

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)－

Test Methods for Robots for Nuclear Emergency Response and Decommissioning

-Tests for Running Performances of Robots

(JAEA-TM-0001, JAEA-TM-0002 and JAEA-TM-0003)-

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 2020

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 (<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 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.
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, 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

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）－

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
檜葉遠隔技術開発センター

川端 邦明、山田 大地、阿部 浩之*

(2020 年 9 月 7 日受理)

本稿は、原子力緊急時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での事故発生後、多くの遠隔操作ロボットが作業に活用されている。このような作業経験と教訓は、将来の遠隔操作ロボットの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。これまでの著者らの調査により、原子力緊急時対応および廃炉作業のためのタスクをロボットによって実行するためには、スペースが十分でない空間において衝突を回避しながらの走行、階段上にて転倒や転倒を回避しながらの走行、ロボットに接続されたケーブルにより引き起こされる問題を回避しながらの走行、について高い性能が必要であることがわかっている。本稿は、これらを定量的に評価するための、狭隘通路走破性能試験、階段走破性能試験、ケーブル牽引走破性能試験、の 3 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 Running Performances of Robots
(JAEA-TM-0001, JAEA-TM-0002 and JAEA-TM-0003)–

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 September 7, 2020)

This report describes the test procedures for evaluating running performances of remotely operated robot utilized for nuclear emergency responses and decommissioning. 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 experience 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. Based on our examinations, in order to execute the response and decommissioning tasks, the robots are required to run through the space without enough margin and avoiding collisions, to move on stairs while avoiding tumbling or falling down and to drag a cable while avoiding problems caused by the cable entwining around objects. This report describes three test procedures for quantitatively evaluating the performances which are for running narrow passage, climbing up/down on the stairs and running with dragging the cable. Typical course layout and the demonstration of test running are also illustrated for the references.

Keywords: Test Methods for Robot, Test for Running through Narrow Passage, Test for Climbing Up/Down the Stairs, Test for Running with Dragging the Cable

*Ascend Co., Ltd.

目 次

1	緒言	1
2	原子力災害対応におけるロボットを用いた作業と経験	3
3	狭隘通路走破性能試験（番号 JAEA-TM-0001）	5
3.1	目的	5
3.2	評価対象	5
3.3	評価の概要	5
3.3.1	試験方法	5
3.3.2	具体的な試験環境の例	6
3.4	参考試験・環境条件	11
3.5	試験実施の例	12
3.5.1	コース例 1 の場合	12
3.5.2	コース例 2 の場合	13
3.6	試験実施内容の記録について	14
3.6.1	専用フォーマット	14
3.6.2	専用フォーマットへの記入例（コース例 1 の場合）	15
3.6.3	専用フォーマットへの記入例（コース例 2 の場合）	16
3.7	参考事例	17
4	階段走破性能試験（番号 JAEA-TM-0002）	18
4.1	目的	18
4.2	評価対象	18
4.3	評価の概要	18
4.3.1	試験方法	18
4.3.2	具体的な試験環境の例	19
4.4	参考試験・環境条件	22
4.5	試験実施の例	23
4.6	試験実施内容の記録について	24
4.6.1	専用フォーマット	24
4.6.2	専用フォーマットへの記入例	25
4.7	参考事例	26
5	ケーブル牽引走破性能試験（番号 JAEA-TM-0003）	27
5.1	目的	27
5.2	評価対象	27
5.3	評価の概要	27
5.3.1	試験方法	27
5.3.2	具体的な試験環境の例	28

5.4	参考試験・環境条件	31
5.5	試験実施の例	31
5.6	試験実施内容の記録について	32
5.6.1	専用フォーマット	32
5.6.2	専用フォーマットへの記入例	33
5.7	参考事例	34
6	まとめ	35
	謝辞	36
	参考文献	36

Contents

1	Introduction	1
2	Executed Tasks by the Robots and Experiences	3
3	Test for Running Through Narrow Passage (JAEA-TM-0001)	5
3.1	Purpose	5
3.2	Evaluation Target	5
3.3	Examination Outline	5
3.3.1	Test Method	5
3.3.2	Examples of Test Environment	6
3.4	Test Conditions to Consider	11
3.5	Examples of Demonstration	12
3.6.1	A Run in Course 1	12
3.6.2	A Run in Course 2	13
3.6	Test Result Record	14
3.6.1	Dedicated Record Format	14
3.6.2	An Example for Course 1	15
3.6.3	An Example for Course 2	16
3.7	Reference Cases	17
4	Test for Climbing Up and Down the Stairs (JAEA-TM-0002)	18
4.1	Purpose	18
4.2	Evaluation Target	18
4.3	Examination Outline	18
4.3.1	Test Method	18
4.3.2	Example of Test Environment	19
4.4	Test Conditions to Consider	22
4.5	An Example of Demonstration	23
4.6	Test Result Record	24
4.6.1	Dedicated Format	24
4.6.2	An Example Entry	25
4.7	Reference Cases	26
5	Test for Running with Dragging the Cable (JAEA-TM-0003)	27
5.1	Purpose	27
5.2	Evaluation Target	27
5.3	Examination Outline	27
5.3.1	Test Method	27
5.3.2	Example of Test Environment	28

5.4	Test Conditions to Consider	31
5.5	An Example of Demonstration	31
5.6	Test Result Record	32
5.6.1	Dedicated Format	32
5.6.2	An Example Entry	33
5.7	Reference Cases	34
6	Summary	35
	Acknowledgements	36
	References	36

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り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）において事故が発生し、原子炉建屋内は人の立ち入りが困難な状態になった。このため事故直後から、作業員の被ばくリスク低減を考慮して遠隔操作機器ロボットが投入されて作業が実施されている^{[1]-[5]}。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の実施は容易ではなく、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トラブルが発生したケース^[6]もある。これらの経験や事例は、今後の原子力災害対応ロボットを開発および現場に展開する際に留意する必要があるロボットの持つべき性能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評価しておくことは、安全かつ効率的な作業を推進するという観点からみて大変重要なことである。

これまでに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の対象は災害対応ロボットであることから、原子力災害対応時にも必要とされるロボット性能についての試験法が含まれているものの、カバーされていない項目もある。このため我々は、原子力施設内において災害対応を行うためのロボットに必要とされる性能について定量的に評価することを目的として、原子力災害対応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性能比較を可能とすることである。

特に本稿では、原子力災害対応ロボットの持つべき性能のうち、ロボットにより実施された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におけるロボットの作業記録やトラブル事例等（例えば^{[6][10][11]}）に基づいてロボットが走行した状況を考慮すると、不整地での移動、狭隘通路での移動、連続した階段上での移動、ケーブルを牽引しての移動が原子炉建屋内の調査作業に必要な走破性能として評価されるべき項目であると判断した。ここで、不整地走行の試験方法については、既にNISTのSTMにより開発されたものがある（例えば^{[8][9]}）ことから、本稿ではこれを対象とせず、それ以外の3項目に関する試験方法を扱うものである。我々は、性能試験法の開発のために、それぞれの走破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、狭隘通路走行については、空間的な余裕が十分でない作業環境下でロボットを自在に走行制御するとともに、作業環境との干渉による故障やスタックを引き起こさないことが重要となる。また、連続した階段上の走行については、階段の段差や傾斜に合わせてロボットを自在に走行制御（ロボットのタイプによっては自己の形態変化制御も含む）させるとともに、作業環境との干渉による故障やスタック、転落等を引き起こさないことが重要となる。さらに、ケーブルを牽引しての走行については、構造物等が存在する作業環境内を自在に走行制御するとともに、構造物にケーブルが引っかかることによるスタックを引き起こさない、または引っかかりを回避できることが重要となる。

本稿は、これらを基にして、狹隘通路走破性能試験（JAEA-TM-001）、階段走破性能試験（JAEA-TM-002）、ケーブル牽引走破性能試験（JAEA-TM-003）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 原子力災害対応におけるロボットを用いた作業と経験

本章では、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の作業のうち、原子炉建屋内の調査作業において用いられた代表的な遠隔操作ロボットと成果、また、作業実施の際に得られた経験について述べる。

原子炉建屋内は本来、作業員が作業するために造られている上に、事故の影響等によって予測が困難な状況になったことから、ロボットによる作業も容易ではない。調査作業は、予測困難な状況を少しでも把握、予測可能にするために重要な作業であり、得られた情報は後の作業立案等に影響を及ぼすことから、いかなる作業を実施する場合でも事前に必ず行われるものである。以下にそ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。

1Fでの事故発生後、原子炉建屋内に初めて入ったロボットは **Packbot**^[12]であり、建屋内の情報収集や入り組んだ作業環境において搭載したアームを用いて扉を開き、内部へのアクセスルートを確認^[13]する等の成果をあげている。また、**Survey Runner** は幅 0.7メートル程の階段の踊り場を通過して地下階への到達に成功し、初めて地下階の様子が明らかになった。また、原子炉建屋の中心にある格納容器の周辺にあるトラス室に沿って上部に設置されている点検用通路（通称 キャットウォーク、幅 0.8～0.9メートル程度）上を周回して調査を行い、通路上の落下物の確認や格納容器周辺の状況等の情報収集にも大きく貢献した。しかしながら、**Survey Runner** は、狭隘な階段走行中に手摺りに接触したことが原因でケーブル巻取装置の動作不能になるトラブルが発生して、トラス室に残置されることになった。さらに、原子炉建屋内の上層階へ到達するためには様々なタイプの階段上を移動する必要がある。上層階の状況を調査するタスクにおいては、それまでに様々な作業に活用されていた **Packbot** の活用も検討されたが、作業訓練時に確認を行ったところ、傾斜角 43° の階段上の走破が確実にできないと判断された^{[14],[15]}。このため、レスキューロボットのコンテスト等で走行性能が高く評価されていた **Quince**^[16]に傾斜 45° 角の階段を走破できるように改良を施した上で投入した。この結果 **Quince** は、事故後初めて上層階への到達に成功して、情報を収集することに大きく貢献した。この場合も改良した機体を用いて事前のモックアップ試験を繰り返し行った上で作業が実現されている。しかしながら、原子炉建屋内を走行中に建屋内の構造物へ通信ケーブルが絡まったことが原因となりケーブルが切断してしまい、**Quince** は帰還不能となり、建屋内に残置されることになった^[16]。尚、ケーブルは通信の信頼性を高める等のために、1Fで作業したロボットが備えている共通的な特徴である。

このように、ロボットによる事故対応および廃炉作業の多くは成功裏に実施されて大きな成果を得ている一方で、幾つかのトラブルも経験をしている。これらのトラブル経験は、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、原子炉建屋内での作業の多くは移動を伴って行われており、ロボットの走破性能は作業推進に大きく影響を及ぼすものである。そこで前述のトラブル例から、狭隘な通路での走行、踊り場での姿勢変更も含む階段での走行、障害物が存在する環境におけるケーブルを牽引しながらの走行、が重要であると考え、原子力災害対応ロボットの持つべき走破性能として、狭隘通路走破性能、階段走破性能、ケーブル牽引走破性能、を抽出して、性能試験を行うための試験法について開発に取り組んだ。前述のように、開発した性能試験法のねらいとは、各性能について定量化を行うことで、他者との比較の基盤を提供するものである。

次章以降で、各走破性能試験を実施するための諸条件、手順等をまとめたものについて記す。

3 狭隘通路走破性能試験（番号 JAEA-TM-0001）

3.1 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遠隔で動作するロボットを対象とし、当該ロボットに必要とされる「屋内の狭隘な通路を走破する性能」について定量的に評価することを目的としている。

3.2 評価対象

本試験の評価対象は、狭隘通路におけるロボットの走破性能である。

3.3 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（3.5 を参照）に必要事項を記載することで記録を残す。

3.3.1 試験方法

3.3.1.1 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を具備すべき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。
 - 直線部分を含んだ曲線通路とし、曲線部は左曲がりと右曲がりを含むものとする。
 - 走行面は平坦、通路幅は一定とする。
 - 通路進行方向に沿って通路幅を示すものを設置する。

3.3.1.2 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。

- 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。

3.3.1.3 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、3.3.1.2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。

3.3.2 具体的な試験環境の例

前述の条件を満たし、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2つ示す。

3.3.2.1 コース例1（図3.3.2-1を参照）

- 四角グレーチング台（図3.3.2-2）6台、台形グレーチング台（図2.3.2-3）6台を用いて構成する。
- 両端の直線部分は1.8メートル。
- 通路幅は0.8メートル。
 - 通路幅については、原子炉建屋内キャットウォークの通路幅（およそ0.6~0.9メートル）を参考に設定した。

- 通路幅を指定する柱は通路に沿って 0.2~0.8 メートルの間隔で設置。
- 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（図 3.3.2-4 を参照）。
- 1 往復の基準走行距離は 11.4 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 0.1 メートル毎秒（6 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 30 秒から 4 分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。

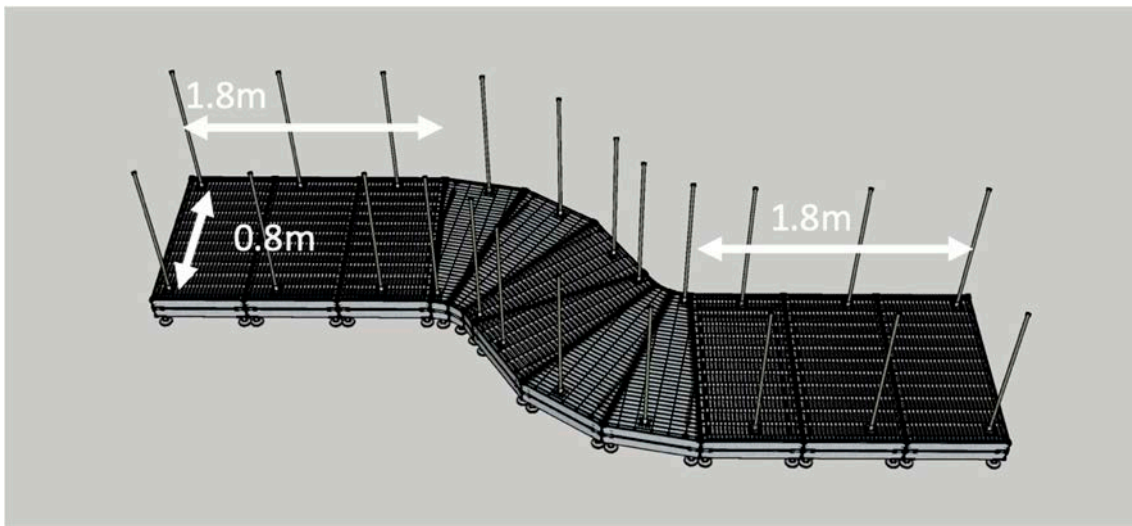


図 3.3.2-1 原子力災害対応作業を想定したコース例 1 の外観・レイアウト

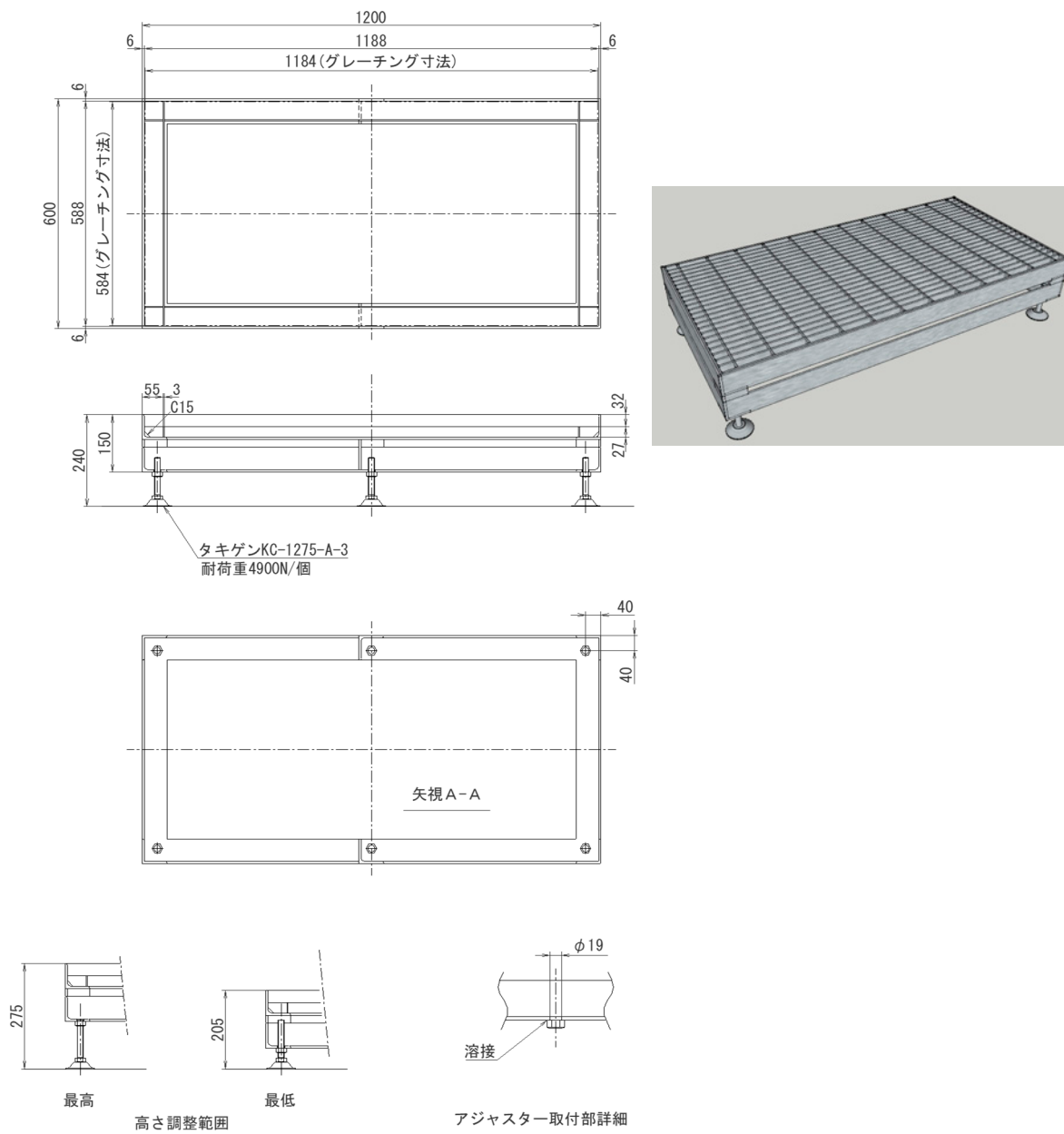


図 3.3.2-2 四角グレーチング台の寸法（図中の単位はミリメートル）

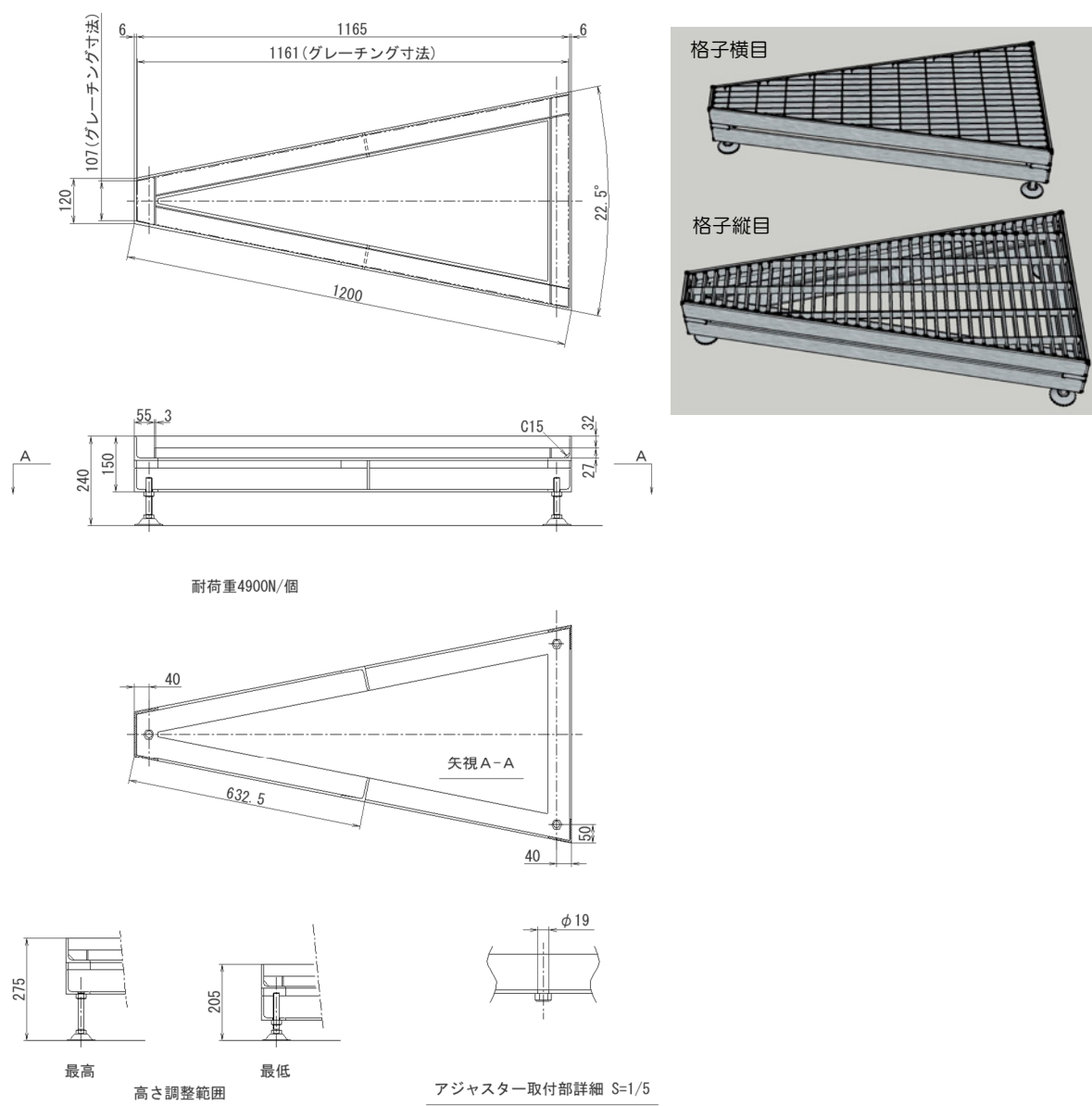


図 3.3.2-3 台形グレーチング台の寸法 (図中の単位はミリメートル)

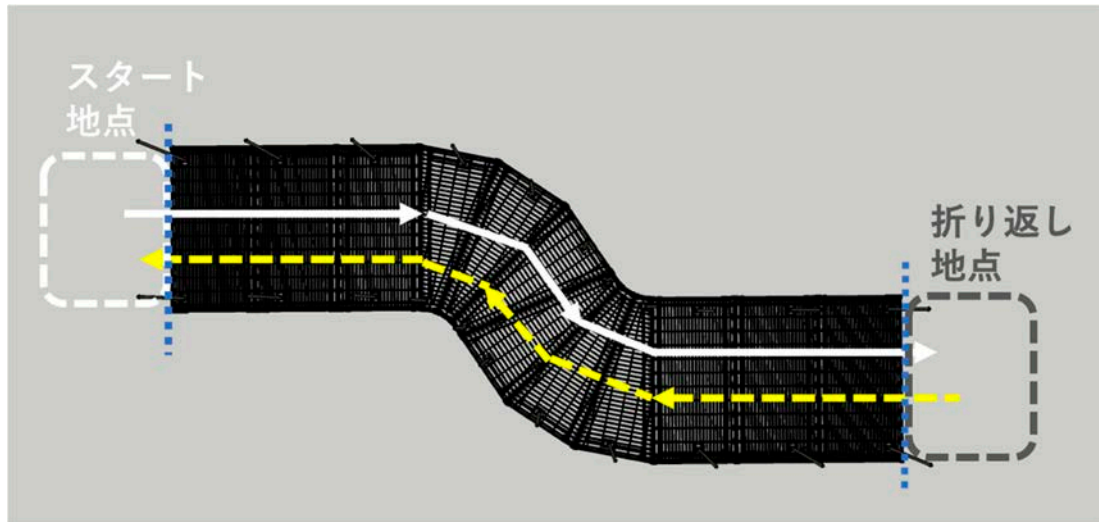


図 3.3.2-4 図 3.3.2-1 に示した設定コース上の走行ルート

3.3.2.2 コース例 2 (図 3.3.2-5 を参照)

- 四角グレーチング台 (図 3.3.2-2) 8 台、台形グレーチング台 (図 3.3.2-3) 8 台を用いて構成する。
- 両端の直線部分は 2.4 メートル。
- 通路幅は 0.7 メートル。
 - 通路幅については、原子炉建屋内キャットウォークの通路幅 (およそ 0.6~0.9 メートル) を参考に設定した。
- 通路幅を指定する柱部は通路に沿って 0.2~0.6 メートルの間隔で設置するとともに、柱部と接続した巾木を通路に沿って連続して通路上に設置する。
- 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 (図 3.3.2-6 を参照)。
- 1 往復の基準走行距離は 15.2 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 0.1 メートル毎秒 (6 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 分から 4 分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。

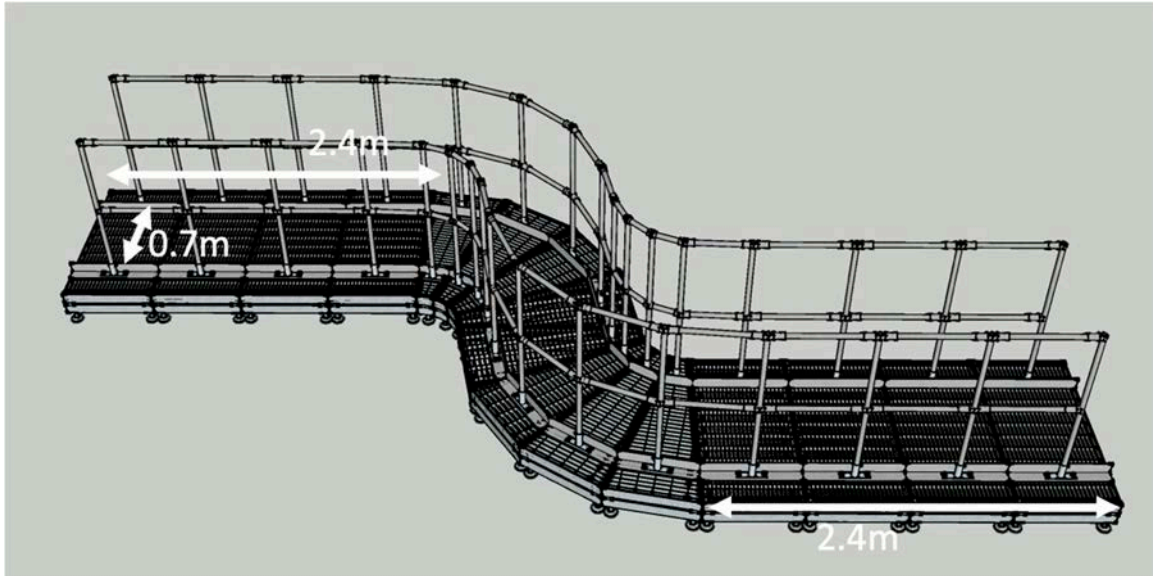


図 3.3.2-5 原子力災害対応作業を想定したコース例 2 の外観・レイアウト

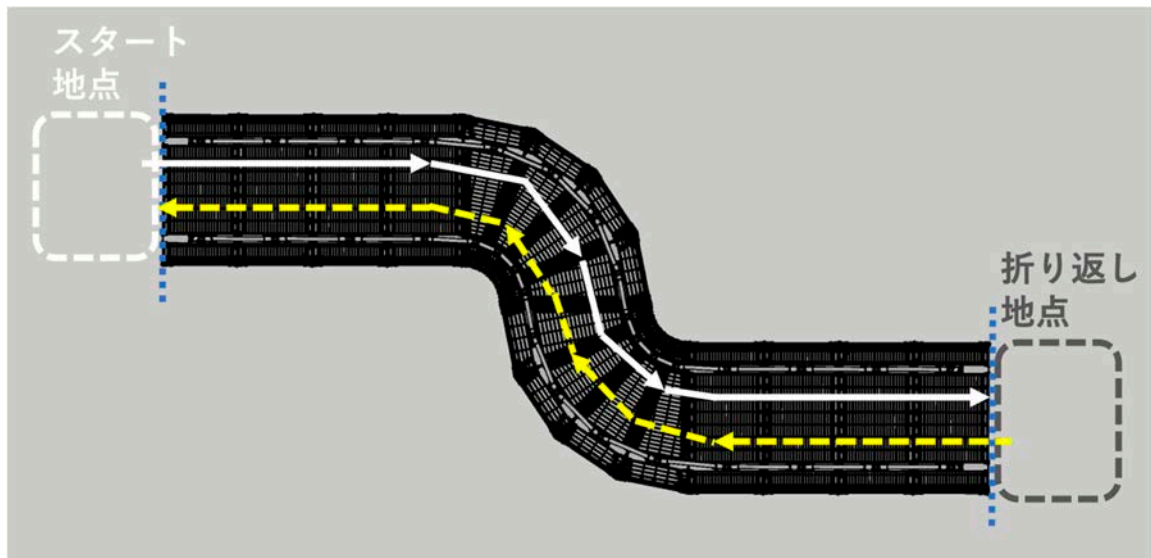


図 3.3.2-6 図 3.3.2-5 に示した設定コース例 2 上の走行ルート

3.4 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。外部照明の有無について専用フォーマットの備考欄に記録する。
- 試験を実施したロボット構成情報として、有線式、無線式について専用フォーマットの備考欄に記録する。
- 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専用フォーマットの備考欄に記録する。

3.5 試験実施の例

参考として、3.3.2 にて記述した試験環境 2 例において実際に試験を行った様子を示す。

3.5.1 コース例 1 の場合

コース例 1 における試験実施例を図 3.5-1 に掲載する。尚、この場合、設定コースの両端の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。

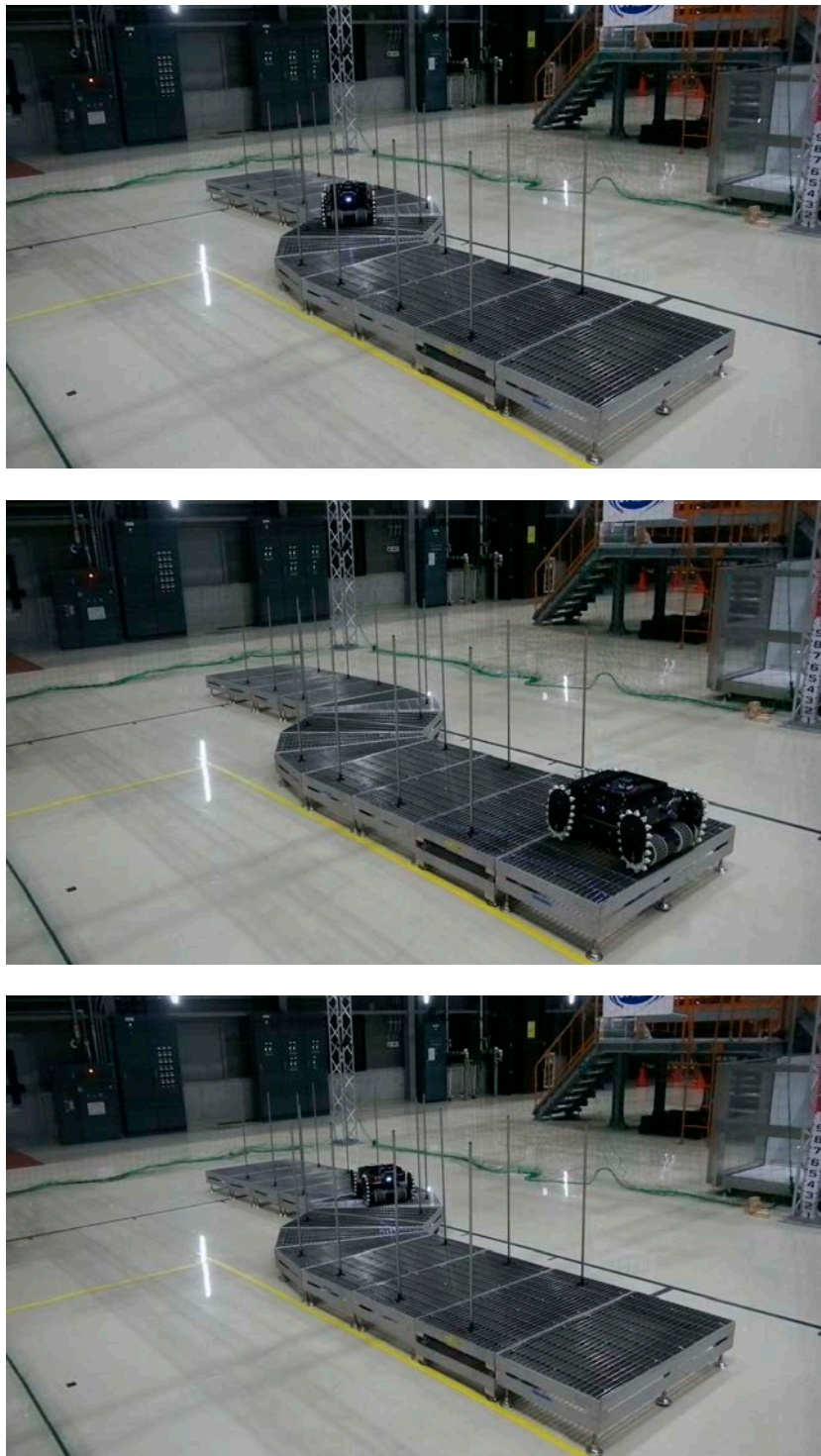


図 3.5-1 図 3.3.2-1 で示したコース例 1 における試験実施の様子

3.5.2 コース例 2 の場合

コース例 2 における試験実施例を図 3.5-2 に掲載する。尚、この場合、設定コースの両端の四角グレーチング台 2 枚ずつはエンドゾーンとして設置したものである。

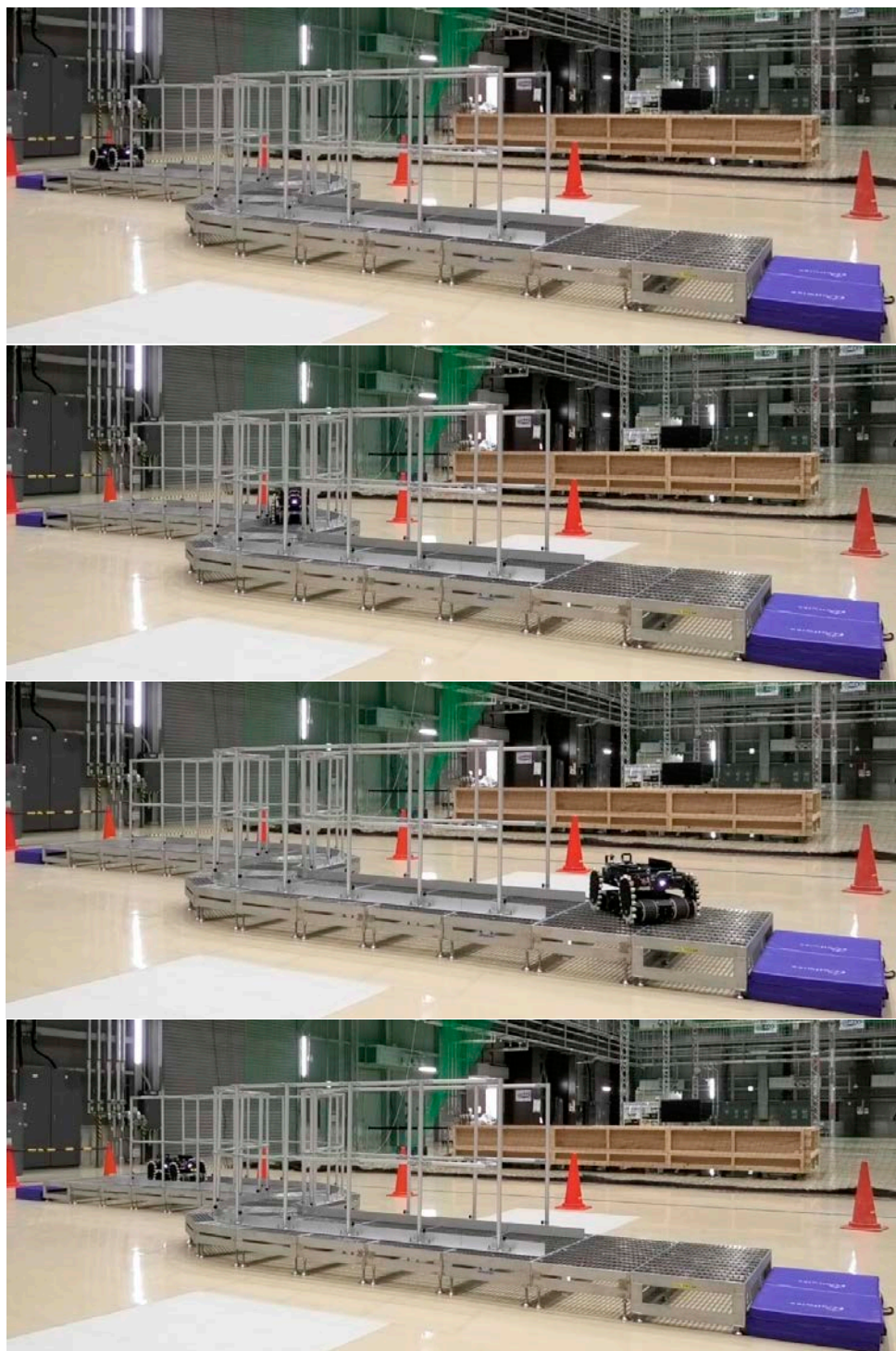


図 3.5-2 図 3.3.2-5 で示したコース例 2 における試験実施の様子

3.6 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（コース例 1 の場合を 3.6.2、コース例 2 の場合を 3.6.3）について示す。

3.6.1 専用フォーマット

JAEA-TM-0001 狹隘通路走破性能試験 専用フォーマット	
実施日：____年 ____月 ____日	実施場所：_____ オペレータ：_____
記録者：_____	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) 路面性状・材質： _____ 通路幅： _____ m 1 往復基準走行距離長： _____ 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) 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/min
備考(参考記録も含む)	
・機器の構成： (有線 ・ 無線) , (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	

3.6.2 専用フォーマットへの記入例（コース例1の場合）

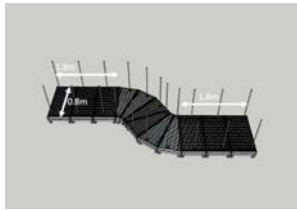
【記入例】

JAEA-TM-0001 狭隘通路走破性能試験 専用フォーマット

実施日：2019年 3月 5日 実施場所： 檜葉センター試験棟 オペレータ： 機構 太郎
記録者： 檜葉 花子 評価対象機器： ロボットA

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)



路面性状・材質： グレーチング

通路幅： 0.8 m

1 往復基準走行距離長： 11.4 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
- ・右前サブローラがゆがんだ。

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)

1	☒	11	☐
2	☒	12	☐
3	☒	13	☐
4	☒	14	☐
5	7.0min	15	☐
6	☐		
7	☐		
8	☐		
9	☐		
10	☐		

計測値・計算値:

開始時刻： 10:04
終了時刻： 10:14
走行時間： 19 (0 sec)
総走行距離： 48.45 m
平均移動速度： 2.55 m/min

備考(参考記録も含む)

- ・機器の構成： (有線 ☒ 無線) , (連続操作 ☒ 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
 - ・ 6 往復終了後、1/4往復程度進んだ地点で通路脇の柱に右前サブローラが引っかかり、移動不可能になった。距離は、4.25往復で計算
- ・その他、特筆すべきこと

3.6.3 専用フォーマットへの記入例（コース例2の場合）

【記入例】

JAEA-TM-0001 狭隘通路走破性能試験 専用フォーマット

実施日：2019年 3月 7日 実施場所：楢葉センター試験棟 オペレータ：機構 太郎
 記録者：楢葉 二郎 評価対象機器：ロボットA

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)



路面性状・材質：グレーチング

通路幅：0.7 m

1 往復基準走行距離長：15.2 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)

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：13:43
 終了時刻：14:09
 走行時間：0:26 (0 sec)
 総走行距離：76 m
 平均移動速度：2.92307692 m/min

備考(参考記録も含む)

・機器の構成：(有線 ・ 無線) , (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

3.7 参考事例

本試験の参考とした、1 F 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。

- 2 号機原子炉建屋地下階トールス室内調査（掲載日 2012 年 4 月 19 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_120419_01-j.pdf
(参照 2020-9-7)
- 福島第一原子力発電所 2 号機原子炉建屋地下階トールス室内調査（掲載日 2012 年 4 月 19 日、撮影日 2012 年 4 月 18 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
<http://photo.tepco.co.jp/date/2012/201204-j/120419-01j.html>
(参照 2020-9-7)

4 階段走破性能試験（番号 JAEA-TM-0002）

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遠隔で動作するロボットを対象とし、当該ロボットに必要とされる「屋内の階段上を走破する性能」について定量的に評価する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、階段上におけるロボットの走破性能である。

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を具備すべき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。
 - 金属製の階段が踊り場を介して連続的に接続された通路とする。
 - 階段の傾斜角および通路幅は一定とする。
 - 通路進行方向に沿って通路幅を示すものを設置する。

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。
- 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、ゾーンはロボット姿勢が水平になるような地点において設置する。
- 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。

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）。

- 檜葉遠隔技術開発センターのモックアップ階段を用いる。
- 階段の傾斜角は 40、41、42、43、51、55 度として設置でき、試験実施者が選択、設定できる。
- 通路進行方向に沿って通路両端に手摺りが 0.2~0.4 メートルの間隔で設置する。
- 階段の通路幅は 0.7、0.8、0.9、1.0 メートルとして設置でき、試験実施者が選択、設定できる。
- 階段の踏み板は縞鋼板とする。

- 試験経路は、スタート地点である踊り場 1 から踊り場 2 を経由して折り返し地点である踊り場 3 まで移動し、その後逆順で踊り場 2 を経由して踊り場 1 まで移動することで 1 往復とする（図 4.3.2-1、4.3.2-2 を参照）。
- 踊り場 1 から踊り場 2 の間および踊り場 2 から踊り場 3 の間を接続する階段の段数は 11 段とする。
- 踊り場 2 および 3 周辺には手摺りを 0.2~0.6 メートルの間隔で設置する。
- 1 往復の基準走行距離は 16.1 メートルとする（図 4.3.2-3 を参照）。
- 1 往復の走行を基準課題とする。
 - 往復回数は、最大速度 0.1 メートル毎秒（6 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 15 分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。

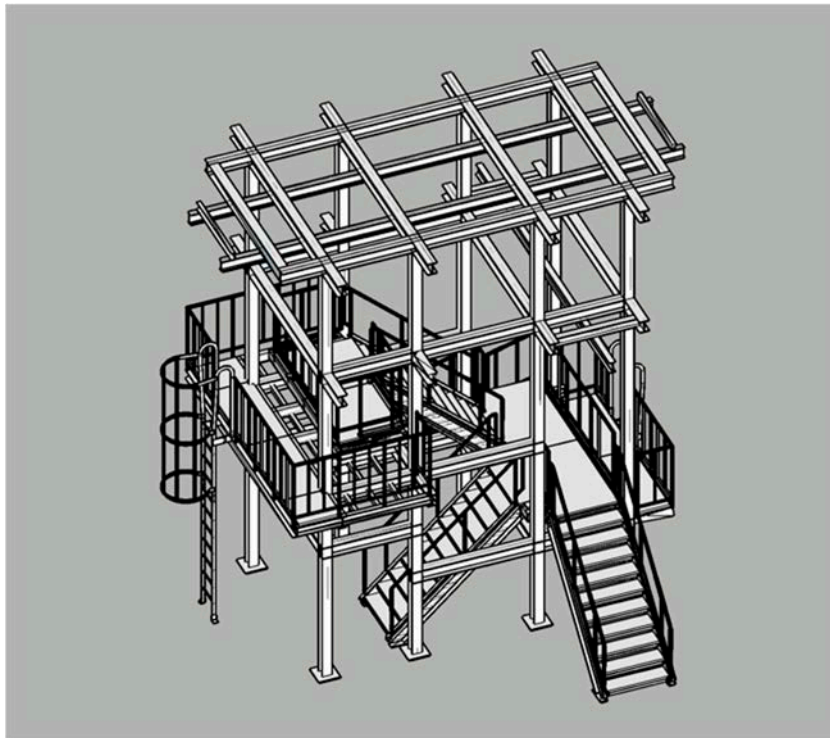


図 4.3.2-1 原子力災害対応作業を想定したコース例（櫛葉遠隔技術開発センターのモックアップ階段）の外観・レイアウト

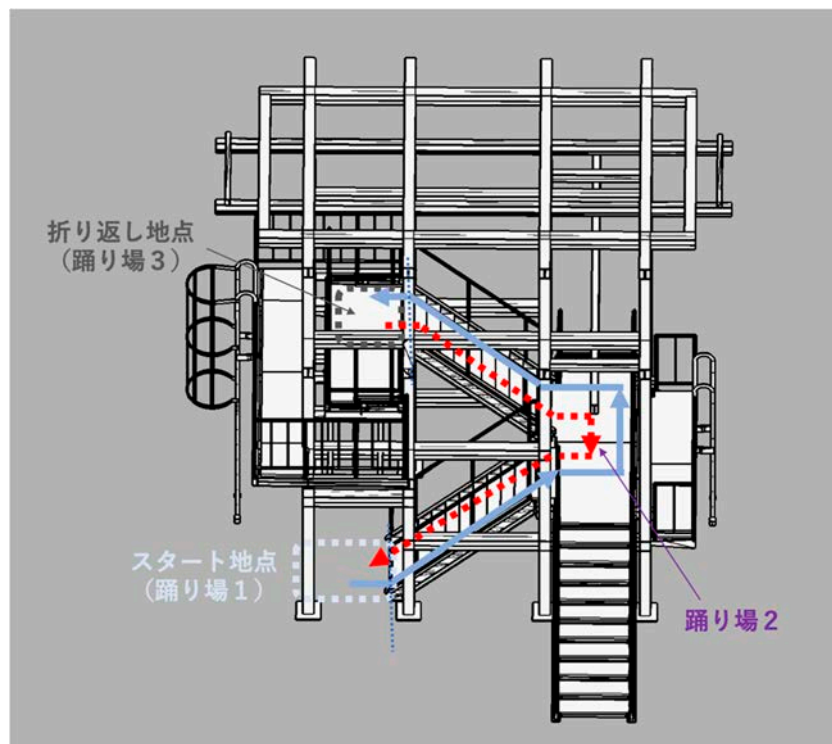


図 4.3.2-2 図 4.3.2-1 に示した設定コース例における走行ルート

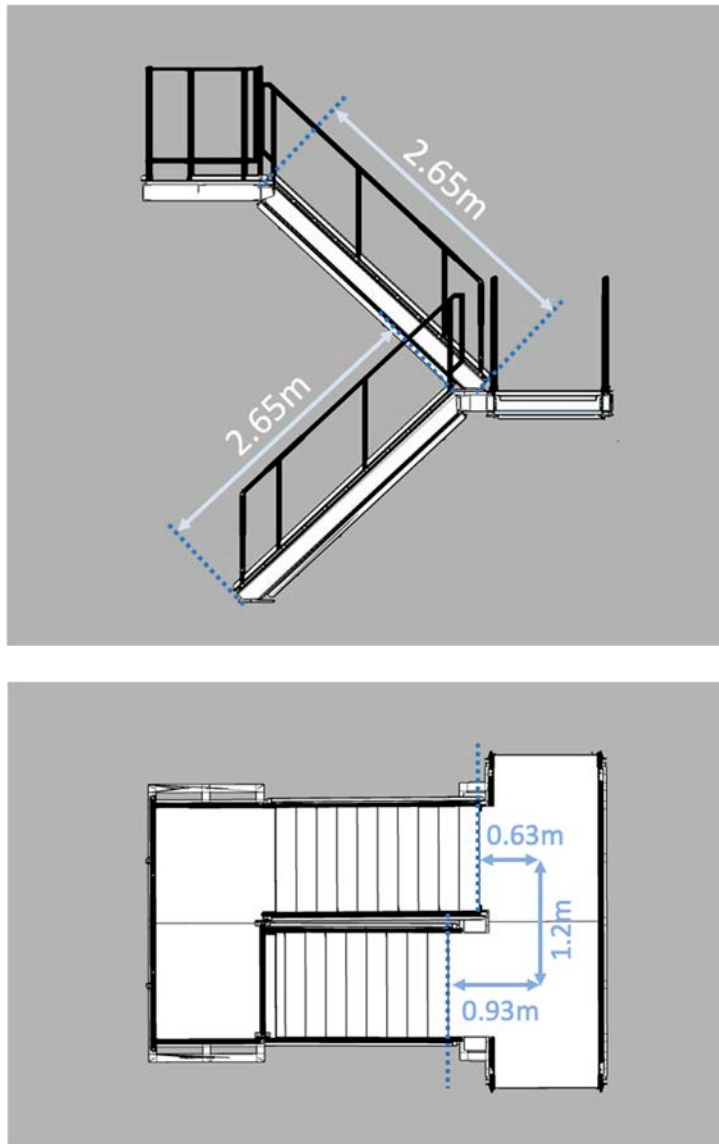


図 4.3.2-3 図 4.3.2-1 に示した設定コース例の寸法

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。

- 試験を実施したロボットの構成情報として、有線式、無線式について記録する。
- 試験を左回り・右回りルートどちらで実施したかについて記録する。
- 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専用フォーマットの備考欄に記録する。
- 階段の踏み板をグレーチングにした場合の試験の実施。この場合、踏み板をフレーチングとしたことを専用フォーマットの備考欄に記録する。
- 外部照明が無い環境下での試験を実施する。
- 試験の実施に際して、試験条件を逸脱しない範囲での安全確保や落下防止のための対策を施してよい。対策に関する確認については、試験実施者の責任によって行うものとする。

4.5 試験実施の例

参考として、4.3.2 に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。

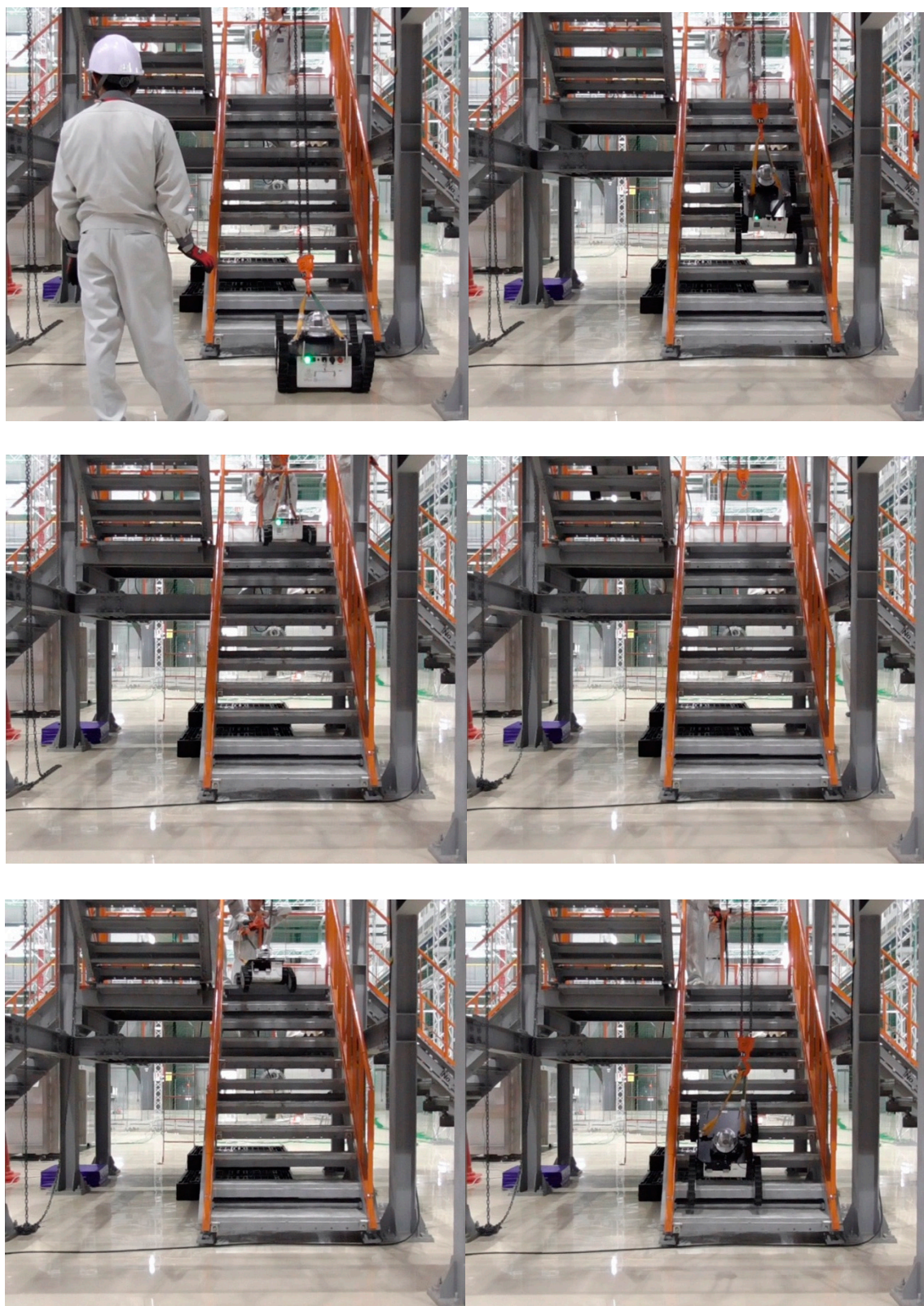


図 4.5-1 図 4.3.2-1 で示したコース例における試験実施の様子

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-0002 階段走破性能試験 専用フォーマット	
実施日： 年 月 日	実施場所： _____ オペレータ： _____
記録者： _____	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) 階段傾斜角： _____ ° 階段通路幅： _____ m 1往復基準走行距離長： _____ 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) 1 _____ 2 _____ 3 _____ 4 _____ 5 _____	計測値・計算値: 開始時刻： _____ 終了時刻： _____ 走行時間： _____ min 総走行距離： _____ m 平均移動速度： _____ m/min
備考(参考記録も含む)	
・機器の構成： (有線 ・ 無線) , (遠隔操作 ・ 自律動作) ・外部照明： (有 ・ 無) ・移動方向 (左回り ・ 右回り) ・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 (踏み板種類, 安全確保対策等も含む)	

4.6.2 専用フォーマットへの記入例

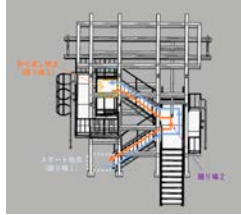
【記入例】

JAEA-TM-0002 階段走破性能試験 専用フォーマット

実施日：2019年 3月 5日 実施場所：楢葉センター試験棟 オペレータ：機構 太郎
 記録者：楢葉 花子 評価対象機器：ロボットB

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)



階段傾斜角： 43 °

階段通路幅： 1.0 m

1 往復基準走行距離長： 16.1 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
 ・破損等無し。

・試験後状態
 ・破損等無し。

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)

1 ☒
 2 ☐
 3 ☐
 4 ☐
 5 ☐

計測値・計算値:

開始時刻： 11:37
 終了時刻： 11:59
 走行時間： 21 min
 総走行距離： 16.1 m
 平均移動速度： 0.76666667 m/min

備考(参考記録も含む)

・機器の構成： (有線 ・ 無線) , (遠隔操作 ・ 自律動作)

・外部照明： (有 ・ 無) ・移動方向 (左回り ・ 右回り)

・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
 (踏み板種類、安全確保対策等も含む)

踏み板は、鋳鋼板
 落下防止のため、本体についている取っ手につけたロープを人が持った状態で試験実施

4.7 参考事例

本試験の参考とした、1 F 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。

- 福島第一原子力発電所 2 号機原子炉建屋 1~5 階ロボットによる雰囲気線量・温度の測定結果（掲載日 2011 年 10 月 21 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_111021_03-j.pdf
(参照 2020-9-7)
- 福島第一原子力発電所 2 号機原子炉建屋 1~5 階 ロボットによる雰囲気線量・温度の測定結果（掲載日 2011 年 10 月 21 日、撮影日 2011 年 10 月 20 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
<https://photo.tepco.co.jp/date/2011/201110-j/111021-01j.html>
(参照 2020-9-7)
- 福島第一原子力発電所 2 号機原子炉建屋内風景（掲載日 2011 年 10 月 21 日、撮影日 2011 年 10 月 20 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
<http://photo.tepco.co.jp/date/2011/201110-j/111021-03j.html>
(参照 2020-9-7)
- 福島第一原子力発電所 2 号機 原子炉建屋 5 階オペレーティングフロア ロボット（クインス 2）による調査結果（掲載日 2012 年 2 月 28 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_120228_04-j.pdf
(参照 2020-9-7)
- 福島第一原子力発電所 2 号機 原子炉建屋 5 階オペレーティングフロア ロボット（クインス 2）による調査結果（掲載日 2012 年 2 月 28 日、撮影日 2012 年 2 月 27 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
<https://photo.tepco.co.jp/date/2012/201202-j/120228-01j.html>
(参照 2020-9-7)

5 ケーブル牽引走破性能試験（番号 JAEA-TM-0003）

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遠隔で動作するロボットを対象とし、当該ロボットに必要とされる「屋内の構造物が存在する環境下でケーブルを牽引して走破する性能」について定量的に評価する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、ケーブル付きロボットの構造物存在環境下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を具備すべき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。
 - ケーブルが引っかかる箇所を持った構造物の配置
 - 構造物周辺を走行する通路
 - 左曲がりコーナー部および右曲がりコーナー部のある通路
 - ケーブル回収方向の走行が必要となる折り返し部のある通路

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。

- 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、エンド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

前述の条件を満たし、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）。

- ケーブルが干渉する要素を備えたケーブル干渉支柱（図 5.3.2-2）2 台を用いる。
- 2 台のケーブル干渉支柱は相互に点対称の姿勢として配置し、間に幅 1 メートルの通路スペースを設ける（図 5.3.2-1 を参照）。

- スタート地点わきにケーブル敷設エリアを設けて、ケーブルは試験開始時においてこのエリアを経由して敷設され、ロボットと接続されることとする（図 5.3.2-1 を参照）。
- 試験経路は、スタート地点より①方向に移動後左折してケーブル干渉支柱沿いに通路スペース起点（②）まで移動する。通路スペースを通過後右折し、ケーブル干渉支柱沿い移動し通り抜けた地点（③）に移動する。その後、右折して折り返し地点（④）に到達する。続いて折り返し地点（④）から上記の逆順でスタート地点まで移動を行う（図 5.3.2-3 を参照）。
- 1 往復の基準走行距離は 19.4 メートルとする。
- 3 往復の走行を基準課題とする。
 - 往復回数は、最大速度 0.1 メートル毎秒（6 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 往復で 4 分から 6 分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。

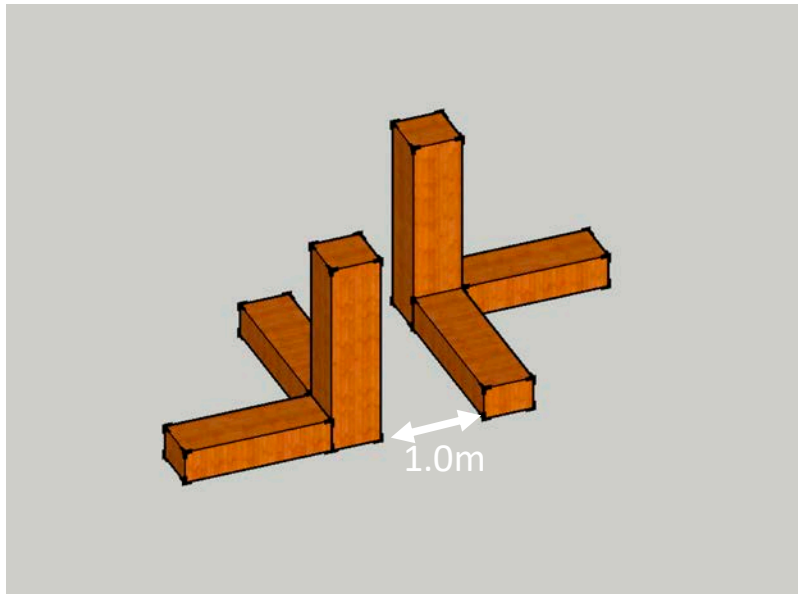


図 5.3.2-1 設定したコース例の外観・レイアウト

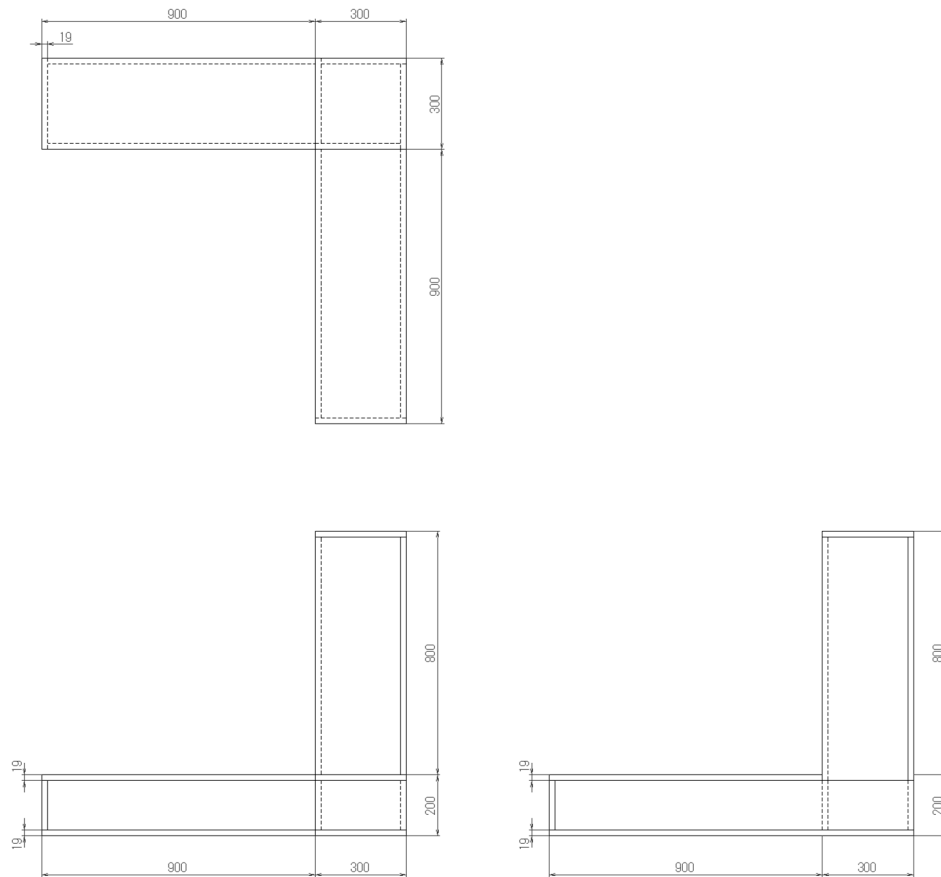


図 5.2.3-2 ケーブル干渉支柱の寸法（図中の単位はミリメートル）

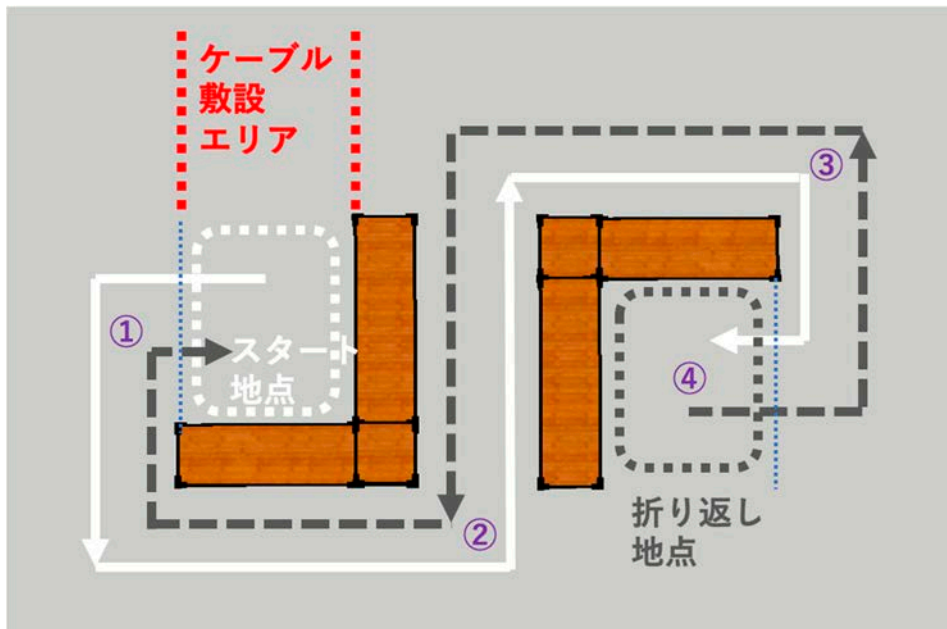


図 5.2.2-3 図 5.3.2-1 に示した設定コース例における走行ルート

5.4 参考試験・環境条件

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。

- 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専用フォーマットの備考欄に記録する。
- 外部照明が無い環境下での試験の実施。外部照明の有無について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、5.3.2 に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。

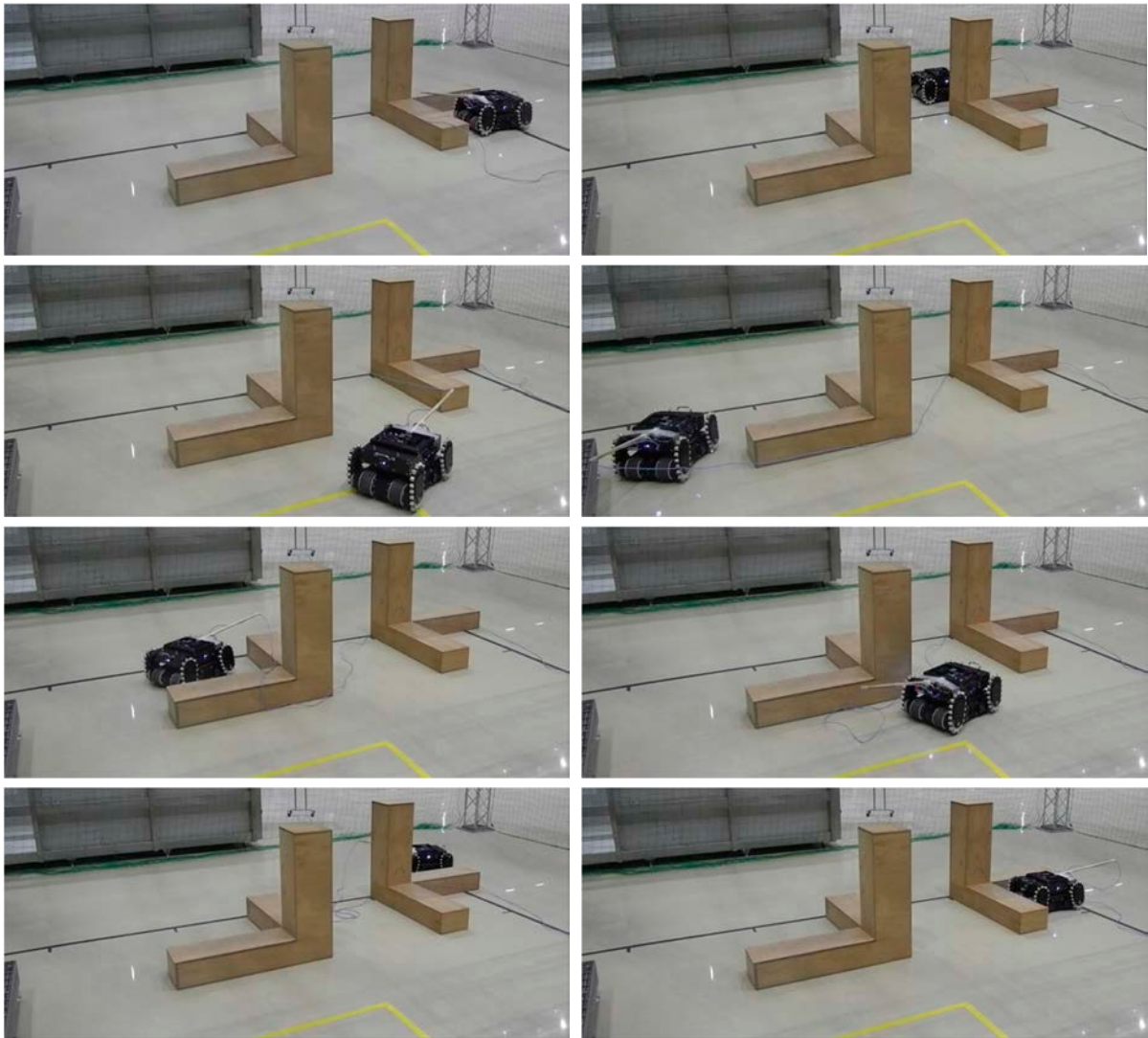


図 5.5-1 図 5.3.2-1 に示したコース例における試験実施の様子

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-0003 ケーブル牽引走破性能試験 専用フォーマット			
実施日：____年 ____月 ____日		実施場所：_____ オペレータ：_____	
記録者：_____		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)	
床面性状・材質：_____		・初期状態	
通路幅：_____ m		・試験後状態	
1 往復基準走行距離長：_____ 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：	
1	_____	11	_____
2	_____	12	_____
3	_____	13	_____
4	_____	14	_____
5	_____	15	_____
6	_____	16	_____
7	_____	17	_____
8	_____	18	_____
9	_____	19	_____
10	_____	20	_____
開始時刻：_____		終了時刻：_____	
走行時間：_____ min		総走行距離：_____ m	
平均移動速度：_____ m/min			
備考(参考記録も含む)			
・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

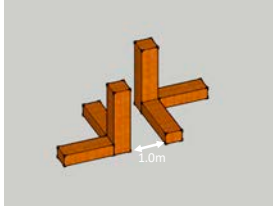
【記入例】

JAEA-TM-0003 ケーブル牽引走破性能試験 専用フォーマット

実施日：2019年 3月 5日 実施場所： 檜葉センター試験棟 オペレータ： 機構 太郎
 記録者： 檜葉 花子 評価対象機器： ロボットC

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)



床面性状・材質： リノリウム

通路幅： 1.0 m

1 往復基準走行距離長： 19.4 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
- ・破損等無し
- ・試験後状態
- ・破損等無し

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)

1	✓	11	
2	✓	12	
3	✓	13	
4	✓	14	
5	✓	15	
6	✓	16	
7	✓	17	
8	✓	18	
9	✓	19	
10	30.0min	20	

計測値・計算値:

開始時刻： 12:45
 終了時刻： 13:15
 走行時間： 30 min
 総走行距離： 174.6 m
 平均移動速度： 5.82 m/min

備考(参考記録も含む)

・外部照明： (有・無)

・失敗した場合、事象や原因について記載

- ・ 9 往復終了時点で、制限時間をオーバーしたため、終了距離は9往復分とした。

・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、1 F 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。

- 福島第一原子力発電所 2 号機原子炉建屋 1~5 階ロボットによる雰囲気線量・温度の測定結果（掲載日 2011 年 10 月 21 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_111021_03-j.pdf
(参照 2020-9-7)
- 福島第一原子力発電所 2 号機原子炉建屋 1~5 階ロボットによる雰囲気線量・温度の測定結果（掲載日 2011 年 10 月 21 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/images/handouts_111021_03-j.pdf
(参照 2020-9-7)
- 福島第一原子力発電所 2 号機原子炉建屋内風景（掲載日 2011 年 10 月 21 日、撮影日 2011 年 10 月 20 日）
[出典：東京電力ホールディングス株式会社]
<http://photo.tepco.co.jp/date/2011/201110-j/111021-03j.html>
(参照 2020-9-7)

6 まとめ

本稿では、1 F 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、狹隘通路走破性能試験（JAEA-TM-001）、階段走破性能試験（JAEA-TM-002）、ケーブル牽引走破性能試験（JAEA-TM-003）に関する試験方法や諸条件についてまとめたものである。

これら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物差しにあたるものであり、既存のロボットの持つ性能を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置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や試験環境の例については、櫛葉遠隔技術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://photo.tepco.co.jp/en/index-e.html> (参照 2020-9-7).
- [2] Kawatsuma S., Fukushima M. and Okada T. Emergency response by robots to Fukushima-Daiichi accident: summary and lessons learned, *Industrial Robot: International Journal*, 2012, Vol. 39 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 2020-9-7).
- [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. et al, Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots, 2013, *Journal of Field Robotics*, Vol. 30, Issue 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 2020-9-7).
- [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 2020-9-7).
- [10] Tokyo Electric Power Company Holdings, Investigation in the Torus Room on Unit 2 basement floor of the reactor building, <https://photo.tepco.co.jp/en/date/2012/201204-e/120419-01e.html> (参照 2020-9-7).

- [11] Tokyo Electric Power Company Holdings, Video by Quince Robot within Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 3 reactor building,
<https://photo.tepco.co.jp/en/date/2011/201107-e/110728-01e.html> (参照 2020-9-7).
- [12] Trainer T., Deployment of Unmanned Systems after March 2011 Incident, 日本ロボット学会誌, 2014, Vol.32, No.2, pp.133-136, DOI 10.7210/jrsj.32.133.
- [13] Tokyo Electric Power Company Holdings, Packbot working inside the reactor building of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 3,
<https://photo.tepco.co.jp/en/date/2011/201104-e/110417-01e.html> (参照 2020-9-7).
- [14] 吉野 伸, 東京電力における原子力事故対応ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 2014, Vol.32, No.1, pp.19-24, DOI 10.7210/jrsj.32.19.
- [15] 川妻伸二, 福島第一原子力発電所事故のためロボットと課題, 日本ロボット学会誌, 2018, Vol.36, No.7, pp.472-477, DOI 10.7210/jrsj.36.472.
- [16] 小柳栄次, 災害対応ロボット-福島第一原子力発電所建屋内探査用ロボット-, 日本ロボット学会誌, 2016, Vol.34, No.10, pp.671-675, DOI 10.7210/jrsj.34.671.

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 組立単位	
	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	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	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		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	ウェーバ	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
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(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 ニュートンメートル	Pa s N m	m ⁻¹ kg s ⁻¹ 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
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	名称	記号	乗数	名称	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=60 s
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/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) 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 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単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	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 =0.1 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 ^(a)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 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=0.2 g = 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℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

