通知する。試験監督者は、試験実施者からの通知に基づいて結果を専用フォーマットに記録を行う。

4.3.2 具体的な試験環境の例

上述の条件を満たし、原子力災害対応作業を想定したコースの具体的な構成例を示す。(図 4.3.2-1 を参照)

- ロボットの大きさに基づいて配管口径を選定し、長さ 1 メートルの配管を 1 本用いる。
- 図 4.3.2-1 のコースでは、配管内径は約 0.1 メートルとした。表 4.3.2-1 は参考までにステンレス鋼管および塩ビ管の配管呼び径と配管内径についての参考値を示してしている。尚、1F での廃炉作業において 1 号機の原子炉格納容器内へロボットがアクセスした際の貫通孔の内径が約 0.1 メートルであったことを参考にした。
- 配管は配管軸が水平になるように設置する。設置位置は走路用の床面から 1.5 メートル上方に配管口径の円形部の中心が位置するように設定する。設置の際、架台や固定具(図 4.3.2-2)を用いて配管を固定する。
- 配管の出口側開口部周囲から下方の床面まではケーブルの侵入を防ぐために壁状とする。
- 床面は四角グレーチング台(図 4.3.2-3) 5 台を用いて構成する。
- 床面幅は 1.2 メートル。
- 試験経路両端にはスタート地点となるエンドゾーンと折り返し地点のエンドゾーンを設置し、スタート地点のエンドゾーンから通路上を移動して折り返し地点のエンドゾーンまで到達した後、逆順でスタート地点まで到達することで 1 往復とする。
- 配管の出口側開口部から最も近い四角グレーチング台をスタート地点のエンドゾーンとし、配管の出口側開口部から最も遠い四角グレーチング台を折り返し地点のエンドゾーンとする。(図 4.3.2-4 を参照)
- 1 往復の基準走行距離は 3.6 メートルとする。
- 5 往復の走行を基準課題とする。
 - 往復回数は、最大速度 0.04 メートル毎秒(2.5 メートル毎分)程度の移動速度のロボットを用いた走行実験によって 1 往復に 2 分から 4 分 30 秒程の時間を要したことから、制限時間内での実施が十分可能となるように余裕をみて、往復回数を決定した。

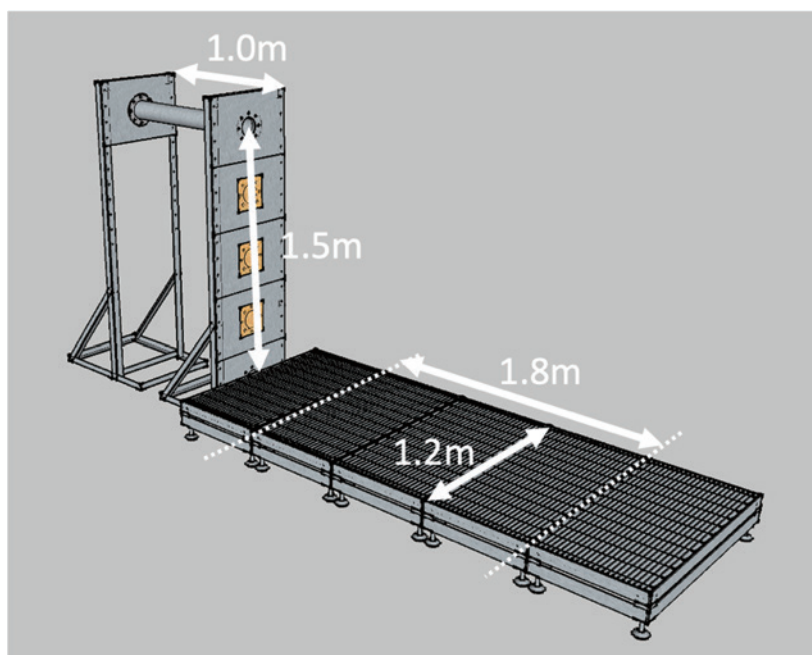


図 4.3.2-1 原子力災害対応作業を想定したコースの外観・レイアウト

表 4.3.2-1 配管の内径

配管呼び径	配管内径
ステンレス鋼管 100A	約 0.11 メートル
塩ビ管 VU 100	約 0.10 メートル

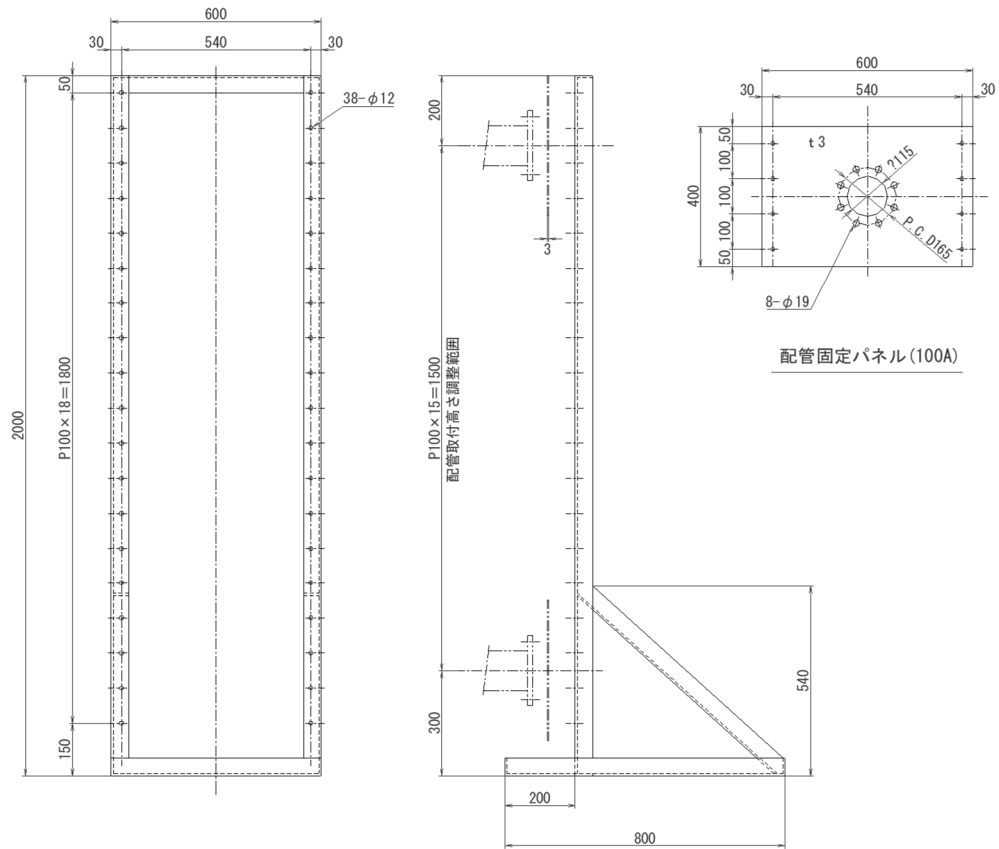


図 4.3.2-2 配管設置用架台の寸法 (図中の単位はミリメートル)

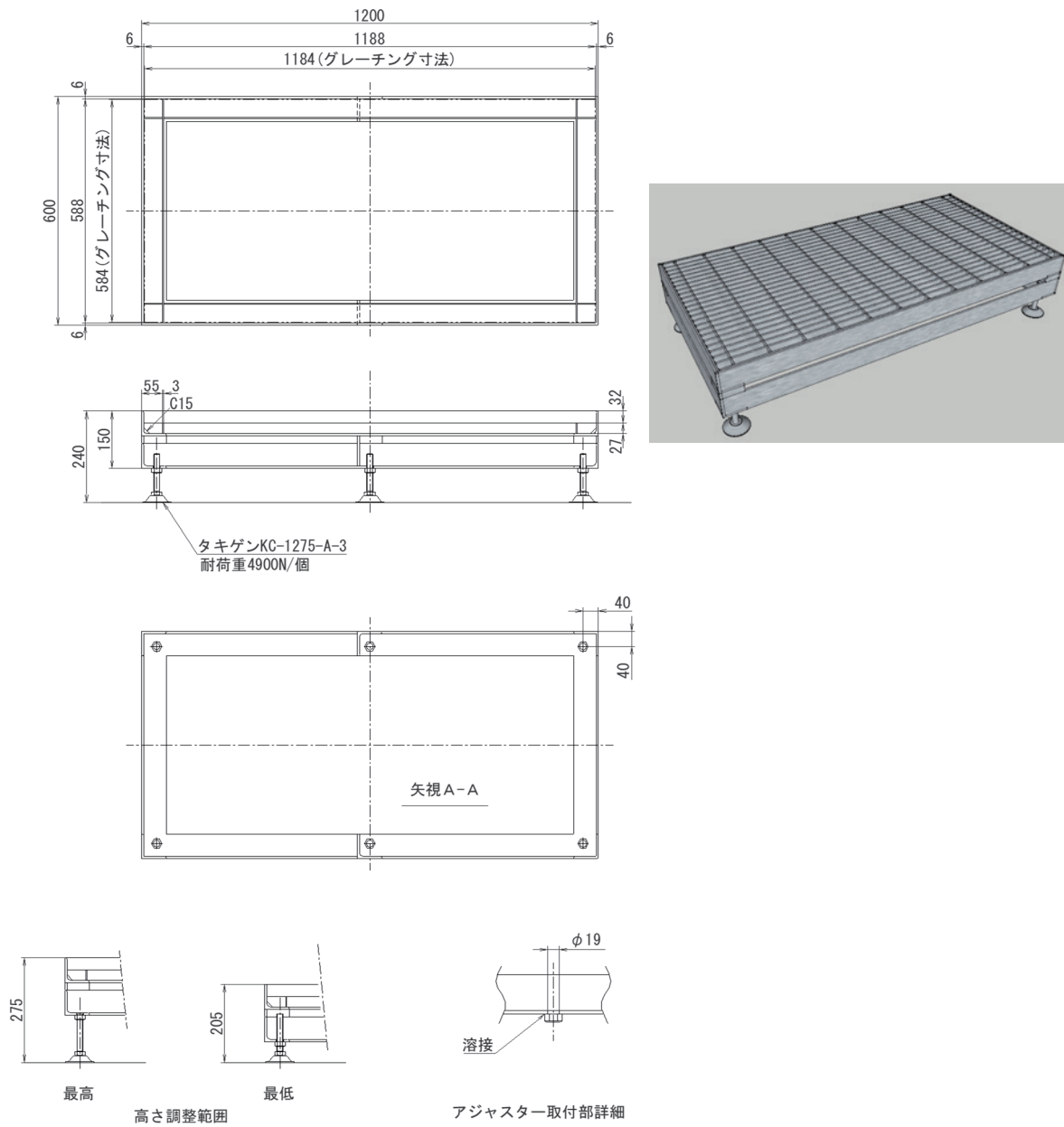


図 4.3.2-3 四角グレーチング台の寸法 (図中の単位はミリメートル)

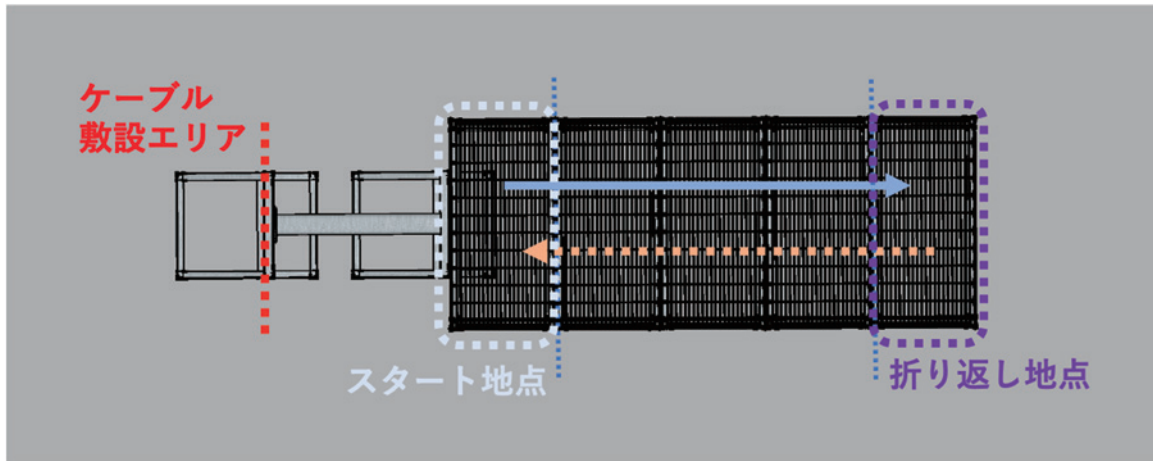


図 4.3.2-4 設定コース上の走行ルート（図 4.3.2-1 のコースを上方からの視点で表示）

4.4 参考試験・環境条件

本試験を実施するにあたり、下記の点について留意することも重要である。

- 外部照明が無い環境下での試験の実施。
- 床面上に起伏や障害物がある環境下での試験の実施。
- 試験が失敗した場合の事象や原因について分かる範囲での専用フォーマットの備考欄に記録する。

4.5 試験実施の例

参考として、4.3.2 において記述した試験環境において実際に試験を行った様子を図 4.5-1 に掲載する。尚、この場合、設定コース内の両端にある四角グレーチング台 1 枚ずつはエンドゾーンとして設置したものである。

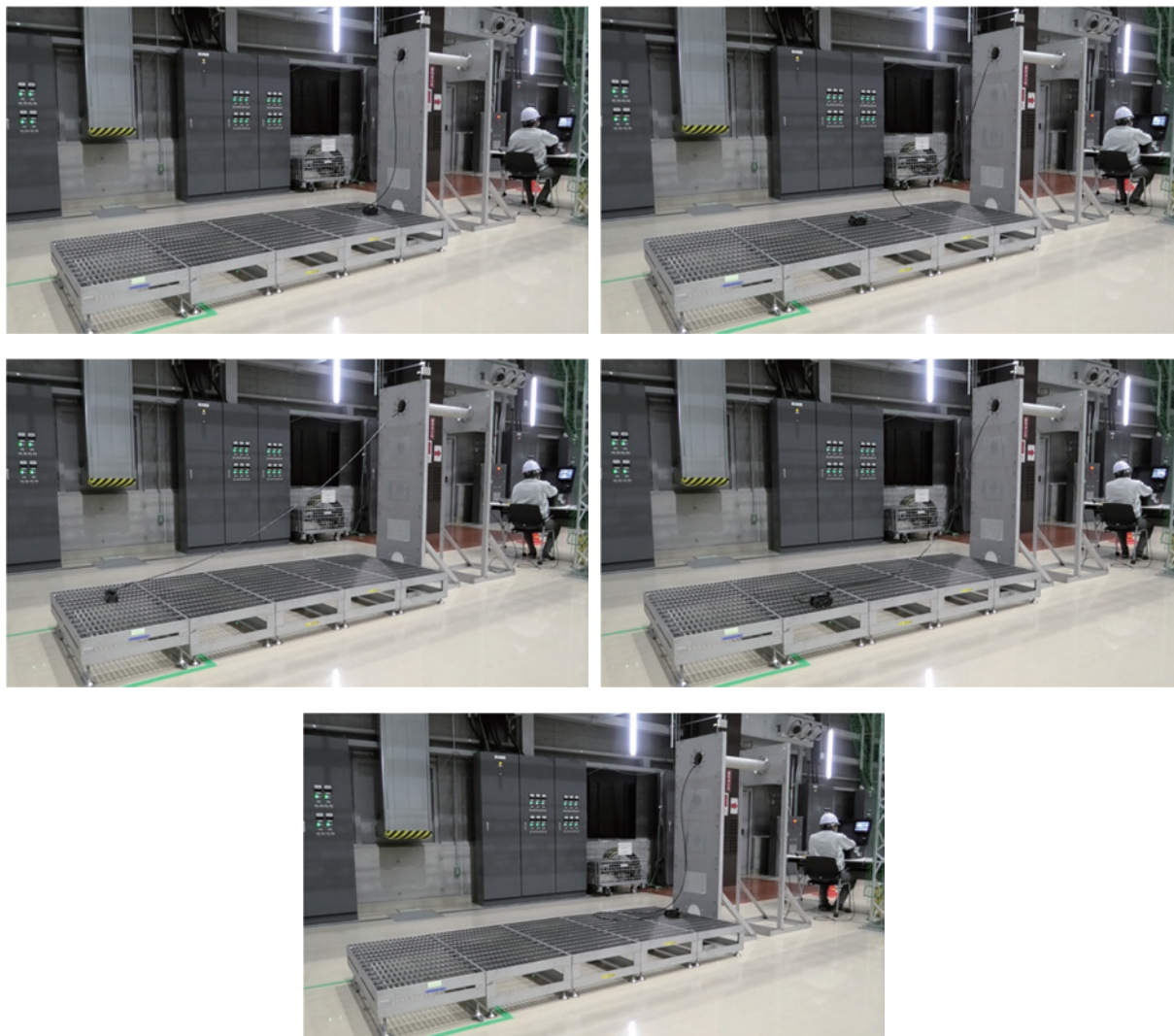


図 4.5-1 図 4.3.2-1 で示したコース（ステンレス鋼管内径 0.11 メートル）における試験実施の様子

4.6 試験実施内容の記録について

前述した、本試験を実施した際に記録に用いる専用フォーマットとその記入例について示す。

4.6.1 専用フォーマット

JAEA-TM-0004		貫通孔を介した展開後の 床面上走破性能試験	専用フォーマット																																								
実施日： 年 月 日 実施場所： 試験実施者：		試験監督者： 評価対象機器：																																									
試験環境・機器セットアップ																																											
試験環境(可能であれば写真・寸法図等添付のこと) 床面素材： 配管口径： m 1 往復基準走行距離長： m 貫通孔出口から床面高さ： m	機器の外観確認(可能であれば機器写真添付のこと) ・ 初期状態 ・ 試験後状態																																										
試験実施記録																																											
往復回数(失敗時にはその時点の計測時間を記載) <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 10%;">1</td><td style="width: 40%;"></td><td style="width: 10%;">11</td><td style="width: 40%;"></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td>12</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td>13</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td>14</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td>15</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1		11		2		12		3		13		4		14		5		15		6				7				8				9				10				計測値・計算値： 開始時刻： 終了時刻： 走行時間： min sec 総走行距離： m 平均移動速度： m/sec m/min	
1		11																																									
2		12																																									
3		13																																									
4		14																																									
5		15																																									
6																																											
7																																											
8																																											
9																																											
10																																											
備考(参考記録も含む)																																											
・ 機器の構成： (遠隔操作 ・ 自律動作) ・ 外部照明： (有 ・ 無) ・ 失敗した場合、事象や原因について記載 ・ その他、特筆すべきこと																																											

4.6.2 専用フォーマットへの記入例

【記入例】																							
JAEA-TM-0004	貫通孔を介した展開後の 床面上走破性能試験	専用フォーマット																					
実施日： 2020年 10月 19日	実施場所： <u>NARREC, JAEA</u>	試験実施者： <u>遠隔四郎</u>																					
試験監督者： <u>浜通り太郎</u>	評価対象機器： <u>robot4</u>																						
試験環境・機器セットアップ																							
試験環境(可能であれば写真・寸法図等添付のこと)  床面素材： <u>グレーチング</u> 配管口径： <u>0.1</u> m 1 往復基準走行距離長： <u>3.6</u> m 貫通孔出口から床面高さ： <u>1.5</u> m	機器の外観確認(可能であれば機器写真添付のこと) ・初期状態 破損等なし ・試験後状態 破損等なし																						
試験実施記録																							
往復回数(失敗時にはその時点の計測時間を記載) <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 50%;">1 <u>✓</u></td><td style="width: 50%;">11 <u> </u></td></tr> <tr><td>2 <u>✓</u></td><td>12 <u> </u></td></tr> <tr><td>3 <u>✓</u></td><td>13 <u> </u></td></tr> <tr><td>4 <u>✓</u></td><td>14 <u> </u></td></tr> <tr><td>5 <u>✓</u></td><td>15 <u> </u></td></tr> <tr><td>6 <u> </u></td><td></td></tr> <tr><td>7 <u> </u></td><td></td></tr> <tr><td>8 <u> </u></td><td></td></tr> <tr><td>9 <u> </u></td><td></td></tr> <tr><td>10 <u> </u></td><td></td></tr> </table>		1 <u>✓</u>	11 <u> </u>	2 <u>✓</u>	12 <u> </u>	3 <u>✓</u>	13 <u> </u>	4 <u>✓</u>	14 <u> </u>	5 <u>✓</u>	15 <u> </u>	6 <u> </u>		7 <u> </u>		8 <u> </u>		9 <u> </u>		10 <u> </u>		計測値・計算値: 開始時刻： <u>15:33</u> 終了時刻： <u>15:50</u> 走行時間： <u>27</u> min <u>0</u> sec 総走行距離： <u>18</u> m 平均移動速度： <u>0.011</u> m/sec <u>0.0667</u> m/min	
1 <u>✓</u>	11 <u> </u>																						
2 <u>✓</u>	12 <u> </u>																						
3 <u>✓</u>	13 <u> </u>																						
4 <u>✓</u>	14 <u> </u>																						
5 <u>✓</u>	15 <u> </u>																						
6 <u> </u>																							
7 <u> </u>																							
8 <u> </u>																							
9 <u> </u>																							
10 <u> </u>																							
備考(参考記録も含む)																							
・機器の構成： (<u>遠隔操作</u>) ・ 自律動作) ・外部照明： (<u>有</u>) ・ 無) ・失敗した場合、事象や原因について記載 ・その他、特筆すべきこと																							

4.7 参考事例

本試験の参考とした、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所での遠隔操作走行ロボットによる緊急時対応や廃炉作業の具体的な事例は以下のものがある。

- 原子炉格納容器内部調査装置（形状変化型ロボット）の作業訓練の実施について
（参考資料、掲載日 2015 年 2 月 3 日）
[出典：日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社]
<https://irid.or.jp/research/20150203/>
（参照 2021 年 9 月 27 日）.
- 「原子炉格納容器内部調査技術の開発」 ペデスタル外側_1 階グレーチング上調査（B1 調査）の現地実証試験の実施について【4 月 10 日実施分】
（参考資料、掲載日 2015 年 4 月 13 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2015/images/handouts_150413_02-j.pdf
（参照 2021 年 9 月 27 日）.
- 原子炉格納容器内部調査装置（形状変化型ロボット）の実証試験の実施について
（参考資料、掲載日 2015 年 4 月 20 日）
[出典：日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社]
<https://irid.or.jp/research/20150420/>
（参照 2021 年 9 月 27 日）.
- 1 号機原子炉格納容器内部調査について（参考資料、掲載日 2017 年 3 月 27 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images1/handouts_170327_14-j.pdf
（参照 2021 年 9 月 27 日）.

5 貫通孔を介した展開後の傾斜面上走破性能試験

(番号 JAEA-TM-0005)

5.1 目的

本試験は、原子力施設内における調査・情報収集タスクを実施するための機器・システムを搭載したロボットを対象とし、当該ロボットに必要とされる「貫通孔を通り抜けた先にロボットの体長程度またはそれ以下の下方にある傾斜面上を走破する性能」について、定量的に評価を行うことを目的としている。

5.2 評価対象

本試験の評価対象は、貫通孔から展開されたケーブル付きロボットの傾斜面上における走破性能である。

5.3 評価の概要

本試験においては、下記に記した試験方法および試験環境によって評価を行うものとする。尚、試験結果については専用フォーマット（5.5 を参照）に必要事項を記載することで記録を残す。

5.3.1 試験方法

5.3.1.1 試験条件と試験環境構成要素

ここでは、試験実施に関する諸条件と試験環境の代表的な構成要素について記述している。

- 試験実施者はロボットから知覚的に隔離されており、ロボットに搭載したセンサから取得されたデータに基づいて操作することで試験を実施する。
- 同一試験環境での移動を繰り返し実行した結果によって性能評価を行うこととする。
 - 例えば、試験環境内の走行コース両端にスタート地点と折り返し地点を設定し、この間を往復移動することで試験を実施する方法があり、試験環境の設置規模をコンパクトにするために有効である。
- 制限時間は 30 分間とする。
 - ここで、試行回数をより多く取れば、より信頼性の高い性能評価が実施できるわけだが、試験対象ロボットの同一機体を用いて同日に複数種類の性能試験を実施すること（充電やバッテリー交換作業の時間、操作者の休憩時間等のインターバルも含めて）を考慮して時間制約を設けた。
- 試験環境の具備すべき構成要素として、以下をコース内に含むものとする。
 - 試験対象であるロボットが挿入可能な口径をもつ、十分硬い直線状の配管が水平に設置されている。
 - 設置した配管の一方の端部を出口側開口部とし、その出口側開口部の真下に、配管に接しない程度の下方に平坦なエリアを設置する。
 - 傾斜面は幅が一定で路面が平坦であり、傾斜の方向は配管の入口側開口部から出口側開口部の方向にかけて下がっている。

- 傾斜面の下方端が平坦な床面に着地している。

5.3.1.2 確認・計測・記録項目

ここでは、試験実施にあたって確認する事柄、計測する事柄、記録する事柄について記述している。

- 試験開始前、試験監督者は試験実施者とともにロボットおよび試験環境の外観検査を行い、専用フォーマットに結果を記録する。
- ロボットに接続されたケーブルが配管の出口側開口部から入口側開口部を通じて試験コース外部に出ていることを確認する。
- 到達判断については、コース中に指定ゾーンを設定して、ロボット全体が完全に指定ゾーンに入っていることで、到達している、とする。
 - ここで、上述の往復移動による試験の実施の場合であれば、試験コースのスタート／ゴール地点と折り返し地点にそれぞれゾーンを設けて、ロボット全体が完全にこのゾーンに入っていることでその地点に到達した、と判断する。
この場合、ゾーン高さは通路面高さと同程度になるように設置する。
- 試験監督者は、走行にかかった総合時間を計測し、計測値を専用フォーマットに記録する。
- 試験監督者は、コースレイアウトの基準走行距離を用いて、時間あたりの平均移動距離（メートル毎分）を算出する。算出値を専用フォーマットに記録する。
- 試験監視者により試験中の緊急事態が判断された場合は、試験実施者へ停止を指示し、試験実施者は速やかにロボットの動作を停止させ、試験継続不能となったことを試験監督者に通告する。
- 試験途中にロボットが走行継続不能となった場合は失敗として試験終了とし、その時点での上記の計測値、失敗までの算出値を専用フォーマットに記録する。
- 制限時間を超えた場合は試験終了とし、その時点での算出値を専用フォーマットに記録する。
- 試験終了後、試験監督者は試験実施者とともにロボットおよび試験環境の外観検査を行い、結果を専用フォーマットに記録する。

5.3.1.3 試験手順

前述の諸条件等を確認の上、試験の開始から終了までを以下の手順で行うものとする。

- 試験実施者が、ロボットをスタート地点となるエンドゾーンに設置する。このとき、ロボット本体が走行コース上にはみ出さないように注意すること。
- 試験実施者は、試験を開始する準備が整った時点で準備完了を試験監督者に通知する。
- 試験監督者は、通知を受けて試験開始を試験実施者に通知し、5.3.1.2に記載されている項目に従って計測、記録を開始する。
- 試験実施者は、試験実施中に状況に応じて配管入口側開口部より外部においてケーブルの調整・操作を行うことができる。ただし、ケーブルの操作によりロボットの動作へ著しく影響を及ぼしてはならない。
- 試験実施者は、試験の終了した場合もしくは、試験継続不能となった場合には、

試験監督者にこれを通知する。試験監督者は、試験実施者からの通知に基づいて結果を専用フォーマットに記録を行う。

5.3.2 具体的な試験環境の例

上述の条件を満たし、原子力災害対応作業を想定したコースの具体的な構成例を示す。(図 5.3.2-1 を参照) 尚、この例は、1 F2 号機の原子格納容器内調査時にロボットが X-6 ペネトレーションパイプに設けた貫通孔を介して制御棒駆動機構交換用レール (以下、CRD レール) 上に展開されたことから、これを模擬した形式をとっている。X-6 ペネトレーションパイプを模擬した 550A 配管の中に、貫通孔を模擬した配管と CRD レールを模擬したレール傾斜部に接続しているレール傾斜部と同幅のレール水平部を設置している。

- ロボットの大きさに基づいて配管口径を選定し、長さ 2 メートルの配管を 1 本用いる。
- 図 5.3.2-1 のコースでは配管内径は 0.11 メートル (チタン製配管 100A 相当) としている。尚、1F における廃炉作業において 2 号機の原子炉格納容器内へロボットがアクセスした際の貫通孔の内径が約 0.11 メートルであったことを参考にした。
- 配管は配管軸が水平になるように設置する。設置の際、550A 配管内上方に配管を固定する。
- レール水平部を配管より下方かつ 550A 配管内に設置し (図 5.3.2-2 を参照)、配管の出口側開口部側のレール水平部端にステンレス鋼製のレール傾斜部を接続し、レール架台を用いてレール傾斜部を固定する。
- レール傾斜部は全長 3 メートル、幅 0.38 メートル、傾斜角度は 17° とする。
- 幅、傾斜角については CRD レールの形状を参考にした。
- 試験経路両端にはスタート地点となるエンドゾーンと折り返し地点のエンドゾーンを設置し、スタート地点のエンドゾーンから通路上を移動して折り返し地点のエンドゾーンまで到達した後、逆順でスタート地点まで到達することで 1 往復とする。
- 配管の出口側開口部下方のレール水平部領域をスタート地点のエンドゾーンとし、レール傾斜部下端を超えた領域を折り返し地点のエンドゾーンとする。(図 5.3.2-3 を参照)
- 折り返し地点のエンドゾーンは、幅 1.2 メートルの四角グレーチング台 (図 5.3.2-4) 2 台を用いて床面として構成する。
- 1 往復の基準走行距離は 6 メートルとする。
- 5 往復の走行を基準課題とする。
 - 往復回数は、最大速度 0.04 メートル毎秒 (2.5 メートル毎分) 程度の移動速度のロボットを用いた走行実験によって 1 往復に 3 分 30 秒から 4 分 30 秒程の時間を要したことから、制限時間内での実施が十分可能となるように余裕をみて、往復回数を決定した。

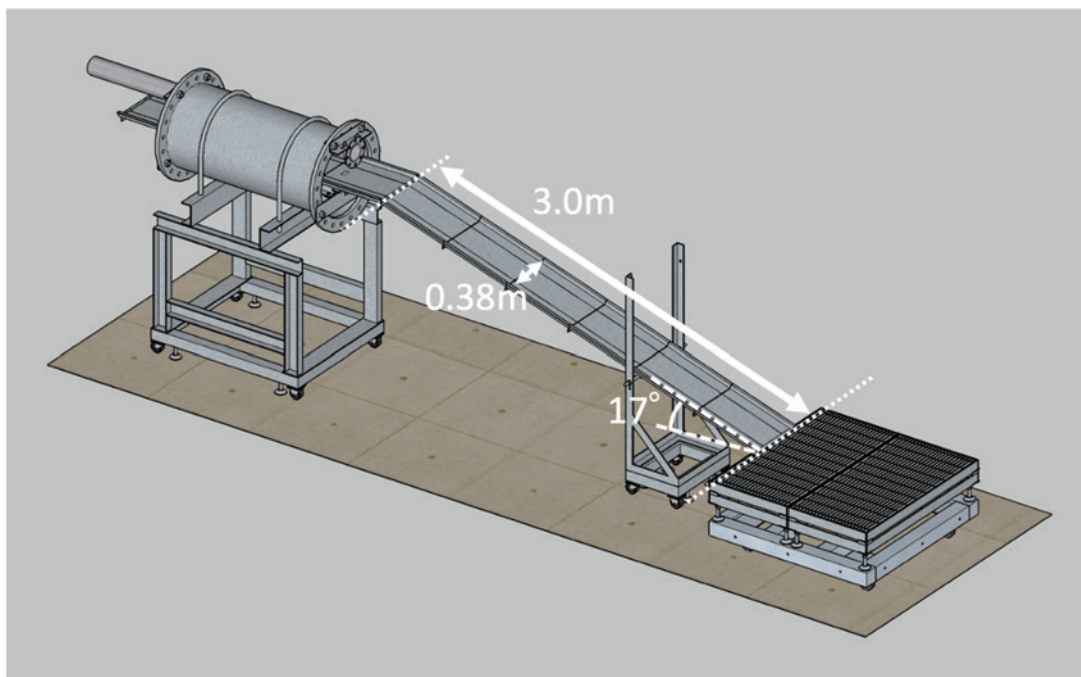


図 5.3.2-1 原子力災害対応作業を想定したコースの外観・レイアウト

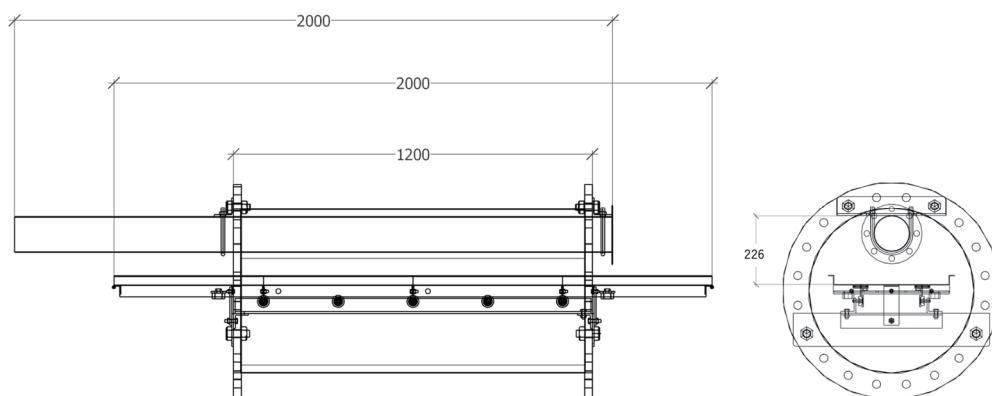


図 5.3.2-2 図 5.3.2-1 における配管設置用 550A 配管 及び レール水平部の取り付け寸法
(図中の単位はミリメートル)

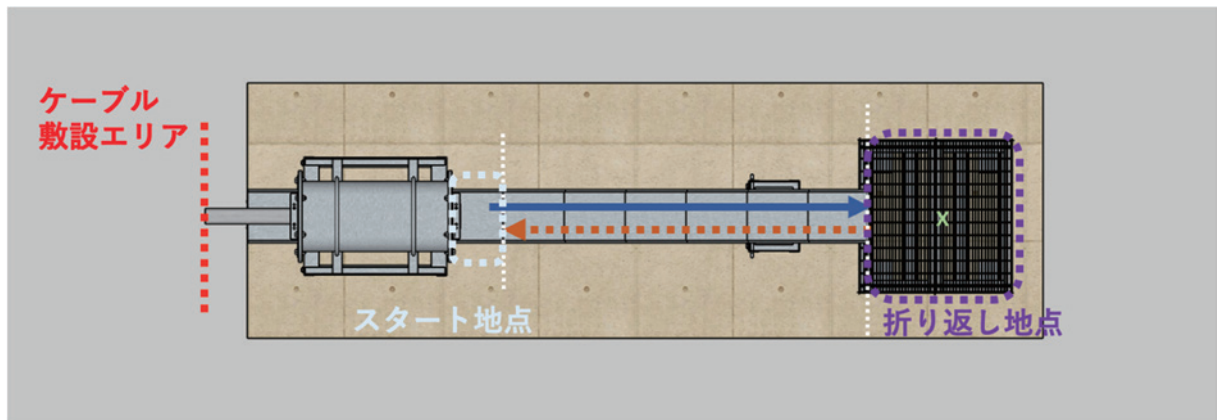


図 5.3.2-3 設定コース上の走行ルート（図 5.3.2-1 のコースを上方からの視点で表示）

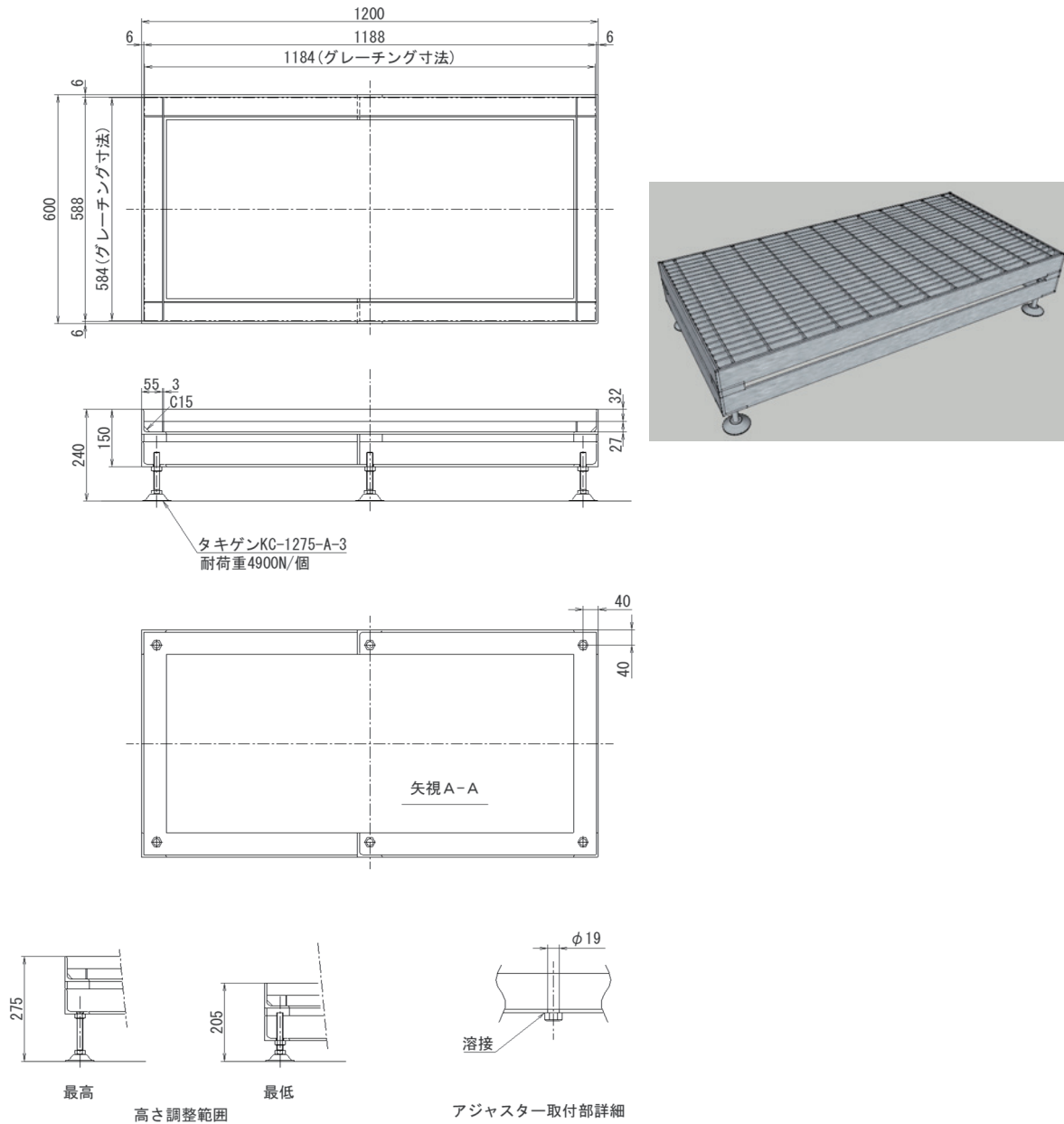


図 5.3.2-4 四角グレーチング台の寸法（図中の単位はミリメートル）

5.4 参考試験・環境条件

本試験を実施するにあたり、下記の点について留意することも重要である。

- 外部照明が無い環境下での試験の実施。
- 傾斜面上に起伏や障害物がある環境下での試験の実施。
- 試験が失敗した場合の事象や原因について分かる範囲での専用フォーマットの備考欄に記録する。

5.5 試験実施の例

参考として、4.3.2 において記述した試験環境において実際に試験を行った様子を図 5.5-1 に掲載する。尚、この場合、設定コースの端にある四角グレーチング台 2 枚はエンドゾーンとして設置したものである。

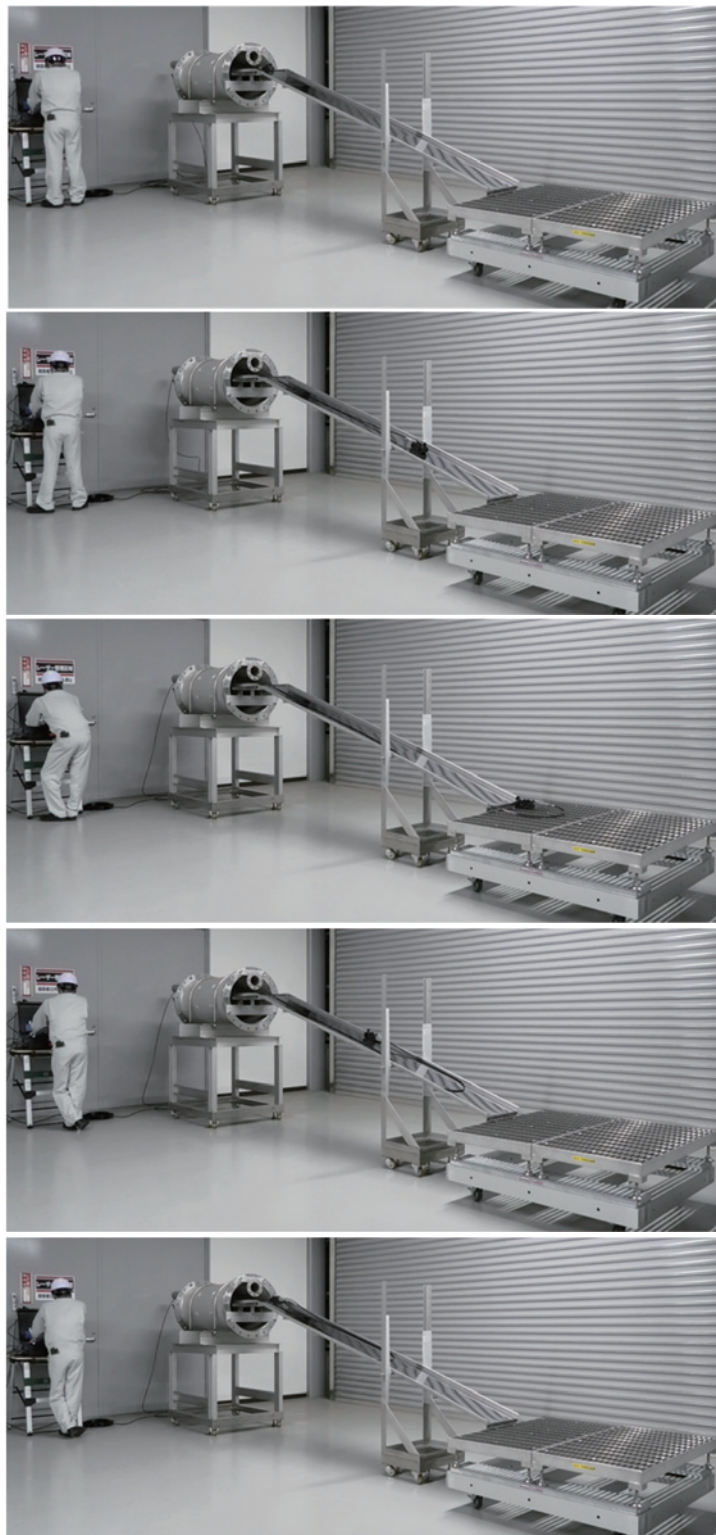


図 5.5-1 図 5.3.2-1 で示したコース（配管内径 0.1 メートル）における試験実施の様子

5.6 試験実施内容の記録について

前述した、本試験を実施した際に記録に用いる専用フォーマットとその記入例について示す。

5.6.1 専用フォーマット

JAEA-TM-0005	貫通孔を介した展開後の傾斜面上 走破性能試験	専用フォーマット
---------------------	---------------------------	-----------------

実施日： 年 月 日 実施場所： _____ 試験実施者： _____
 試験監督者： _____ 評価対象機器： _____

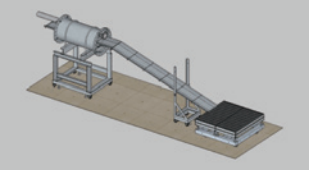
試験環境・機器セットアップ	
試験環境(可能であれば写真・寸法図等添付のこと)	機器の外観確認(可能であれば機器写真添付のこと) ・ 初期状態 ・ 試験後状態
配管口径： φ _____ m 傾斜面角度： _____ ° 基準走行距離： _____ m	

試験実施記録																					
往復回数:(失敗時にはその時点の計測時間を記載)	計測値・計算値:																				
<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;">1 _____</td> <td style="text-align: center;">11 _____</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2 _____</td> <td style="text-align: center;">12 _____</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3 _____</td> <td style="text-align: center;">13 _____</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">4 _____</td> <td style="text-align: center;">14 _____</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">5 _____</td> <td style="text-align: center;">15 _____</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">6 _____</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">7 _____</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">8 _____</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">9 _____</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">10 _____</td> <td></td> </tr> </table>	1 _____	11 _____	2 _____	12 _____	3 _____	13 _____	4 _____	14 _____	5 _____	15 _____	6 _____		7 _____		8 _____		9 _____		10 _____		開始時刻： _____
1 _____	11 _____																				
2 _____	12 _____																				
3 _____	13 _____																				
4 _____	14 _____																				
5 _____	15 _____																				
6 _____																					
7 _____																					
8 _____																					
9 _____																					
10 _____																					
	終了時刻： _____																				
	走行時間： _____ min sec																				
	総走行距離： _____ m																				
	平均移動速度： _____ m/sec																				
	_____ m/min																				

備考(参考記録も含む)
・ 機器の構成： (遠隔操作 ・ 自律動作) ・ 外部照明： (有 ・ 無) ・ 失敗した場合、事象や原因について記載 ・ その他、特筆すべきこと

5.6.2 専用フォーマットへの記入例

【記入例】

JAEA-TM-0005		貫通孔を介した展開後の傾斜面上 走破性能試験	専用フォーマット																																																				
実施日： 2021年 3月 30日		実施場所： NARREC, JAEA	試験実施者： 遠隔五郎																																																				
試験監督者： 浜通り太郎		評価対象機器： robot 5																																																					
試験環境・機器セットアップ																																																							
試験環境(可能であれば写真・寸法図等添付のこと)  配管口径： φ 0.1 m 傾斜面角度： 17 ° 基準走行距離： 6.0 m		機器の外観確認(可能であれば機器写真添付のこと) ・ 初期状態 - 破損等なし ・ 試験後状態 - 破損等なし																																																					
試験実施記録																																																							
往復回数:(失敗時にはその時点の計測時間を記載) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 5px;"> <tr><td style="width: 10%;">1</td><td style="width: 40%; text-align: center;">✓</td><td style="width: 10%;">11</td><td style="width: 40%;"></td></tr> <tr><td>2</td><td style="text-align: center;">✓</td><td>12</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td style="text-align: center;">✓</td><td>13</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td style="text-align: center;">✓</td><td>14</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td style="text-align: center;">✓</td><td>15</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	✓	11		2	✓	12		3	✓	13		4	✓	14		5	✓	15		6				7				8				9				10				計測値・計算値: <table style="width: 100%; margin-top: 5px;"> <tr> <td style="width: 50%;">開始時刻：</td> <td style="text-align: center;">13:15</td> </tr> <tr> <td>終了時刻：</td> <td style="text-align: center;">13:36</td> </tr> <tr> <td>走行時間：</td> <td style="text-align: center;">21 min 10 sec</td> </tr> <tr> <td>総走行距離：</td> <td style="text-align: center;">30.0 m</td> </tr> <tr> <td>平均移動速度：</td> <td style="text-align: center;">0.0236 m/sec</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">1.417 m/min</td> </tr> </table>		開始時刻：	13:15	終了時刻：	13:36	走行時間：	21 min 10 sec	総走行距離：	30.0 m	平均移動速度：	0.0236 m/sec		1.417 m/min
1	✓	11																																																					
2	✓	12																																																					
3	✓	13																																																					
4	✓	14																																																					
5	✓	15																																																					
6																																																							
7																																																							
8																																																							
9																																																							
10																																																							
開始時刻：	13:15																																																						
終了時刻：	13:36																																																						
走行時間：	21 min 10 sec																																																						
総走行距離：	30.0 m																																																						
平均移動速度：	0.0236 m/sec																																																						
	1.417 m/min																																																						
備考(参考記録も含む)																																																							
・ 機器の構成： (☒ 遠隔操作) ・ 自律動作)																																																							
・ 外部照明： (☒ 有) ・ 無)																																																							
・ 失敗した場合、事象や原因について記載																																																							
・ その他、特筆すべきこと																																																							

5.7 参考事例

本試験の参考とした、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所での遠隔操作走行ロボットによる緊急時対応や廃炉作業の具体的な事例は以下のものがある。

- 原子炉格納容器（PCV）内部調査装置の開発状況について
 （参考資料、掲載日 2014 年 8 月 19 日）
 [出典：株式会社 東芝]
<https://irid.or.jp/research/20140819/>
 （参照 2021 年 9 月 27 日）。
- 福島第一原子力発電所向け原子炉格納容器内部調査ロボットを開発
 （参考資料、掲載日 2015 年 6 月 30 日）
 [出典：株式会社 東芝]
<http://irid.or.jp/wp-content/uploads/2015/06/20150630.pdf>
 （参照 2021 年 9 月 27 日）。
- 2 号機 PCV 内部調査について ～自走式調査装置による調査～
 （参考資料、掲載日 2017 年 2 月 15 日）
 [出典：東京電力ホールディングス株式会社]
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images1/handouts_170215_08-j.pdf
 （参照 2021 年 9 月 27 日）。
- 2 号機 PCV 内部調査について ～自走式調査装置による調査結果～
 （参考資料、掲載日 2017 年 2 月 16 日）
 [出典：東京電力ホールディングス株式会社]
https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2017/images1/handouts_170216_11-j.pdf
 （参照 2021 年 9 月 27 日）。

6 まとめ

本稿では、1Fでの事故対応や廃炉作業での記録や経験を参考にして開発を行った、原子力災害対応用ロボットのための性能試験法のうち、貫通孔を介した展開後の床面上走破性能試験(JAEA-TM-0004)、貫通孔を介した展開後の傾斜面上走破性能試験(JAEA-TM-0005)に関する試験方法や諸条件、実施手順についてまとめたものである。

これらの試験法は各評価対象の性能をロボット間で定量的に比較するためのものさしにあたるものであり、既存のロボットの持つ性能を比較・評価するのみならず、今後開発が行われるロボットの目標性能の設定等に活用することが期待される。尚、具体的に示した試験環境の例については、日本原子力研究開発機構櫛葉遠隔技術開発センターにおいて設計、開発を行ったものである。

今後も同様のアプローチで、現在進められているロボットによる廃炉作業を参考に、原子力災害対応用ロボットに要求される性能とそれに要求されるエッセンスに基づいた試験要件を抽出し、性能試験法の開発を引き続き進めていく計画である。

謝辞

本稿に記載した原子力災害対応用ロボットのための走破性能試験法の設計や開発にあたり、元技術開発協力員 毛利文昭氏、元任期付職員 白崎令人氏、元技術開発協力員 石山博紀氏から多くの貴重な助言や協力を得た。ここに記して感謝する。

参考文献

- [1] 東京電力ホールディングス, 動画・写真ライブラリー, <https://www.tepco.co.jp/library/> (参照 2021-09-27) .
- [2] Kawatsuma S., Fukushima M. and Okada T., Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident: summary and lessons learned, *Industrial Robot*, Vol. 39, No. 5, 2012, pp.428-435, DOI: 10.1108/01439911211249715.
- [3] 技術研究組合 国際廃炉研究開発機構, <http://irid.or.jp> (参照 2021-09-27) .
- [4] Kawatsuma S., Mimura R. and Asama H., Unitization for portability of emergency response surveillance robot system: Experiences and lessons learned from the deployment of the JAEA-3 emergency response robot at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants, 2017, *ROBOMECH Journal*, Vol. 4, Article Number 6, DOI: 10.1186/s40648-017-0073-7.
- [5] Nagatani K., Kiribayashi, S., Okada, Y., Otake, K., Yoshida, K., Tadokoro, S., Nishimura, T., Yoshida, T., Koyanagi, E., Fukushima, M., Kawatsuma, S., Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots, 2013, *Journal of Field Robotics*, Vol. 30, No. 1, pp.44-63, DOI: 10.1002/rob.21439.
- [6] Kawatsuma S., Kawabata K., Tsuchida Y. and Tanifuji Y., Analysis of emergency response robots deployed for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants' accidents, *Proceedings of Decommissioning and Remote Systems*, 2016, pp.67-69.
- [7] National Institute of Standards and Technology, Standard Test Methods for Response Robots, <https://nist.gov/el/intelligent-systems-division-73500/standard-test-methods-response-robots> (参照 2021-09-27) .
- [8] Jacoff A., Downs A., Virts A. and Messina E., Stepfield pallets: repeatable terrain for evaluating robot mobility, *Proceedings of 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems*, 2008, pp.29-34, DOI: 10.1145/1774674.1774680.
- [9] ASTM E2828 / E2828M-20, Standard Test Method for Evaluating Response Robot Mobility Using Symmetric Stepfields Terrains, <https://astm.org/Standards/E2828.htm> (参照 2021-09-27) .

- [10] 川端 邦明, 山田 大地, 阿部 浩之, 原子力災害対応用ロボットの性能試験法; 走破性能試験 (JAEA-TM-0001, JAEA-TM-0002, JAEA-TM-0003), JAEA-Technology 2020-015, 2020, 37p.
- [11] 東京電力ホールディングス, 「原子炉格納容器内部調査技術の開発」ペデスタル外側_1 階グレーチング上調査 (B1 調査) 現地実証試験後の追加確認結果について【4 月 18 日、4 月 19 日実施分】, <https://photo.tepco.co.jp/date/2015/201504-j/150420-01j.html> (参照 2021-09-27) .
- [12] 東京電力ホールディングス, 「福島第一原子力発電所 2 号機 原子炉格納容器内部調査について ～自走式調査装置による調査結果～, <https://photo.tepco.co.jp/date/2017/201702-j/170216-01j.html> (参照 2021-09-27) .
- [13] 東京電力ホールディングス, 福島第一原子力発電所 1 号機原子炉格納容器内部調査結果, <https://photo.tepco.co.jp/date/2012/201210-j/121012-01j.html>(参照 2021-09-27) .
- [14] 安達 弘典, 岡田 聡, 松崎 謙司, 福島第一原子力発電所の格納容器内部調査向けに開発したロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 36, 2018, pp.395-398, DOI: 10.7210/jrsj.36.395.
- [15] 東京電力ホールディングス, 福島第一原子力発電所 1 号機 原子炉格納容器内部調査について, <https://photo.tepco.co.jp/date/2017/201703-j/170327-01j.html> (参照 2021-09-27) .
- [16] 東京電力ホールディングス, 「原子炉格納容器内部調査技術の開発」ペデスタル外側_1 階グレーチング上調査 (B1 調査) の現地実証試験の結果について, <https://photo.tepco.co.jp/date/2015/201504-j/150430-01j.html> (参照 2021-09-27) .
- [17] 東京電力ホールディングス, 福島第一原子力発電所 2 号機 原子炉格納容器内部調査状況, <https://photo.tepco.co.jp/date/2012/201201-j/120119-01j.html> (参照 2021-09-27) .
- [18] 東京電力ホールディングス, 福島第一原子力発電所 2 号機 原子炉格納容器内部調査について ～自走式調査装置による調査～, <https://photo.tepco.co.jp/date/2017/201702-j/170215-01j.html> (参照 2021-09-27) .

