



JAEA-Technology

2008-074

IS プロセス材料腐食試験装置の配管リークの 原因調査

Investigation into the Cause of Leak in the Pipe of the Corrosion
Test Apparatus of IS Process

田中 伸幸 諏訪 博一* 古川 智弘 稲垣 嘉之
Nobuyuki TANAKA, Hirokazu SUWA*, Tomohiro FURUKAWA
and Yoshiyuki INAGAKI

大洗研究開発センター
技術開発部
Technology Development Department
Oarai Research and Development Center

December 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-
Technology
2008-074

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

ISプロセス材料腐食試験装置の配管リークの原因調査

日本原子力研究開発機構

大洗研究開発センター

技術開発部

田中 伸幸、諏訪 博一*、古川 智弘、稻垣 嘉之

(2008年9月22日受理)

熱化学水素製造法ISプロセスでは、腐食性が極めて強い硫酸及びヨウ化水素酸を取り扱うため、各種構造材料に対する腐食データを取得することを目的とした材料腐食試験を行っている。このうち400°Cの90wt%硫酸を用いた試験実施中に、材料腐食試験装置の還流コンデンサー配管においてリークが生じ、硫酸が漏洩する事象が発生した。そこで発生原因調査を実施し、硫酸を用いた試験装置の運用・管理において有益な以下の知見を得た。

外観目視検査の結果、配管の溶接部に約1mm幅の貫通孔が生じていることが確認されたため、配管を切断したところ、配管内面の貫通孔周辺の溶接部において減肉が観測された。さらに、EPMAを用いた材料分析試験により、貫通孔近傍において配管材料の構成元素に不均一な分布が観察された。これらより、配管リークの発生は、溶接熱影響部の鋭敏化による耐食性の低下から、その部分の腐食が進行したことが原因であると推定される。

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

* ニューカリア・ディベロップメント株式会社（平成20年3月まで核熱応用工学ユニットに出向）

Investigation into the Cause of Leak in the Pipe of the Corrosion Test Apparatus of IS Process

Nobuyuki TANAKA, Hirokazu SUWA*, Tomohiro FURUKAWA and Yoshiyuki INAGAKI

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

(Received September 22, 2008)

The thermochemical water-splitting hydrogen production IS process utilizes corrosive chemicals such as sulfuric acid and hydriodic acid. Corrosion tests in IS process environments have been carried out to get the corrosion data of materials. In the corrosion test in 90wt% sulfuric acid at 400°C, the leak of sulfuric acid was observed in a pipe connected with a reflux condenser. The cause of the leakage is a significant knowledge for the operation of the test apparatus. Therefore the cause was investigated.

A 1mm wide through hole was detected in the pipe around the welding bead. By visual observation after cutting the pipe, the wall thickness of the pipe became thin at the inside welding bead around the through hole. In addition, EPMA showed that the inhomogeneous distribution of the constituent elements of the pipe was observed around the through hole. For these reasons, it is estimated that the lowering of the corrosion resistance by the sensitization at the welding caused the leakage.

Keyword: Hydrogen Production, Thermochemical Process, IS Process, Sulfuric Acid, Corrosion

* Nuclear Development Corporation (On loan to JAEA, Division of Applied Heat Technology until March 2008)

目 次

1. はじめに	1
2. 調査方法と調査結果	2
2. 1 表面観察	2
2. 2 EPMA による元素分析	2
3. リーク発生原因の考察	4
4. まとめ	5
謝辞	6
参考文献	6

Contents

1. Introduction	1
2. Examination Methods and Results	2
2.1 Surface Observation	2
2.2 Elemental Analysis by EPMA	2
3. Consideration of Cause of Leak	4
4. Concluding Remarks	5
Acknowledgement	6
References	6

図一覧

- Fig. 1.1 材料腐食試験装置の系統構成
- Fig. 2.1 還流コンデンサー構造図
- Fig. 2.2 還流コンデンサーと配管の外観
- Fig. 2.3 配管の外観状況（リーク発生部近傍）
- Fig. 2.4 配管試料切断（粗切断）図
- Fig. 2.5 外面観察位置図
- Fig. 2.6 配管切断後の光学顕微鏡写真（リーク部位置円周）
- Fig. 2.7 配管切断後の光学顕微鏡写真（リーク発生部近傍（写真中心方向：約 10°））
- Fig. 2.8 配管切断後の光学顕微鏡写真（リーク部の反対面（写真中心方向：約 190°））
- Fig. 2.9 配管切断図（内面観察用）
- Fig. 2.10 配管切断後の光学顕微鏡写真（リーク発生部近傍内表面）
- Fig. 2.11 配管切断後の光学顕微鏡写真（リーク発生部近傍反対方向内表面）
- Fig. 2.12 配管の E PMA_2 次電子像観察結果（リーク発生部近傍内表面）
- Fig. 2.13 配管試料の E PMA_X 像測定結果（リーク発生部近傍内表面：リーク発生部中央部）
- Fig. 2.14 配管試料の E PMA_X 像測定結果（リーク発生部近傍内表面：リーク発生部端）

1. はじめに

現在、独立行政法人 日本原子力研究開発機構（原子力機構）では、高温の熱を用いて水を分解し水素を製造するヨウ素-硫黄系熱化学プロセス（ISプロセス）の技術開発を進めている⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。このISプロセスでは、腐食性が極めて強い硫酸及びヨウ化水素酸を取り扱うため、各種構造材料に対する腐食データの取得を目的としたオートクレーブを3基設置し、材料腐食試験が行われている⁽¹⁰⁾。このうちの一つにおいて、400°Cの90wt%硫酸を用いた試験実施中に、還流コンデンサー配管においてリークが生じ、硫酸が漏洩する事象が発生した。図1.1は材料腐食試験装置の系統図を示したものである。試験装置は外部加熱式の圧力容器であり、容器内には、試験片と試験液を入れたビーカーを納めている。また、容器のふたには、カバーガスの供給／排出用配管及び試験液攪拌機が取り付けられ、背圧弁により内部圧力の調整が行われている。排出用配管には溶液の流出を防ぐために水冷の還流コンデンサー配管が取り付けられており、リークはこの配管の溶接部において発生した。リーク発生時の試験条件は、400°Cの90wt%硫酸中における腐食試験を100時間行う予定であった。試験温度到達から、約5時間後において容器内圧力の低下が生じ、上記溶接部においてリークが確認された。このリーク発生の原因是、硫酸を用いた試験装置の運用・管理において有益な知見となることから、発生原因の調査を実施した。

本報告は、還流コンデンサー配管のリーク発生原因調査に資するため、配管試料切断、EPMAによる観察等の結果について纏めたものである。

2. 調査方法と調査結果

通常、腐食・割れによるリーク等の発生原因調査においては、該当試料の表面等の観察に基づいて、事象発生原因を推定し、これを確証するための調査を実施する方法が行われている。本件では、リーク発生原因調査に資する事を目的に、Fig. 2.1 に示す還流コンデンサーの配管のリーク発生部について、以下の要領で表面観察及び EPMA を用いた分析を実施した。

2. 1 表面観察

(1) 外面観察

還流コンデンサー配管の外観写真を Fig. 2.2 (全体像) 及び Fig. 2.3 (リーク発生部近傍) に示す。写真には、リーク発生部を正面にして、還流コンデンサー本体のソケット部が真下を向く位置を 0 度とし、還流コンデンサー上方から見て、時計方向に回転した角度を示した (以下の角度表現も同様)。外面観察の結果を以下に示す。

- ・リーク発生部は、約 10 度の位置の溶接ビードのすぐ上に、円周方向 1 mm 程度の長さで観察された。
- ・配管とスリーブの中心軸が溶接部分で 0 度側に若干曲がっていた。

配管について、Fig. 2.4 に示すように以降の内面観察における取扱いが可能な大きさに粗切断を実施した。切断は、チューブカッター又は金属鋸を用いて行った。切断時には配管試料に圧力が負荷されることが懸念されるため、チューブカッターの支持ローラー又は固定治具がリーク発生部位に接触しないように注意して、切断における配管試料の支持・固定を行った。

配管の切断後、光学顕微鏡 (D300・D1x/Nikon 製) を用いて配管表面を観察した。観察位置は、Fig. 2.5 に示すようにリーク発生部近傍及び同位置の円周について行った。光学顕微鏡写真を Fig. 2.6～Fig. 2.8 に示す。観察結果は以下の通りである。

- ・溶接ビードの幅は、リーク発生部とその反対方向ではリーク部の方が広くなっていた。
- ・スリーブには溶接ビードに沿って溶接熱によると思われる変色が認められた。その変色領域は、リーク部近傍で広く認められた。

(2) 内面観察

前項の光学顕微鏡による表面観察後、Fig. 2.9 に示すようにリーク発生部が半割試料の中心位置となるように切断を実施した。切断は、試料切断時に発生する熱の影響が生じないように低速カッターを用いて、純水を冷却液として実施した。

配管の切断後、光学顕微鏡を用いて配管内面を観察した。光学顕微鏡写真を Fig. 2.10、Fig. 2.11 に示す。内面観察の結果は以下の通りである。

- ・配管のリーク発生部近傍で円周方向に減肉が観察された。この減肉は、配管と溶接ビードとの境界部において溝のように深くえぐれている状態で認められ、リーク発生部の反対側の面においても同様の位置に貫通孔は生じていないが同程度の減肉が観察された。
- ・深緑色をした腐食生成物の堆積が認められた。

2. 2 EPMA による元素分析

2. 2.1 の内面観察に使用した試験片のリーク発生部について EPMA (EPMA-C1/島津製作所製、PV-

9800/EDAX 製) による元素分析を実施した。2次電子像観察結果を Fig. 2.12~Fig. 2.14 に示す。リーク部の配管材料はハステロイ C-276 であるため、この主要元素である Cr、Fe、Ni、Mo、W 並びに S と O を対象にX線像測定を実施した。ここで、観察位置の凹凸が大きいことから、軽元素である O を除き、凹凸の影響を受けにくい EDS (エネルギー分散方式) 検出器を使用したが、S 及び Mo はX線のエネルギーが近接していることから、WDS (波長分散方式) 検出器による測定を行った。このため、S と Mo (及び O) のX線像は試料凹凸の影響を受けた結果となっている。このため、X 線像において不均一分布が観察されても、それが濃度分布によるものか凹凸の影響かは不明である。光学顕微鏡写真を Fig. 2.11 に、また、測定結果を以下に示す。

- ・内表面には $10\sigma m$ 程度の窪みが観察され、その窪みが更に大きな窪みを構成しているようにみられた。
- ・内表面で S の分布が観察された。
- ・配管材料構成元素の Ni に不均一な分布が、W に偏在が観察された。

3. リーク発生原因の考察

リーク発生部の近傍では、配管内面の円周方向に溝状の減肉が観察されたが、この減肉はリーク発生部の上下方向には観察されなかった。リーク発生部及び減肉部分は、溶接ビードのすぐ上に観察されており、この位置は熱影響部に該当する。一般に、配管材料であるハステロイ C-276 は厳しい耐食性や高温での耐酸化性、耐食性、あるいは高温の強度が要求される場合に広く活用されているが、溶接時の入熱量が大きい場合は鋭敏化が生じることがあるといわれている。リーク発生部近傍の配管外表面は、その反対側の表面と比較して溶接ビードの幅が広く、また、変色域も広い範囲で観察された。このことから、リーク発生部近傍においては、溶接時に適正值よりも大きな入熱があり、EPMA により観察されたような鋭敏化による元素の偏在が生じ、耐食性が低下したと考えられる。

この原因を確証するための調査としては、リーク発生部及び健全部（または健全品の溶接部近傍）の金相観察や同位置における EPMA 元素マッピングを行い、耐食元素（Mo・Cr）の偏析や炭化物の析出を確認することが有効であると考えられる。

なお、複合的に溶接における残留応力が遠因として寄与している可能性もあるため、同配管試料の残留応力測定についても調査が有用と思われる。

4.まとめ

400°Cの90wt%硫酸を用いた材料腐食試験実施中に還流コンデンサー配管からリークが発生した。そこでリーク発生原因の調査を行い、以下の有益な結果を得た。

- ・リーク発生部は溶接ビードのすぐ上の位置に、円周方向1mm程度の長さで観察され、リーク発生部の溶接ビードの幅は、その対向表面よりも広くなっていた。また、溶接ビードに沿って溶接時の入熱によるとみられる変色域が広い範囲で観察された。
- ・光学顕微鏡による表面観察により配管の内表面に深緑色をした腐食生成物の付着がみられ、また、リーク発生部近傍で円周方向に減肉が観察された。この減肉は、配管と溶接ビードとの境界部で著しく、リーク発生部の対向表面においても同様の位置に減肉が観察された。
- ・EPMAによる元素分析により内表面にSの分布が観察された。また、リーク発生部の配管材料の構成元素において、不均一な分布・偏在が観察された。

以上から、リーク発生部近傍での溶接における入熱量が大きく、これに起因する熱影響部の鋭敏化による耐食性の低下から、粒界腐食が進行し、割れに至ったことがリーク発生原因と考えられる。今後、原因分析の結果をふまえ、既腐食試験装置の運用・管理及び新設される硫酸を用いた試験装置の設計検討を進めていく計画である。

謝辞

本報の執筆において、貴重な助言をいただいた核熱応用工学ユニットの寺田敦彦氏に感謝いたします。

参考文献

- (1) S. Kubo et al., "A demonstration study on a closed-cycle hydrogen production by the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process", Nuclear Engineering and Design, **233**, p.347 (2004)
- (2) K. Onuki, et al., "Materials of Construction for the Thermochemical IS Process, (I)" Journal of the Hydrogen Energy Systems Society of Japan, **18** p.49 (1993)
- (3) I. Ioka, et al., "Corrosion Resistance of Fe-Si Alloys in Boiling Sulfuric Acid" Journal of the Society of Materials Science Japan, **46** p.1041 (1997)
- (4) N. Nishiyama et al., "Corrosion Resistance Evaluation of Brittle Materials in Boiling Sulfuric Acid" Journal of the Society of Materials Science Japan, **48** p.746 (1999)
- (5) Y. Kurata, et al. "High Temperature Tensile Properties of Metallic Materials Exposed to a Sulfuric Acid Decomposition Gas Environment" Journal of the Japan Institute of Metals, **65** p.262 (2001)
- (6) K. Onuki, et al., "Screening Tests on Materials of Construction for the Thermochemical IS Process" Zairyo-to-Kankyo, **46** p.113 (1997)
- (7) N. Tanaka et al., "Corrosion Resistance of Materials of Construction for High Temperature Sulfuric Acid Service in Thermochemical IS Process (Alloy 800, Alloy 600, SUSXM15J1 and SiC)" Zairyo-to-Kankyo, **55** p.320 (2006)
- (8) Y. Kurata, et al., "High Temperature Corrosion of Iron-Base and Nickel-Base Alloys for Hydrogen Production Apparatus by Thermochemical Method in H₂O + SO₃ Atmosphere" JAERI-Research 2000-011(2000)
- (9) K. Onuki, et al., "Materials of Construction for the Thermochemical IS Process, (II)" Journal of the Hydrogen Energy Systems Society of Japan, **19** p.10 (1994)
- (10) N. Tanaka et al., "Study on Corrosion Resistance of Glass Lining and Gold Plating in High Temperature Sulfuric Acid for Thermochemical hydrogen Production IS Process", 15th International Conference on Nuclear Engineering, Japan, 2007, ICONE15-10331

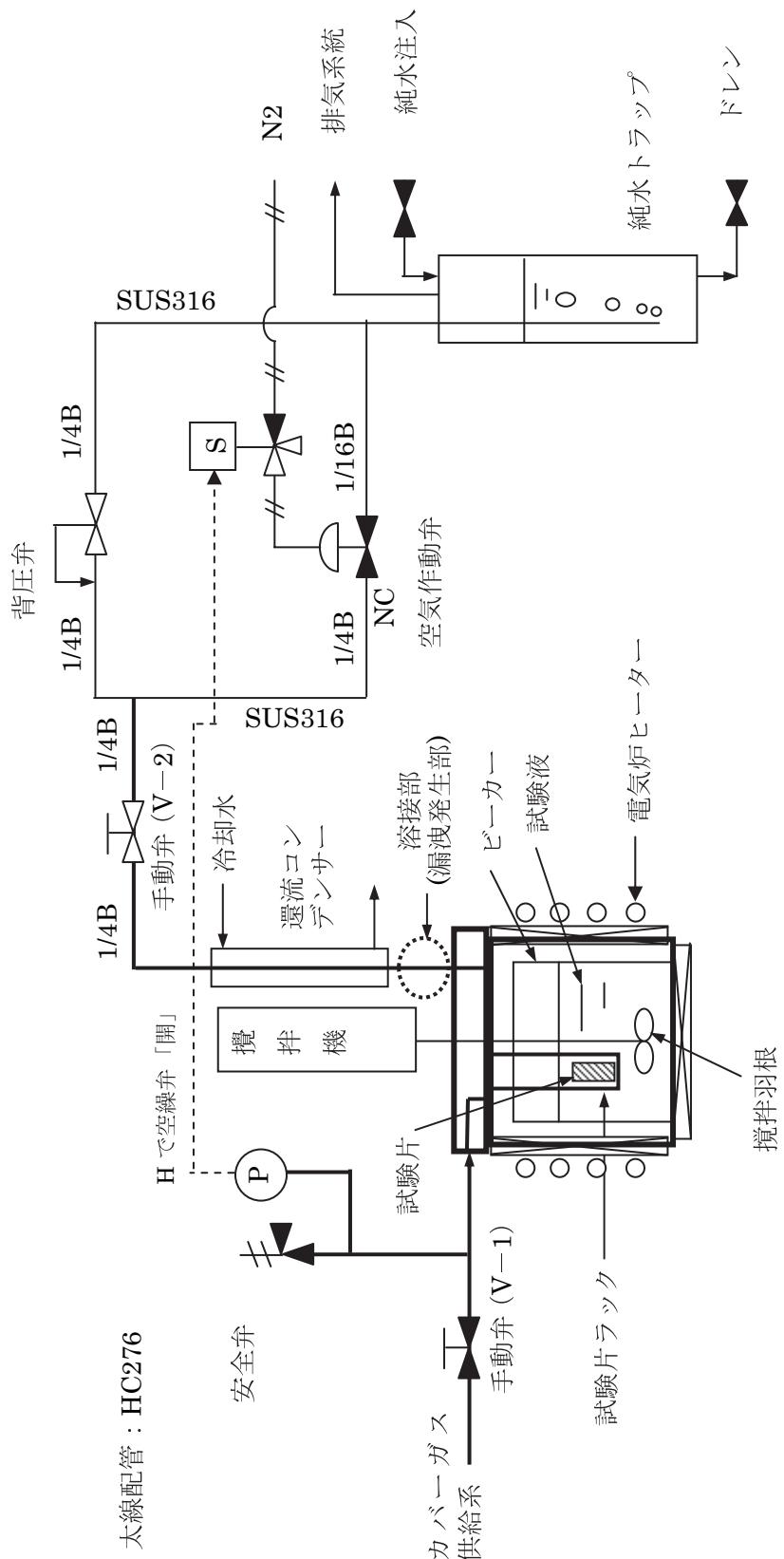


Fig. 1.1 材料腐食試験装置の系統構成

P : 壓力計

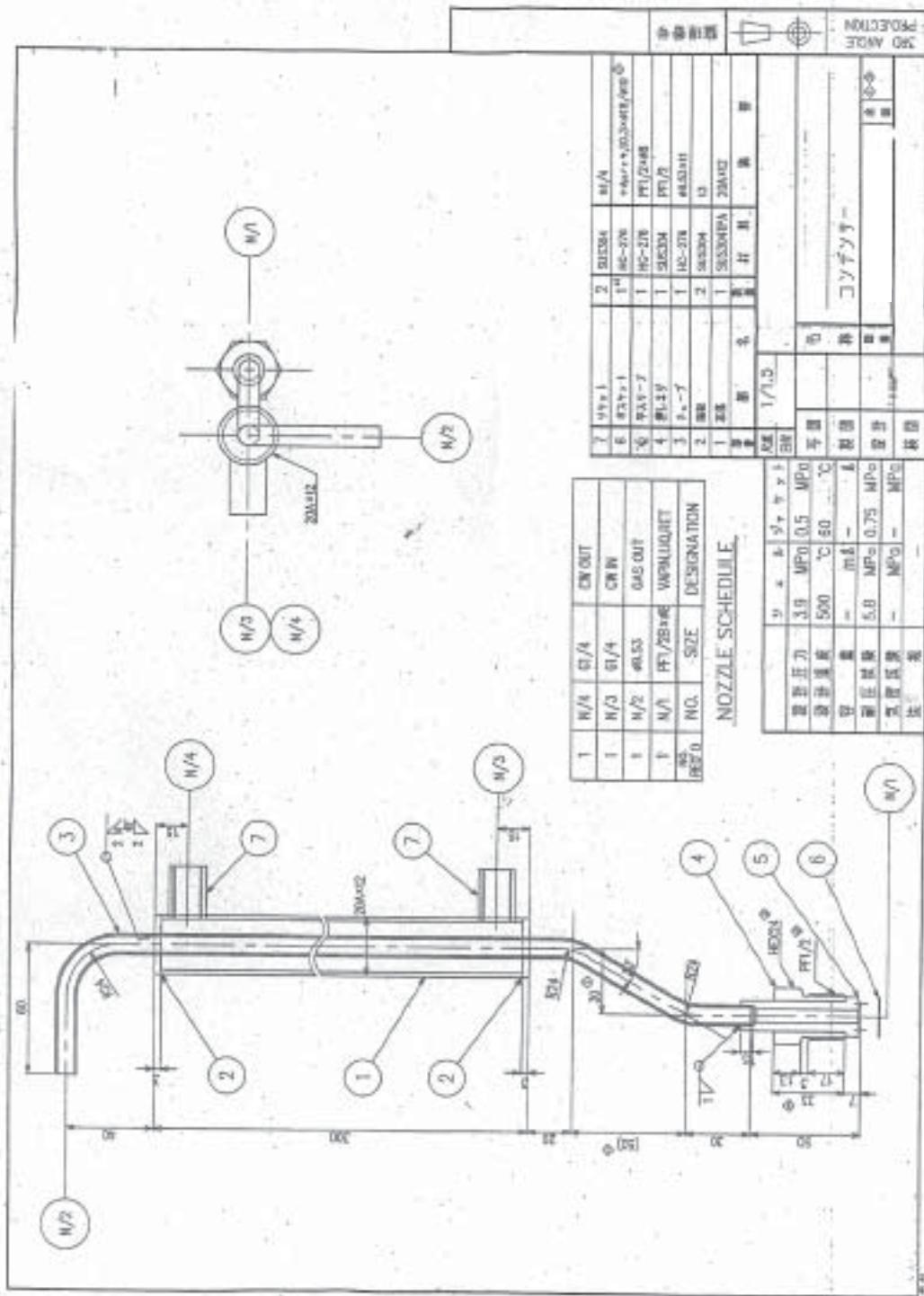


Fig. 2.1 還流コントローラー構造図

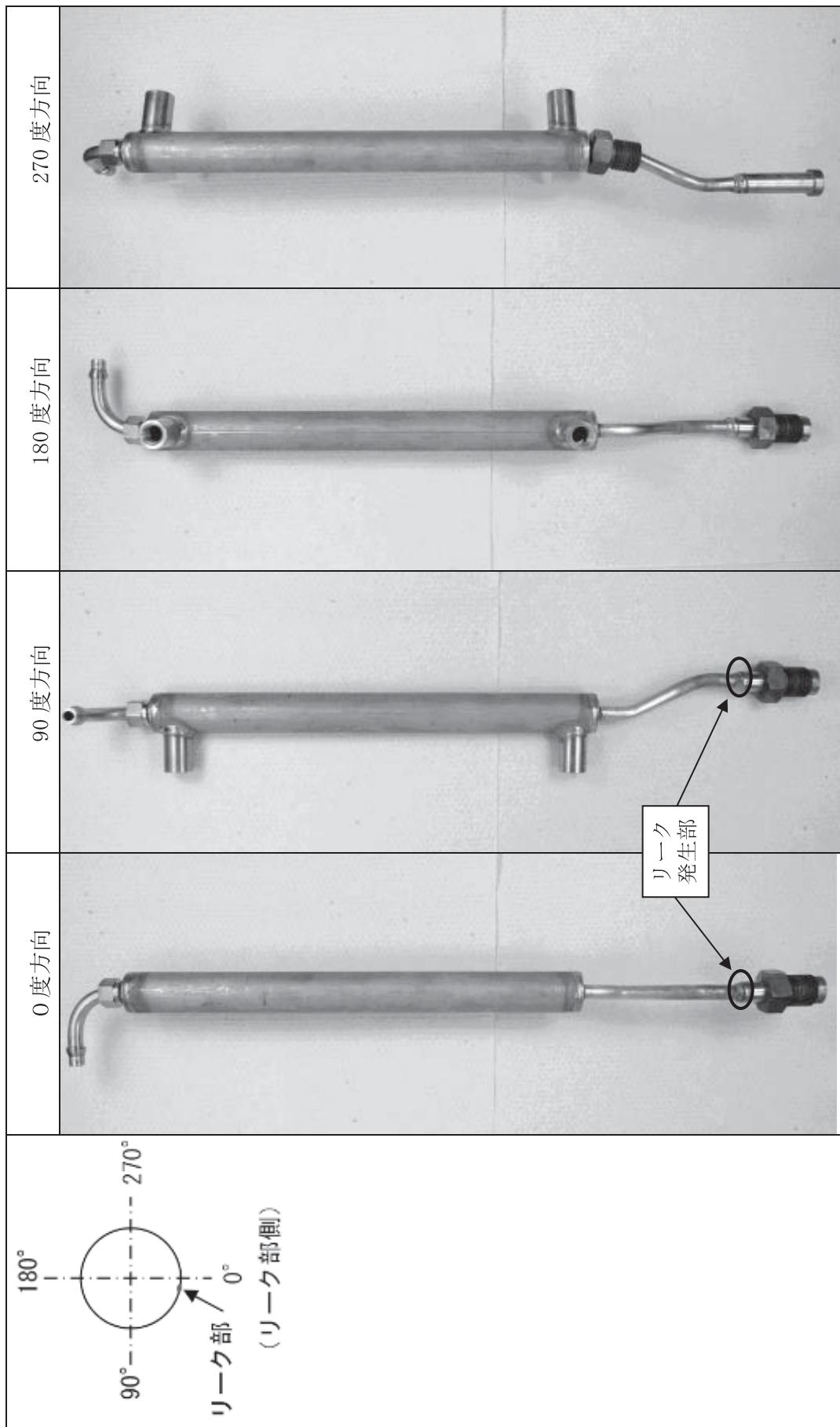


Fig. 2.2 還流コンデンサーと配管の外観

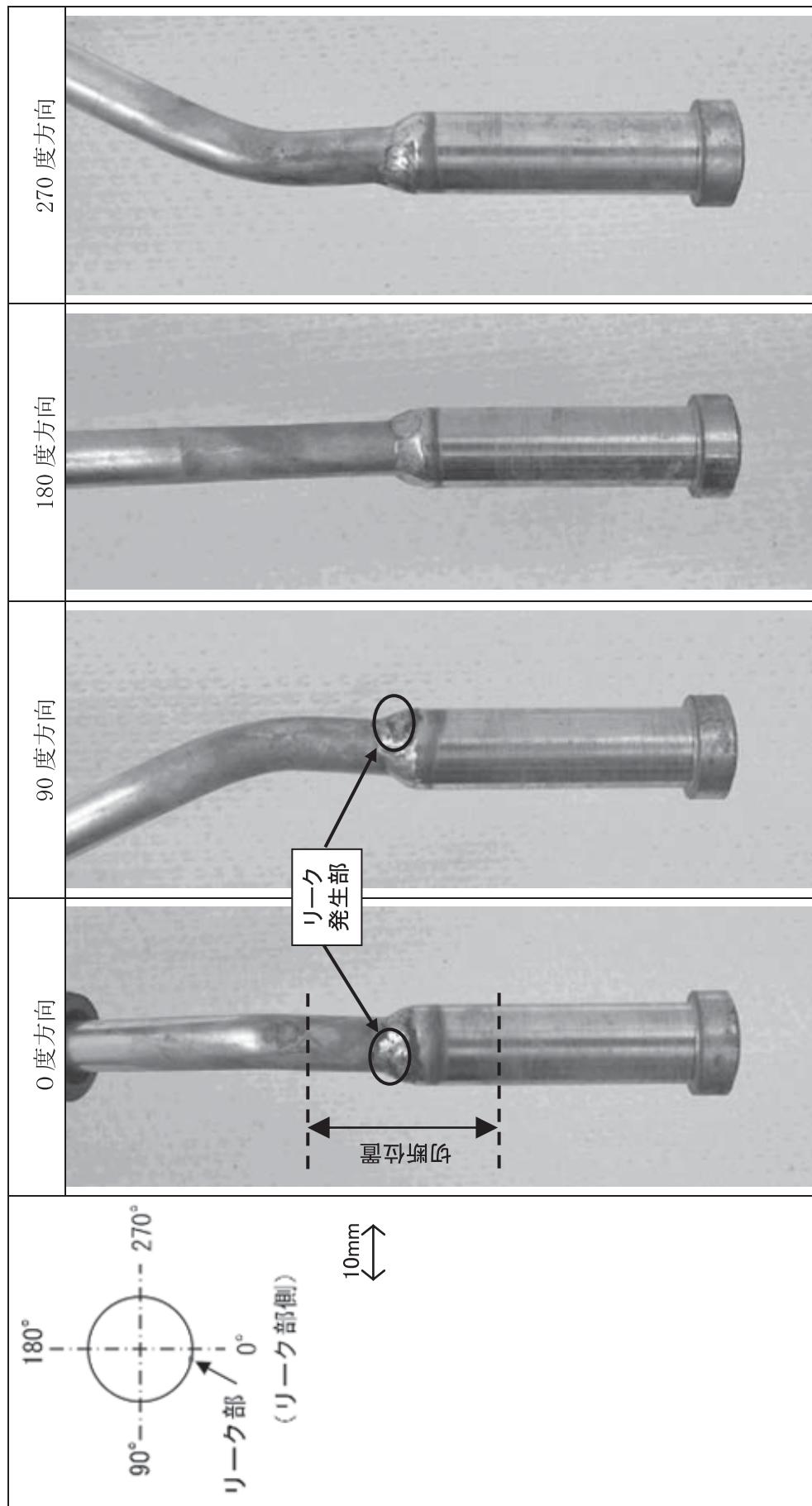


Fig. 2.3 配管の外観状況（リーケ発生部近傍）

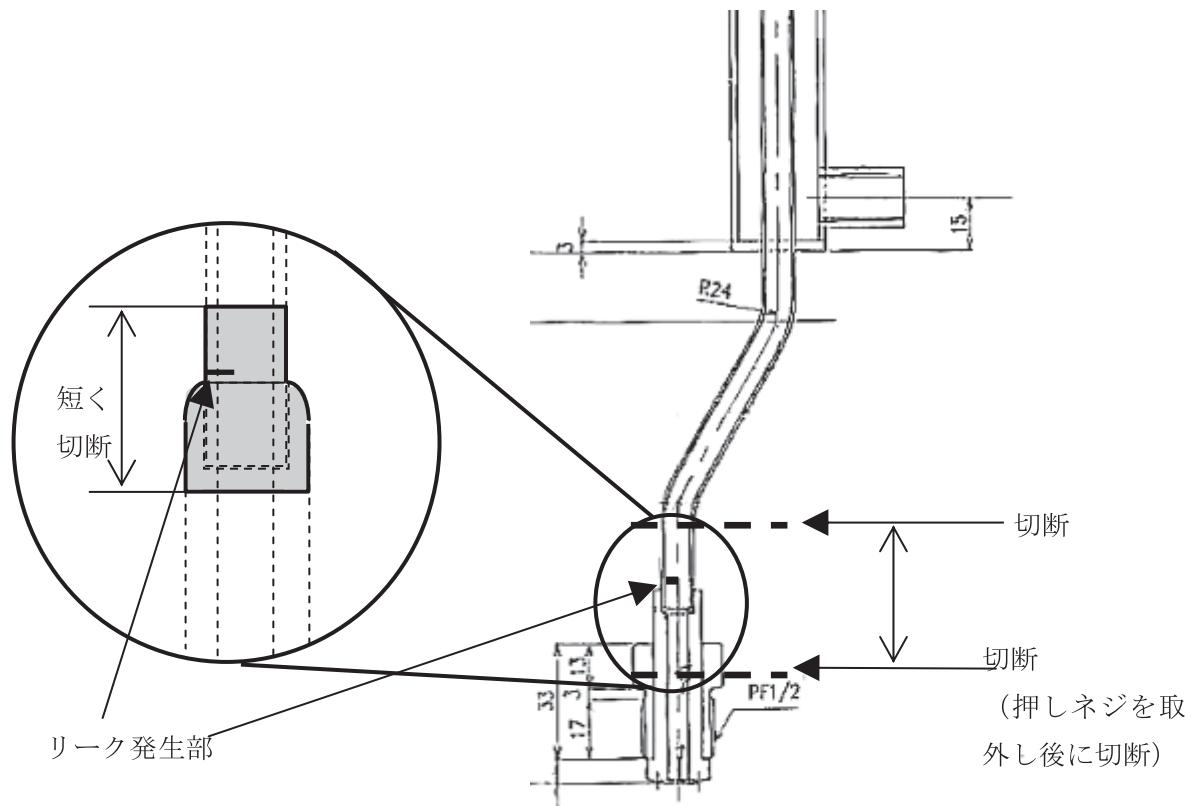


Fig. 2.4 配管試料切断（粗切断）図

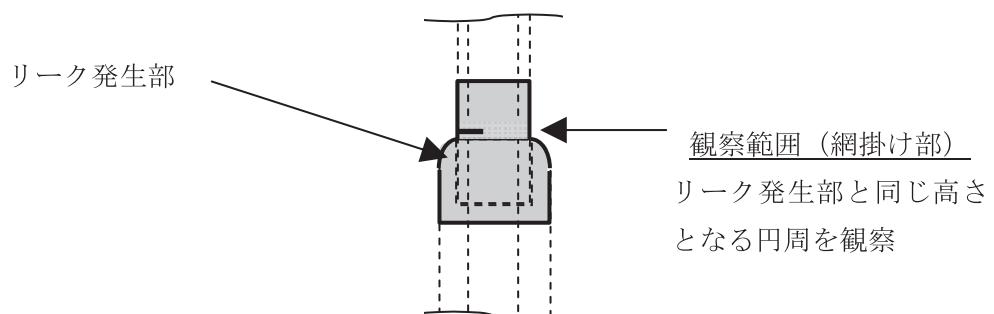


Fig. 2.5 外面観察位置図

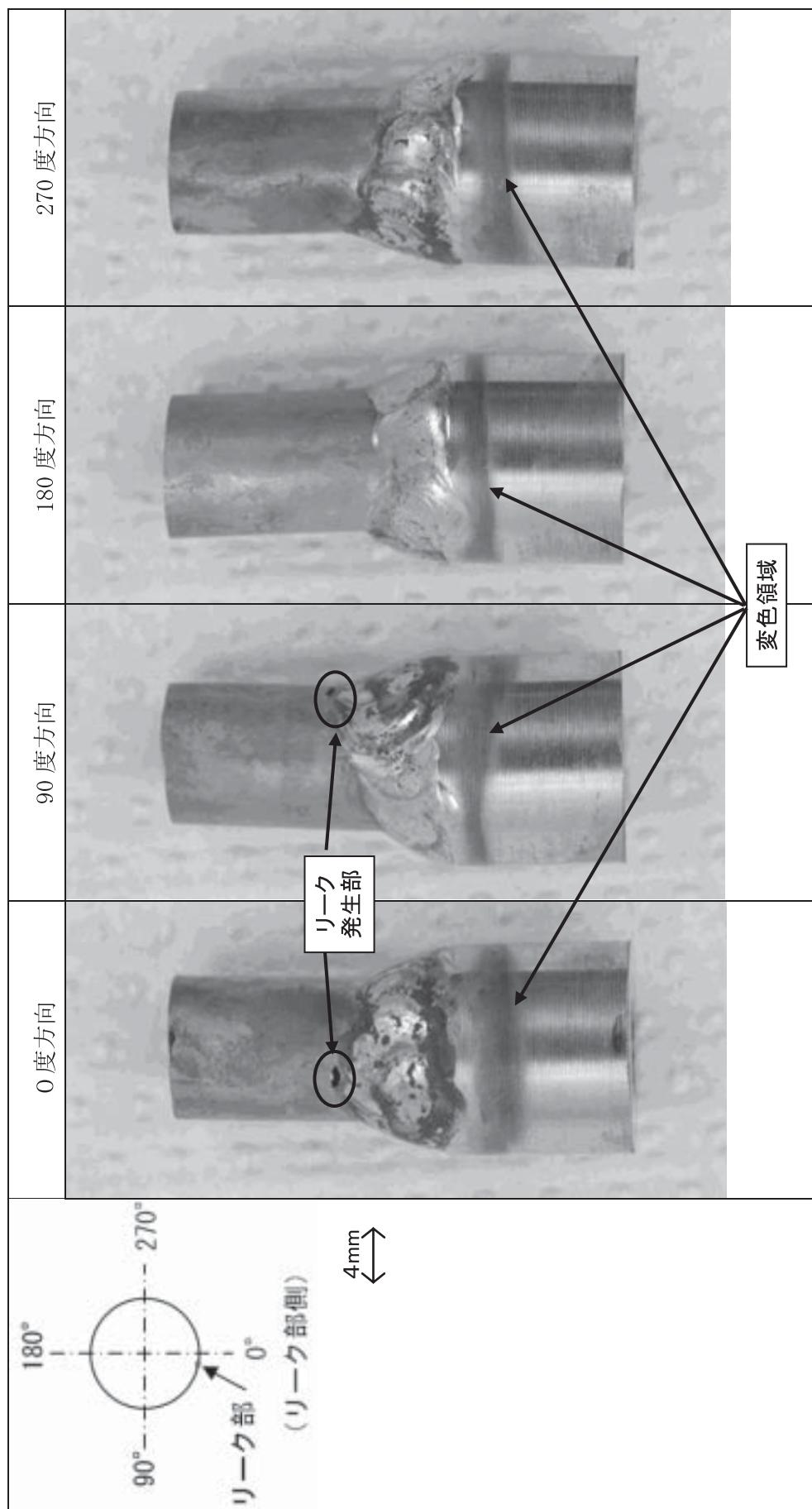


Fig. 2.6 配管切断後の光学顕微鏡写真（リーケ部位置円周）

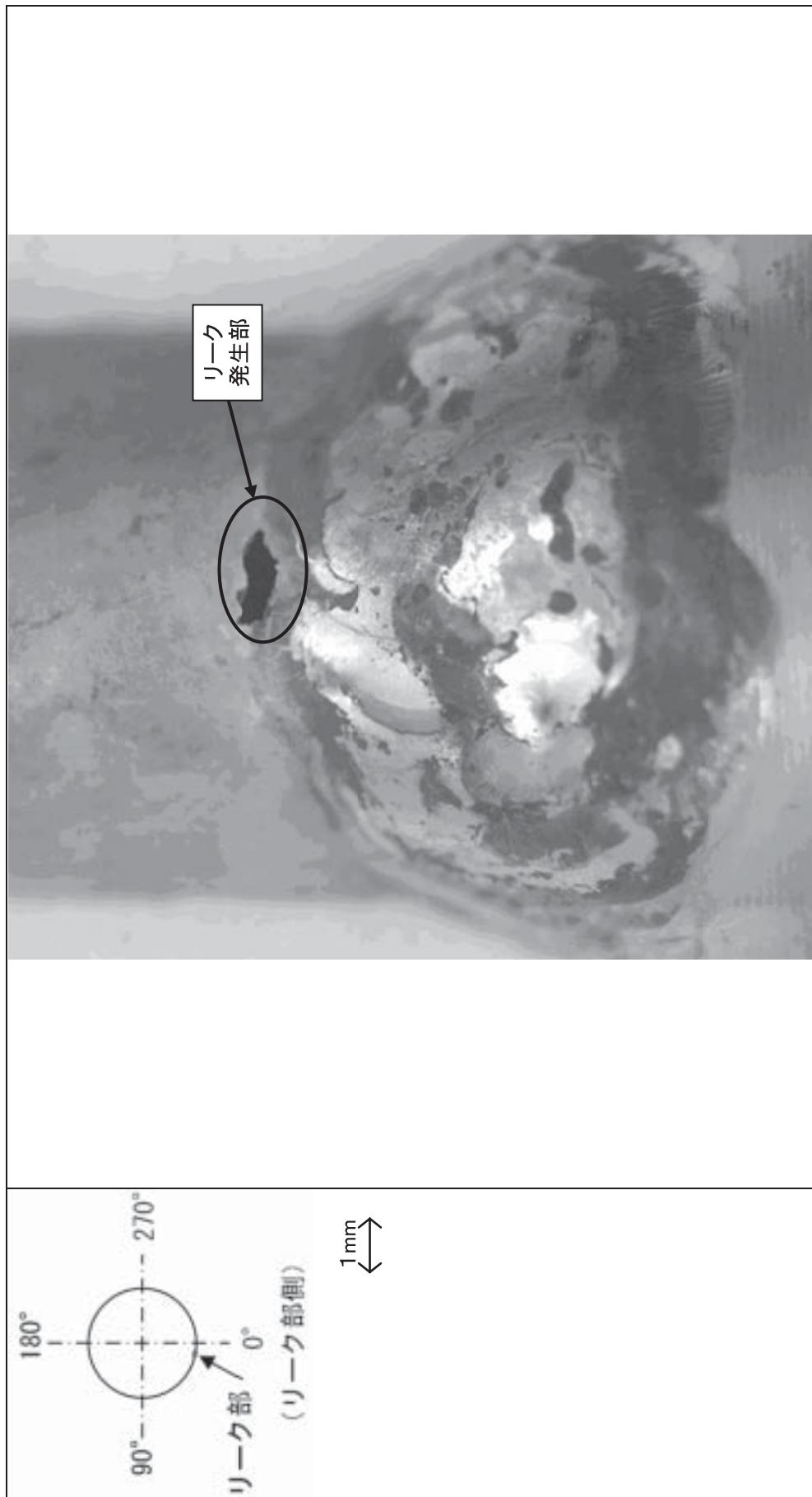


Fig. 2.7 配管切断後の光学顕微鏡写真（リーグ発生部近傍（写真中心方向：約10°））



Fig. 2.8 配管切断後の光学顕微鏡写真 (リーケ部の反対面 (写真中心方向 : 約 190°))

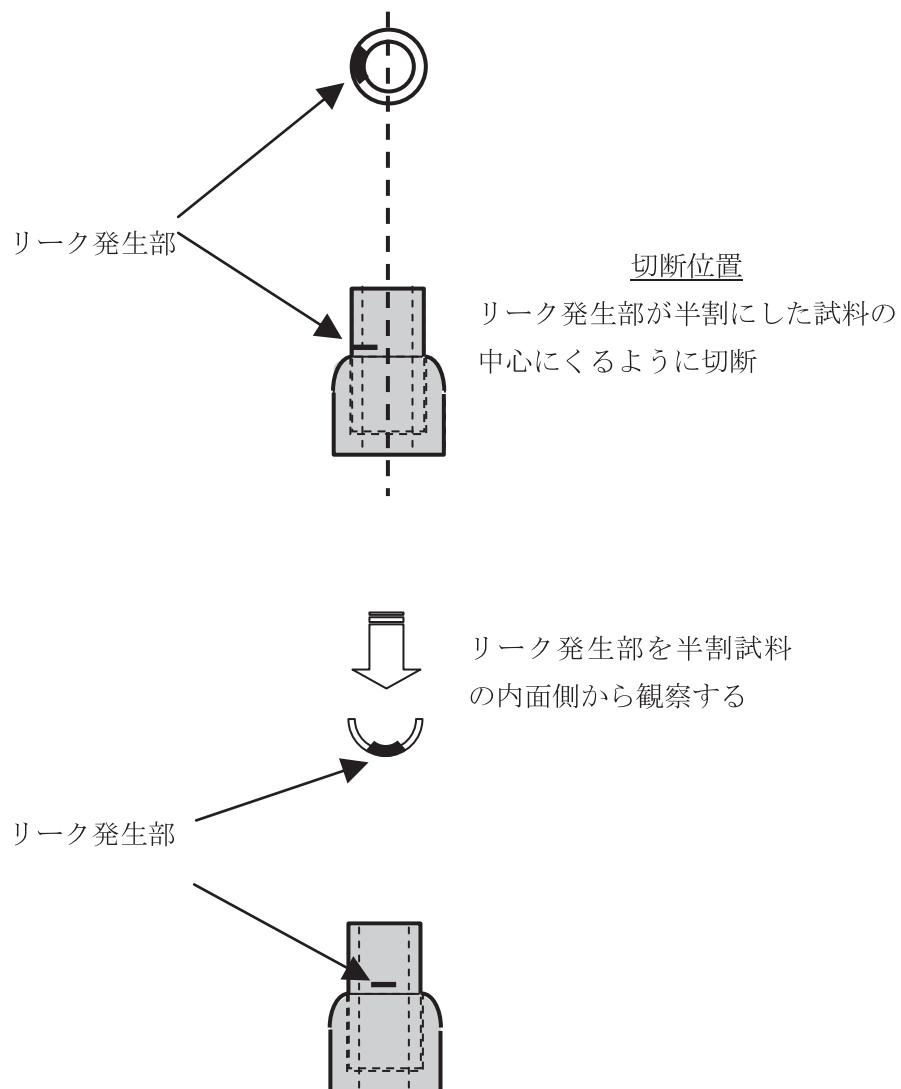


Fig. 2.9 配管切断図（内面観察用）

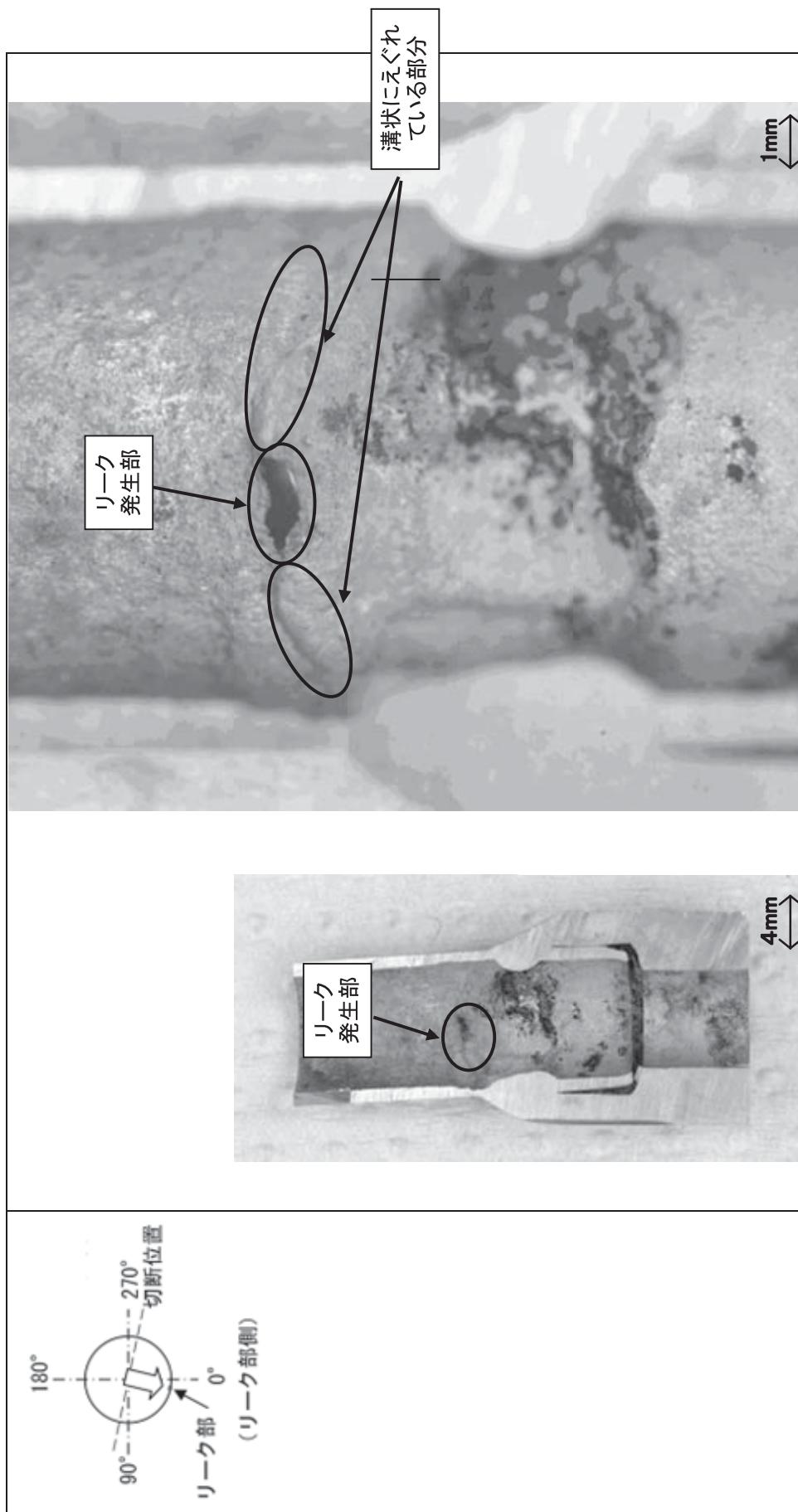


Fig. 2.10 配管切断後の光学顕微鏡写真 (リーケ発生部近傍内表面)

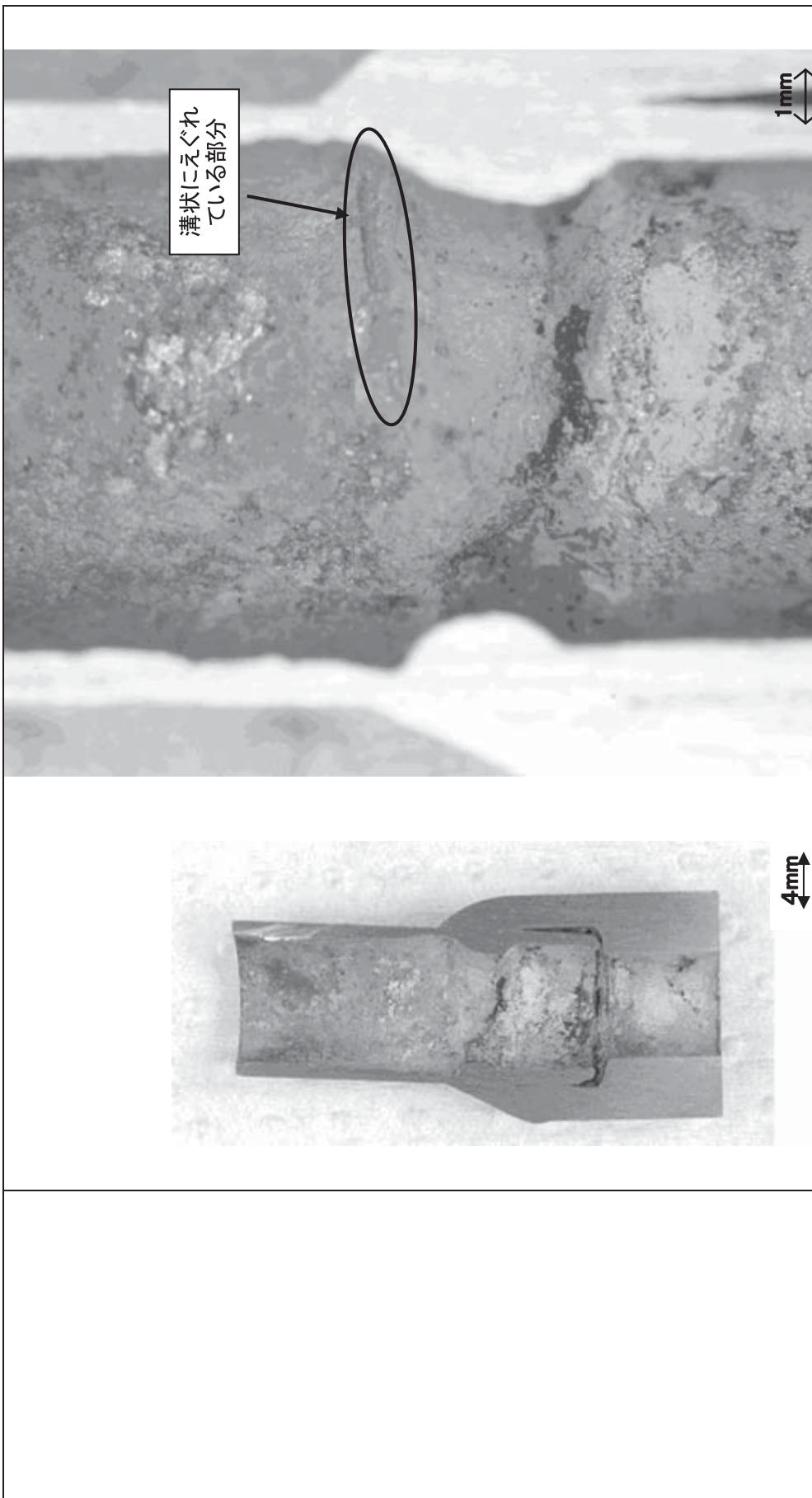


Fig. 2.11 配管切断後の光学顕微鏡写真（リーケ発生部近傍反対方向内表面）

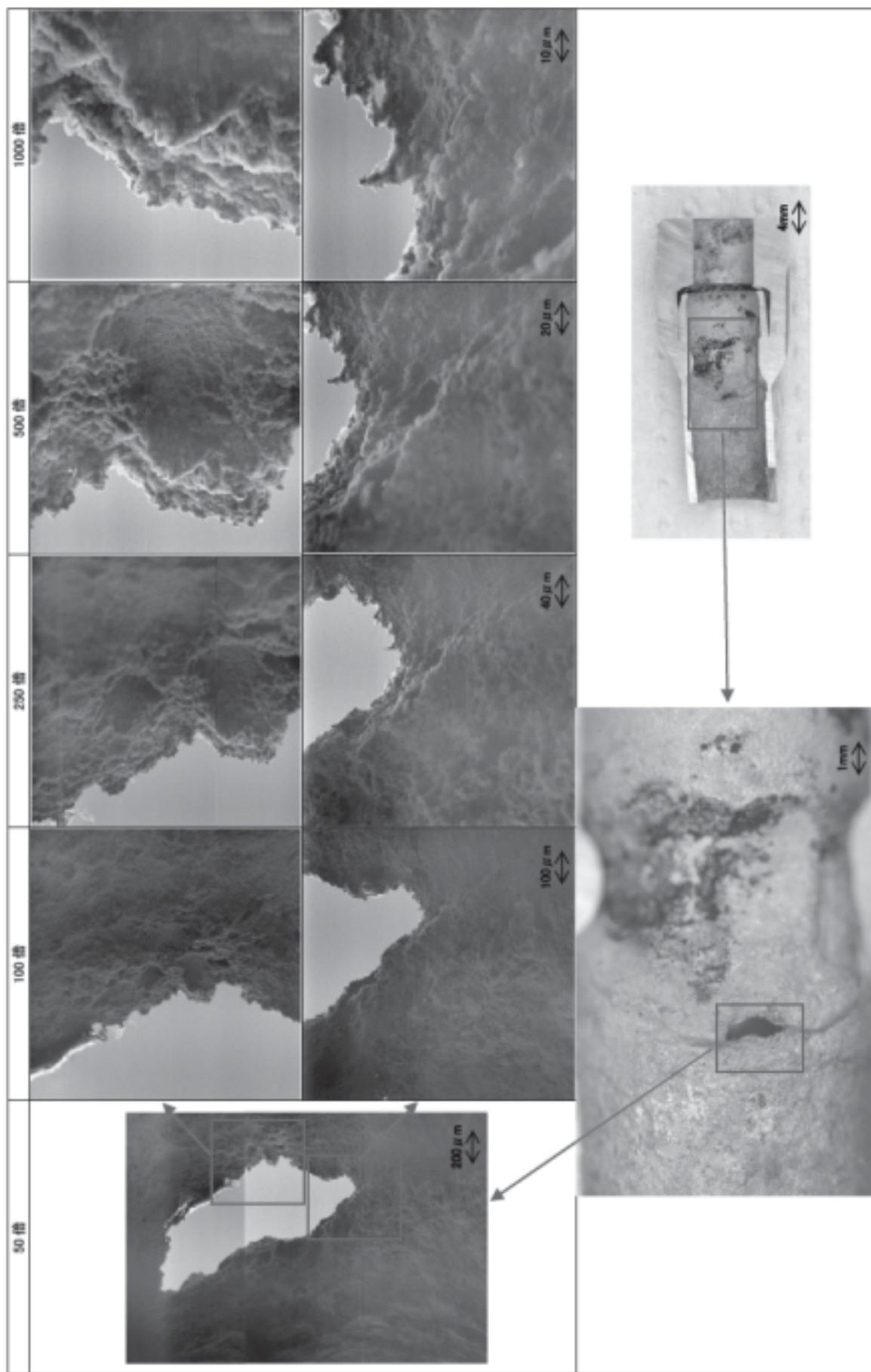
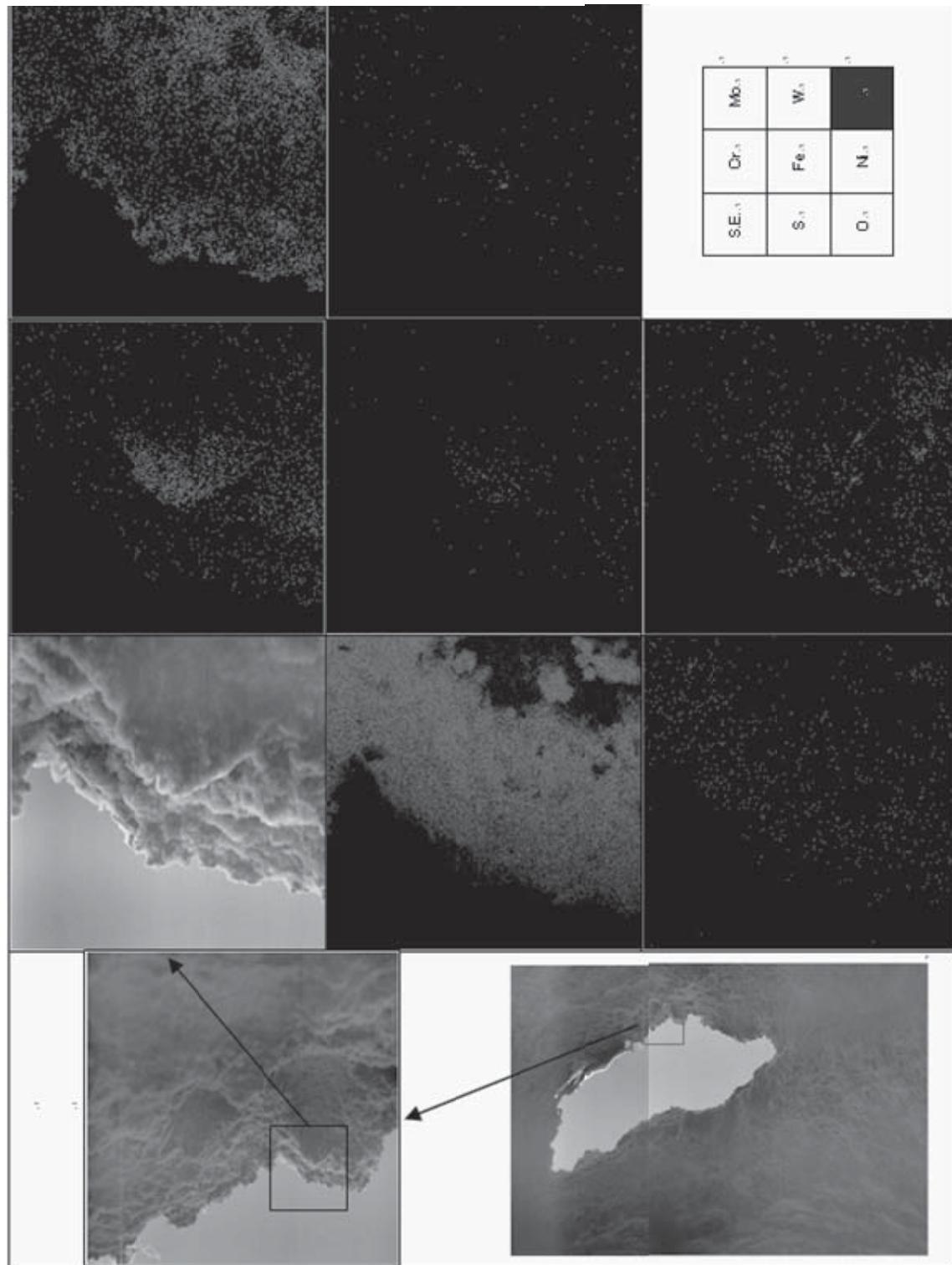


Fig. 2.12 配管のE PMA_2次電子像観察結果（リーケ発生部近傍内表面）



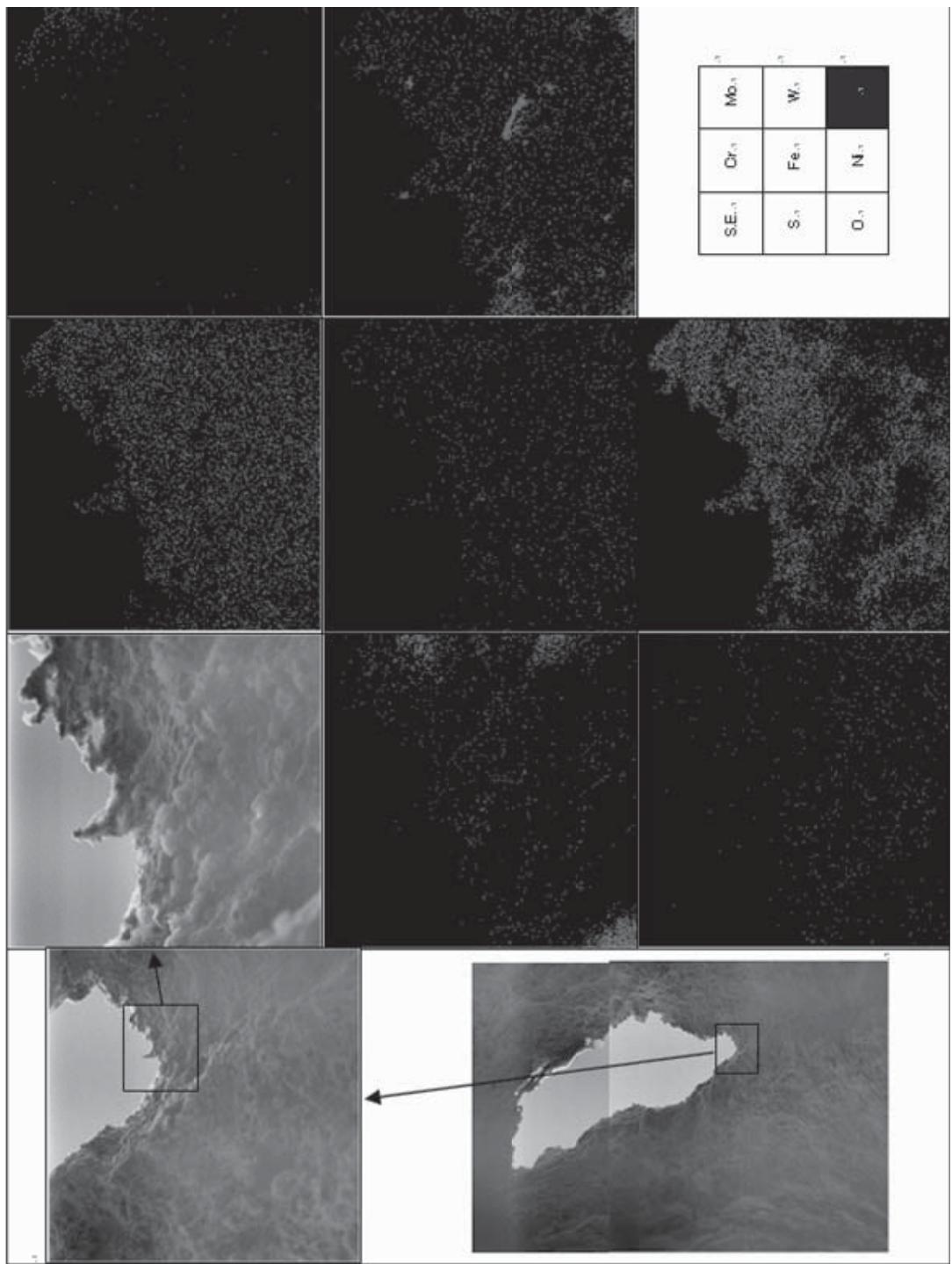


Fig. 2.14 配管試料のEPMA_X像測定結果(リーグ発生部近傍内表面: リーグ発生部端)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
立体角	立体度メートル	m^3
速度	速度メートル毎秒	m/s
加速度	度メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	メートル毎秒	m^{-1}
密度(質量密度)	密度キログラム毎立法メートル	kg/m^3
質量体積(比体積)	体積立法メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	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
(物質量)の濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率	(数の)1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{-24}	ヨクタ	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}	ゼット	z
10^{-1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表される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
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
压力	ニュートン	N	$\text{N} \cdot \text{m}^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
工率、放射	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フアード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジメанс	S	A/V
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	K
光束度	ルクス	lx	$\text{cd} \cdot \text{sr}^{(c)}$
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq	$1\text{m} \cdot \text{m}^{-2}$
吸収線量、質量エネルギー一分率	グレイ	Gy	$1\text{lm}/\text{m}^2$
線量当量、周辺線量当量	シーベルト	Sv	J/kg
方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量			J/kg

(a)ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b)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“1”は明示されない。

(c)測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d)この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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
粘度	パスカル秒	Pa · s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$\text{N} \cdot \text{m}$
表面張力	ニュートンメートル	N/m	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール毎キログラム	J/(kg · K)	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
質量エントロピー	毎ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m · K)	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol · K)	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
モル熱容量	ビン		
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	$\text{kg}^2 \cdot \text{s}^{-5}$
放射強度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
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)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1' = (1/60)^\circ = (\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1'' = (1/60)' = (\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1\text{L} = 1 \text{dm}^3 = 10^{-3} \text{m}^3$
トン	t	$1\text{t}=10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1\text{Np}=1$
ベル	B	$1\text{B}=(1/2)\ln 10(\text{Np})$

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1\text{eV}=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ J}$
統一原子質量単位	u	$1\text{u}=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1\text{ua}=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{ m}$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里每時=(1852/3600)m/s
アード	a	$1\text{a}=1 \text{dam}^2=10^{2.2} \text{m}^2$
ヘクタール	ha	$1\text{ha}=1 \text{hm}^2=10^4 \text{m}^2$
バル	bar	$1\text{bar}=0.1 \text{MPa}=100 \text{kPa}=1000 \text{hPa}=10^5 \text{ Pa}$
オングストローム	Å	$1\text{Å}=0.1 \text{nm}=10^{-10} \text{ m}$
バーン	b	$1\text{b}=100 \text{fm}^2=10^{-28} \text{ m}^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1\text{erg}=10^{-7} \text{ J}$
ダイニン	dyn	$1\text{dyn}=10^{-5} \text{ N}$
ボアズ	P	$1\text{P}=1 \text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2=0.1 \text{Pa} \cdot \text{s}$
ストークス	St	$1\text{St}=1 \text{cm}^2/\text{s}=10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$
ガウス	G	$1\text{G}=\pm 10^{-4} \text{T}$
エルステッド	Oe	$1\text{Oe}=\pm(1000/4\pi) \text{ A/m}$
マクスウェル	Mx	$1\text{Mx}=\pm 10^{-8} \text{ Wb}$
スチルブ	sb	$1\text{sb}=1 \text{cd}/\text{cm}^2=10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$
ホルト	ph	$1\text{ph}=10^4 \text{ lx}$
ガル	Gal	$1\text{Gal}=1 \text{cm}/\text{s}^2=10^{-2} \text{ m/s}^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1\text{Ci}=3.7 \times 10^10 \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1\text{R}=2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1\text{rad}=1 \text{cGy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1\text{rem}=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{ Sv}$
X線単位	X unit	$1\text{X unit}=1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1\gamma=1 \text{nT}=10^{-9} \text{ T}$
ジヤンスキー	Jy	$1\text{Jy}=10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フェルミ	fermi	$1\text{fermi}=1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット	Torr	$1\text{Torr}=200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
標準大気圧	atm	$1\text{atm}=(101325/760) \text{ Pa}$
カリヨーン	cal	$1\text{cal}=101 \text{ J}=101 \text{325 Pa}$
ミクロ	μ	$1\mu=1 \mu \text{m}=10^{-6} \text{ m}$

