

すばる望遠鏡における主鏡傷検査の改善 (Improvement of Primary Mirror Scratch Inspection at Subaru Telescope)

○ハワイ観測所 技術企画開発室 猿渡 弘一
(○Subaru Telescope TPD Koichi Sawatari)

概要(Abstract)

すばる望遠鏡主鏡は ULE ガラスにアルミ膜を蒸着して光を反射させている。主鏡再蒸着作業はアルミ膜自体の酸化や付着する汚れの影響により反射率は次第に低下する為、アルミ膜を一旦除去して再蒸着を行うことで観測が実現できるレベルの反射率まで望遠鏡に搭載されている鏡の反射率を回復させる作業である。おおよそ、4 年に 1 度の周期で実施されており、建造からこれまで 9 回実施している。そして傷検査は主鏡再蒸着作業の約 3 カ月間の長期にわたる作業のなかで、その内アルミ膜除去を行った後、主鏡についた傷の数量及び対策要否について判断する重要な作業であり、スケジュール上実施できる期間は限られており効率的に実施する必要がある。その為、効率的で属人化しない作業となるように改善を試みた。その改善策についてここに報告する。尚、改善策は完成されたものではなく次回以降も作業の標準化・公立かという課題に対して常に改善されていくべきものである。

Subaru Telescope's primary mirror reflects light by depositing an aluminum film on ULE glass.

The primary mirror is re-evaporated to restore the reflectivity of the mirror to a level where observations can be made. This process is performed approximately once every four years, and has been performed nine times since the telescope was built.

The inspection for scratches is an important part of the three-month long process of re-evaporation of the primary mirror, in which the quantity of scratches on the mirror after aluminum film removal and the necessity of countermeasures are determined.

Therefore, we attempted to improve the process to make it more efficient and less person-driven. The proposed improvements are reported here.

1. 目的 (Purpose)

傷検査の目的は『主鏡の延命措置判断のため』である。

そしてその内容は、主鏡の傷を発見し、その傷が以降の時間経過により拡大するかどうかを検査する。

クラック先端に亀裂がある場合、傷が明らかに成長している場合は対策を講じることである。

これまで再蒸着作業の度に行われてきた本作業であるが、一部ベテランを含む有識者により属人化している作業があるため、今後の人員交代や、有識者が集まらないことを想定した時に本検査は検査方法の標準化を模索しなければならない状況である。その為に今回は作業の工程見直しによる効率化と、属人化した技術を現在の保有測定器を用いることでより再現性の高い作業にすることを念頭に改善策の策定を行うものである。

The purpose of the flaw inspection is to determine the life span of the primary mirror. The purpose is to inspect the primary mirror for cracks and whether the cracks enlarge with age. If there is a crack at the tip, or if the scratch has obviously grown, countermeasures are to be taken.

Although this work has been done for every re-evaporation operation, some work is done by specialists, including veterans, and it is necessary to seek standardization of inspection methods in preparation for future personnel changes or when specialists cannot be assembled. For this reason, this time we will formulate improvement measures with a view to increasing efficiency by reviewing the work process, improving reproducibility with the measuring instruments we currently possess, and replacing technical skills.

2. 対策基準についての考察

2.1 傷のサイズと深さの関係 (2.1 Relationship between wound size and depth)

1998 年に主鏡が納入された当時、Contraves 社が既に研削していた傷は傷の深さ 0.075inch (1.9mm) が基準とされていました。しかし、天文台では傷深度の測定は不可でした。

その一番の要因として挙げられるのが、測定対象が ULE ガラスという特殊なガラスだということです。なぜなら、傷の深度を測定するときにレーザーの反射により距離を測定することが一般的ではありますが、現在の最新の電子顕微鏡やレーザーを駆使してもガラス自体が光を透過してしまうためその傷の深度を測定することはできないからです。

そのため、2001 年の傷検査以降の傷検査では、下記グラフの通り傷サイズと深度の対比から傷深度を推定して対策を行う基準を定めていました。

傷表面の最大寸法が 5mm 以上以下であれば傷深度 1.9mm 以上の可能性があるとしていました。

When the primary mirror was delivered in 1998, Contraves had already polished the scratches, and a scratch depth of 0.075inch (1.9mm) was considered standard. However, the depth of the

scratches could not be measured at the observatory. The main reason for this was that the glass to be examined was ULE glass, a special type of glass. However, even with today's state-of-the-art electron microscopes and lasers, it is impossible to measure the depth of the scratches because the glass itself transmits light. Therefore, since the scratch inspection in 2001, the following graph has been used to estimate the depth of scratches based on the contrast between the size of scratches and the depth of scratches. As shown in the graph below, by estimating the depth of a scratch based on the contrast between the size of the scratch and the depth of the scratch, we had established a standard for taking countermeasures. If the maximum dimension of the scratch surface is 5 mm or less, we assumed that the scratch depth could be 1.9 mm or more.

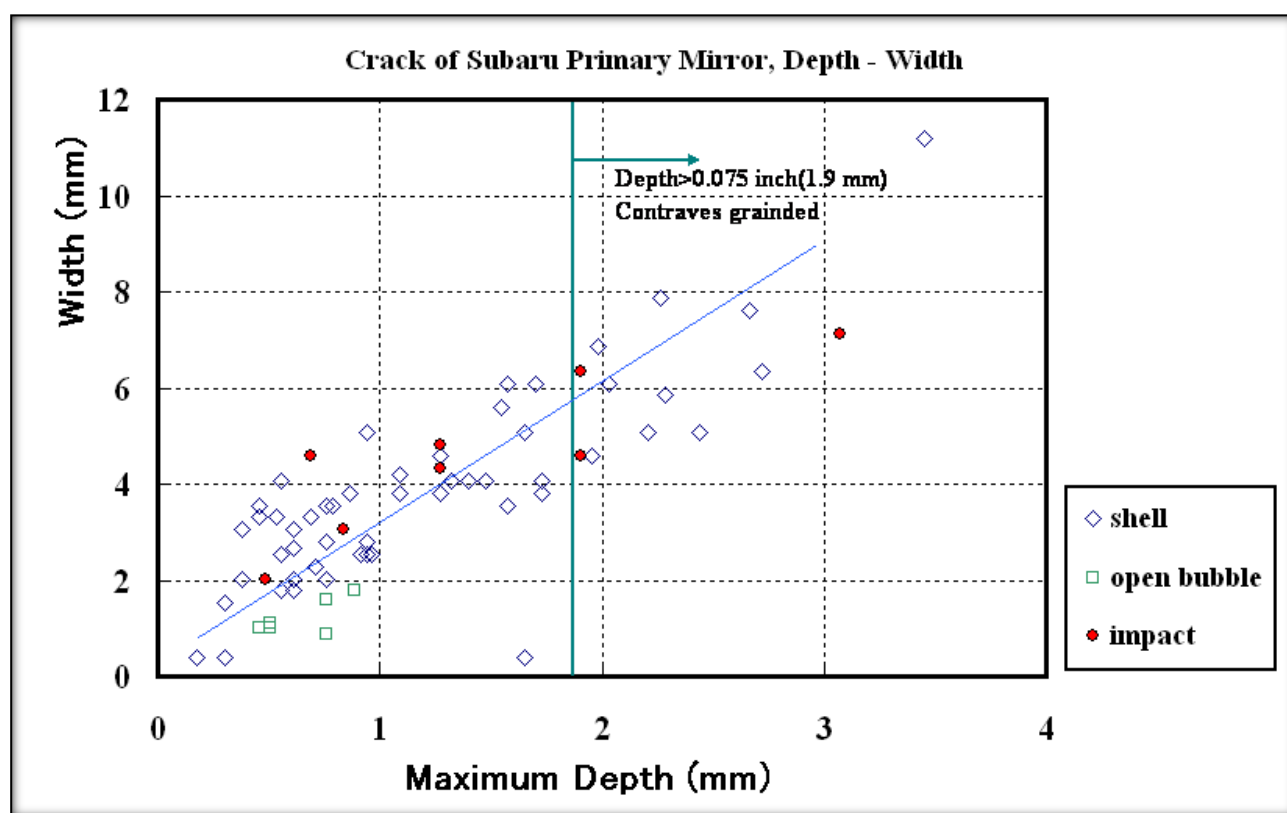


表 2-1 傷表面の大きさと推定する傷深度の関係

Table 2-1 Relationship between the size of the wound surface and the estimated depth of the wound

以上を踏まえて、今回の改善案を考える際に以下の2つのポイントにより判断基準を設けました。

1. 傷の検出基準（記録の取得を実施するか否か）

項番	判断条件1	判断条件2	検出対象	傷の範囲	マーキングシール色	写真取得分担
1	表面寸法：2mm以上	薄いひっかき傷でない	○	2mm以下	青	不要
2	表面寸法：2mm以上	薄いひっかき傷である	×	2mm以上～5mm以下	黄色	作業者
3	表面寸法：2mm以下	-	×	5mm以上～9mm以下	ピンク	作業者
				9mm以上	オレンジ	担当
				連続傷	緑/ポイント	担当

表 2-2 記録に残す傷に対する判断基準

Table 2-2: Criteria for injuries to be recorded

2. 対策（研削・エッチングを施す傷）についての判断基準

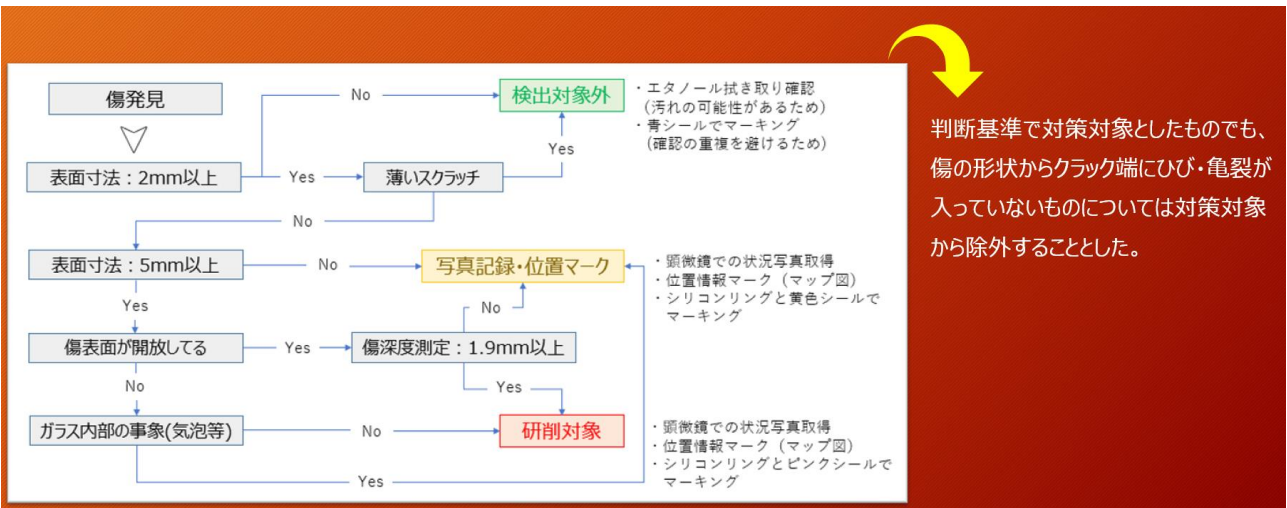


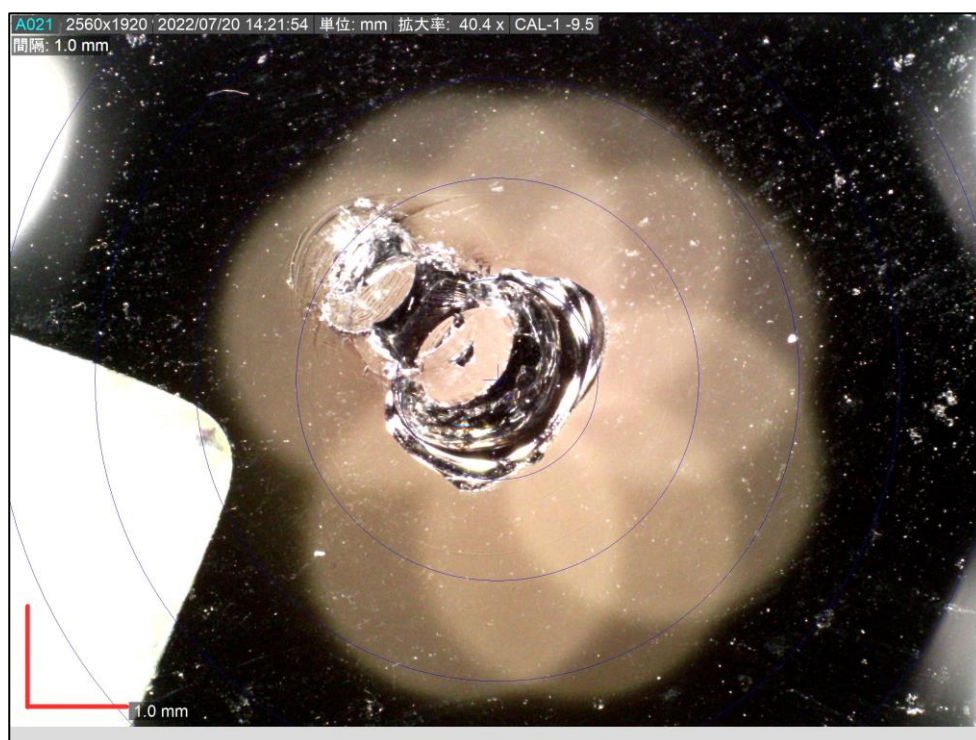
表 2-3 対策についての判断基準

Table 2-3: Criteria for determining countermeasures (scratches to be polished or etched)

3. 新検査方法で導入した機材について

以下に新検査方法で導入した機材について紹介します。

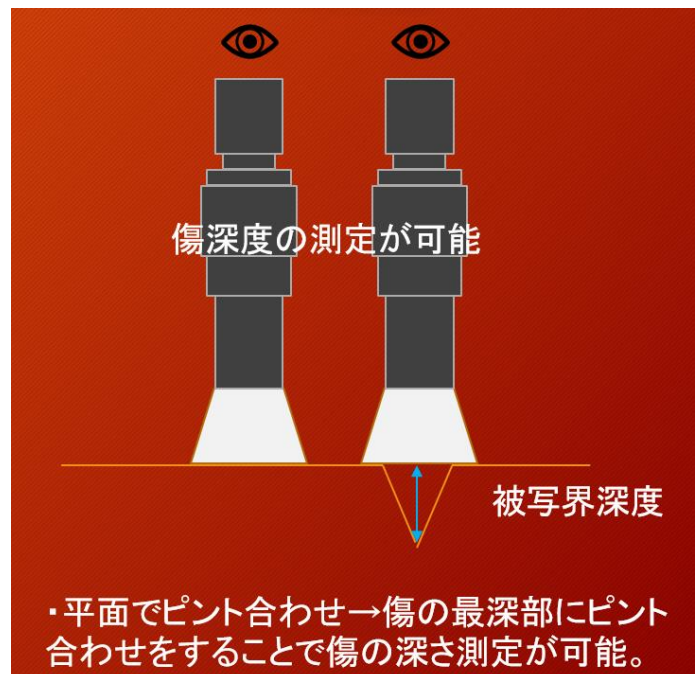
1) デジタル顕微鏡：Dino-Lite Edge / 5MP Series ／ メーカー：DinoLite



導入理由：主鏡上での作業では大型顕微鏡を用いた作業は難しい。本品は持ち運びがしやすく小型であり、タブレットと接続すると傷の形状を把握しやすく、画面にスケールマーカを設定できることから傷の大きさをすぐに特定できる。従来方法だと傷の寸法測定とデジカメ写真取得を同時に行うことは難しかった。

Reason for Introduction When working on a primary mirror, it is difficult to work with a large microscope. This product is compact and portable, and by connecting it to a tablet device, it is easy to grasp the shape of the flaw, and by setting a scale marker on the screen, the size of the flaw can be quickly confirmed. With conventional methods, it has been difficult to measure the dimensions of scratches and acquire digital camera photos at the same time.

2) 光学深度測定顕微鏡：8400K / メーカー：John Chadwick Corporation



導入理由：主鏡傷の深度を直接計測する為に導入した。傷上面が開放されている傷に対しては傷の深さ測定が可能である。デメリットとしては上面開放されていない傷については深度測定は実施できない。使用感としては透明傷に対してのピント合わせが難しいことが難点である。測定結果が属人化しやすいが、今後深さ測定をおこなっていく基準とした。

Reason for introduction: Introduced to directly measure the depth of scratches on the primary mirror. Depth measurement can be performed on scratches with an open top surface. The disadvantage is that depth measurements cannot be taken for scratches that do not have an open top surface. The disadvantage is that it is difficult to focus on transparent wounds. Although the measurement results are prone to individual differences, this was used as a standard for future depth measurements.

3) レーザートラッカー：Vantage Laser Trackers ／ メーカー：FARO®



導入理由：従来検査の反省点として、傷位置の再現確認が課題であった。レーザートラッカーは傷そのものを直接読み取ることはできなかったが、傷をシリコンマーカで囲うことにより、各傷の座標を記録できるようになった。座標は傷位置を記したマッピングに活用できるほか、レーザートラッカーの機能として特定傷を基準にした任意傷へのポインタ機能を有する為、以降の検査において傷が見つからないといった事態に対応できるようになる。

Reason for Introduction As a reflection of the conventional inspection, checking the reproducibility of the location of scratches had become an issue. Although the laser tracker could not directly read the scratches themselves, it was possible to record the coordinates of each scratch by surrounding the scratch with a silicone marker. These coordinates could be used to map the location of the scratches, and because the laser tracker has a pointer function to any scratch based on a specific scratch, it was possible to respond to cases where the scratches could not be found during subsequent inspections.

4. 従来の傷検査方法とその改善案について

従来の傷検査方法のまとめとしては以下図の通りである。

The following figure is a summary of conventional flaw inspection methods.



そして従来の傷検査方法の問題点は下記の通りであった。

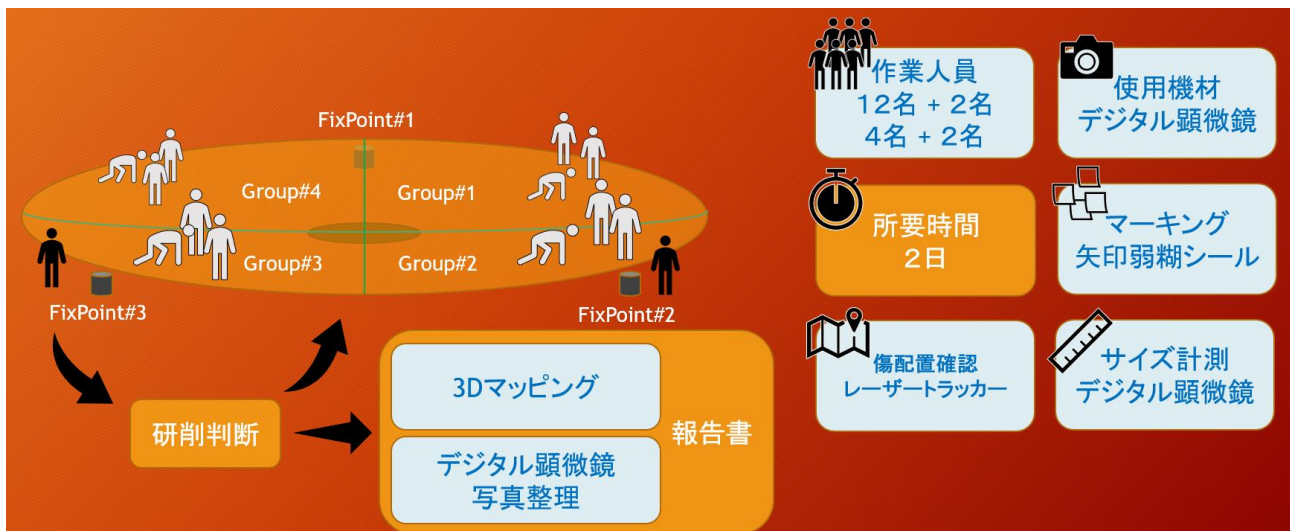
1. 写真の取得にはデジカメを用いているため小さな傷はピントが合わない。
2. 取得した写真での傷形状の把握とサイズ計測が困難なものがある。
3. 手書きの傷配置を基に、マッピングする為位置の誤りが発生する。
4. 過去見つけている傷が、今回は見つからない等の傷位置特定が困難。

And the problems with the conventional scratch inspection method were as follows

- (1) Because a digital camera is used to acquire photographs, small scratches are out of focus.
- (2) It is difficult to grasp the shape and measure the size of scratches in the acquired photographs.
- (3) Mapping is performed based on handwritten scratch layouts, which can lead to positional errors.
- (4) It is difficult to locate scratches that have been found in the past but not found this time.

その問題解決のため先に紹介した検査機材を用い内容を一部変更した。

In order to solve this problem, we used the inspection equipment described above and made some changes to the content.



上記の通り使用機材を変更することで傷検査をより効率的に実施できるようになった。

By making the above changes to the equipment used, flaw inspection can be performed more efficiently.

・ 傷検査改善案のメリット

1. デジカメでは実現できない傷形状の詳細記録
2. 画像と重なるようにスケールを配置でき、最大寸法測定が容易になる。
3. 傷配置を座標で特定できるため、マッピングが容易になる。
4. レーザートラッカーにより過去傷位置にポインターを当てることで位置確認が容易になる。

Advantages of the proposed flaw inspection improvement

1. detailed recording of the flaw shape is possible, which is not possible with a digital camera.
2. the maximum dimension can be easily measured because the scale can be placed so that it overlaps the image
3. easy mapping of defects because the defects can be located by coordinates
4. laser tracker allows easy location confirmation by pointing a pointer to the past defect location.

- 2022 年度の傷検査結果

5mm 以上の傷が多数検出されたものの、対策済の傷またはクラック端の亀裂は確認されなかったため今回対策不要とした。今後の傷の成長を経過観察し、拡大している傷には対処していく。

Results of Scratch Inspection in 2022

Although many scratches larger than 5 mm were detected, no scratches that have already been addressed or cracks at the edge of cracks were identified, so no measures were deemed unnecessary this time. The growth of scratches will be monitor and any expanding scratches will be addressed.

傷クラス	規格(傷範囲)	Group#1 Area	Group#2 Area	Group#3 Area	Group#4 Area	合計	対策数
Class 1	$2\text{mm} \leq x < 5\text{mm}$	17	23	9	24	73	0
Class 2	$5\text{mm} \leq x < 9\text{mm}$	4	7	1	1	13	0
Class 3	$9\text{mm} \leq x$	4	11	2	9	26	0
Class 4	連続傷	15	24	0	15	54	0
another	上記想定外	0	0	0	0	0	0
集計	—	40	65	12	49	166	0

5. 傷検査改善案に対する反省点

5. reflections on the implementation of the proposed wound inspection improvements

- 今後解決すべき課題

- 傷の大きさを測定する際、鏡面がスライドしてしまい、撮影時にブレが生じる。
- 顕微鏡に付属のフォトアプリケーションの動作が遅く、ストレスが溜まる。
- 傷の種類によっては、凹凸によるハレーションが発生する（傷の大きさは測定可能です。）
- 傷があると光が当たりにくいいため、画像の取得に個人差が出る場合がある。（偏光を変えてもキズの測定が困難な場合があります。）
- キズ判別は改善されているが、より短時間でキズを判別する方法が欲しい。
- レーザートラッカーでキズをマッピングする際、主鏡の保護にシリコンパッドを使用していたが、シリコンパッドの脱脂がうまくいかず、脱脂がうまくいかなかった。しかし、シリコンパッドはうまく脱脂することができなかった。主鏡の保護に適した代替品を考案する予定である。

- Problem to be solved

- When measuring the size of scratches, the mirror surface slides, causing blurring when taking pictures.
- photo application attached to the microscope is slow and stressful.
- depending on the type of scratch, halation may occur due to unevenness (The size of the scratch is measurable.)
- light does not easily hit the scratches, so the quality of image acquisition may vary among

individuals. (It may be difficult to measure scratches even if the polarization is changed.

5. The scratch identification process has been improved, but we would like a method to identify scratches in a shorter time.

6. When mapping scratches with laser tracker, a silicone pad was used to protect the primary mirror, but the silicone pad could not be degreased properly. However, the silicone pads could not be successfully degreased. An alternative suitable for protection of the primary mirror will be devised.

最後に、今回確認された各課題を含め傷検査の方法にはさらなる改善が必要な部分がある。次回以降の蒸着作業を目標として属人化しない作業を目指しより良いプランを構築していく必要がある。

改善策は終了したわけではなく、次年度以降の業務の標準化や一般公開の課題に対応するため、常に改善する必要があります。

Finally, there are areas that require further improvement in the method of flaw inspection, including each of the issues identified this time. It is necessary to build a better plan for the next and subsequent depositions, aiming for a less person-driven process.

Improvement measures are not finished; they need to be constantly improved in order to meet the challenges of standardizing operations and public access in the following years and beyond.