

中性子照射下高温水中応力腐食割れ 試験用き裂進展・発生試験ユニットの技術開発 (1)

(受託研究)

Development of Crack Growth and Crack Initiation Test Units for Stress
Corrosion Cracking Examinations in High-Temperature Water Environments
under Neutron Irradiation (1)
(Contract Research)

出雲 寛互 知見 康弘 石田 卓也 川又 一夫
井上 修一 井手 広史 斎藤 隆 伊勢 英夫
三輪 幸夫 宇賀地 弘和 中野 純一 加治 芳行
塚田 隆 石塚 悦男

Hironobu IZUMO, Yasuhiro CHIMI, Takuya ISHIDA, Kazuo KAWAMATA
Shuichi INOUE, Hiroshi IDE, Takashi SAITO, Hideo ISE, Yukio MIWA
Hirokazu UGACHI, Junichi NAKANO, Yoshiyuki KAJI, Takashi TSUKADA
and Etsuo ISHITSUKA

大洗研究開発センター
照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center

April 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

中性子照射下高温水中応力腐食割れ試験用き裂進展・発生試験ユニットの技術開発 (1)
(受託研究)

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター
照射試験炉センター

出雲 寛互、知見 康弘⁺¹、石田 卓也^{※1}、川又 一夫、井上 修一、
井手 広史、斎藤 隆、伊勢 英夫⁺¹、三輪 幸夫⁺²、宇賀地 弘和⁺²、
中野 純一⁺²、加治 芳行⁺²、塚田 隆⁺²、石塚 悦男

(2009年2月10日受理)

軽水炉の炉内構造材料の照射誘起応力腐食割れ (IASCC) に関する健全性評価においては、主として照射後試験 (PIE) によるデータの拡充が進められている。しかし、実際の炉内での IASCC は、材料と高温高压水が同時に照射の影響を受け発生する現象である。このため、PIE で取得されたデータの妥当性を照射下試験データとの比較により確認する必要がある。

日本原子力研究開発機構では、従来から照射下 SCC き裂進展・発生試験に関する基本的な技術開発を進めてきた。照射下き裂進展試験において、ステンレス鋼に及ぼす低照射量領域の中性子照射の影響を適切に評価するためには、破壊力学的な有効性の観点から、板厚 0.5 インチのコンパクトテンション (CT) 試験片に対応できるき裂進展試験技術の開発が必要となる。そこで技術検討を行った結果、従来の単軸方式からテコ式に変更することによって、目標荷重 (約 7.6 kN) を 0.5T-CT 試験片に負荷できる見通しが得られた。また、き裂発生試験技術に関しては、リニア可変差動トランス (LVDT) を採用するユニット構造を検討するとともに、今後さらに技術検討を進めるべき項目を抽出した。

本報告書は、経済産業省 原子力安全・保安院の受託研究「軽水炉燃材料詳細健全性調査」の成果の一部である。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

+1 安全研究センター 軽水炉長期化対応研究ユニット

+2 原子力基礎工学研究部門 燃料・材料工学ユニット

※1 出向職員

Development of Crack Growth and Crack Initiation Test Units for Stress Corrosion Cracking Examinations in
High-Temperature Water Environments under Neutron Irradiation (1)
(Contract Research)

Hironobu IZUMO, Yasuhiro CHIMI⁺¹, Takuya ISHIDA^{※1}, Kazuo KAWAMATA, Shuichi INOUE,
Hiroshi IDE, Takashi SAITO, Hideo ISE⁺¹, Yukio MIWA⁺², Hirokazu UGACHI⁺²,
Junichi NAKANO⁺², Yoshiyuki KAJI⁺², Takashi TSUKADA⁺² and Etsuo ISHITSUKA

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 10, 2009)

To evaluate integrity of irradiation-assisted stress corrosion cracking (IASCC) on in-core structural materials used in light water reactors (LWRs), useful knowledge regarding IASCC has been obtained mainly by post-irradiation examinations (PIEs). In the core of commercial LWRs, however, the actual IASCC occurs under the effects of irradiation on both materials and high-temperature water environment. Therefore, it is necessary to confirm the suitability of the knowledge by PIE with comparison to IASCC behaviors during in-core SCC tests.

Fundamental techniques for in-core crack growth and crack initiation tests have been developed already at the Japan Materials Testing Reactor (JMTR) of the Japan Atomic Energy Agency (JAEA). For the in-core crack growth test technique, to evaluate the effects of neutron irradiation on stainless steels irradiated to low neutron fluences, it is indispensable to develop new loading technique which is applicable to compact tension (CT) specimens with thickness of 0.5 inch (0.5T), from the viewpoint of validity based on the fracture mechanics. Based on the present technical investigation for the in-core loading technique, it is expected that a target load of 7.6 kN approximately can apply to a 0.5T-CT specimen by adopting a loading unit of a lever type instead of the previous uni-axial tension type. For the in-core crack initiation test technique, moreover, construction of a loading unit adopting linear variable differential transformers (LVDTs) has been investigated and technical issues have examined.

Present study is entrusted from the Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) of the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) of Japan.

+1 LWR Long-Term Reliability Research Unit, Nuclear Safety Research Center

+2 Division of Fuels and Materials Engineering, Nuclear Science and Engineering Directorate

※1 Research Staff on Loan

Keywords: Material Irradiation, IASCC, SCC, Crack Growth, Crack Initiation, JMTR, In-core Test, Post-irradiation Examination, Stainless Steel, High-temperature Water

This is a blank page

目次

| | |
|----------------|---|
| 1. 序論 | 1 |
| 2. 技術開発課題 | 2 |
| 2.1 き裂進展試験ユニット | 2 |
| 2.2 き裂発生試験ユニット | 2 |
| 3. 技術検討結果 | 2 |
| 3.1 き裂進展試験ユニット | 2 |
| 3.1.1 荷重負荷機構 | 2 |
| 3.1.2 き裂長さ測定技術 | 5 |
| 3.2 き裂発生試験ユニット | 6 |
| 4. 結論 | 7 |
| 謝辞 | 8 |
| 参考文献 | 8 |

Contents

| | |
|--|---|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Development items | 2 |
| 2.1 Crack growth unit | 2 |
| 2.2 Crack initiation unit | 2 |
| 3. Results of technological review | 2 |
| 3.1 Crack growth unit | 2 |
| 3.1.1 Loading mechanism | 2 |
| 3.1.2 Measurement technology of crack length | 5 |
| 3.2 Crack initiation unit | 6 |
| 4. Conclusions | 7 |
| Acknowledgements | 8 |
| References | 8 |

This is a blank page

1. 序 論

我が国における電力供給においては、今後も原子力発電を必要とするため、長期に渡る軽水炉の健全性が求められる。我が国の原子力の推進については、原子力政策大綱¹⁾、原子力立国計画²⁾の政策などがあり、軽水炉の高経年化対応についての研究開発が進められているところである。一方、原子炉内の環境下における炉材料の長期的な健全性に対応した照射試験として、特殊法人日本原子力研究所（現 独立行政法人日本原子力研究開発機構）と電気事業者が共同で照射下 IASCC（IASCC：Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking）試験に関する技術開発研究（平成 12 年～17 年度実施）^{3,4)}を行っている。本研究では、JMTR 照射キャプセル内で試験片に引張荷重を負荷し、高精度な荷重制御及び計測が要求される照射下 SCC き裂進展及び発生試験ユニットの開発を行い、試験技術に関して以下の課題を抽出している。

(1) き裂進展試験片の大型化に対応した荷重負荷機構の開発

き裂進展試験において、試験片寸法が小さい場合には、破壊力学的に有効な応力拡大係数（K 値）の範囲が小さくなる。K 値の有効範囲は、試験片寸法だけでなく材料の降伏応力にも依存するため、特に中性子照射による降伏応力の上昇が少ない低照射量領域では、試験片の大型化が不可欠となる⁵⁾。JMTR の再稼働後には、SUS316 における IASCC 感受性発現しきい照射量以下の低照射量領域（ $<1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$ ））においても照射下 SCC き裂進展試験を計画しており、試験片の大型化に対応した照射下 SCC き裂進展試験ユニットの開発が必要となる。これまでに、試験片寸法と K 値有効範囲に関する検討を行い、低照射量領域でも 0.5T-CT（厚さ 12.7 mm）試験片を用いることで、K 値が $20 \sim 30 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 程度となる試験が実施できることを明らかにした⁵⁾。従来ユニットでは、荷重負荷機構及びキャプセルの構造的な制限から 0.4T-CT（厚さ 5.6 mm）までの試験片を装荷することしかできず、0.5T-CT（厚さ 12.7 mm）試験片による試験への対応は困難であり、荷重負荷機構の開発を新たに進める必要がある。

(2) き裂長さ測定技術の高度化

低照射量領域では、き裂進展速度が低く長時間の試験となる可能性が高いことから、現実的な試験期間でき裂進展速度を評価するためには、き裂長さを高精度に測定する技術が必要となる。従来ユニットでは電位差法を採用していたが、試験片及び計測線の絶縁性、高温水中での MI ケーブル先端部の気密処理、キャプセル内での MI ケーブルの引回し等に起因するノイズの影響等により、測定精度に限界があった。そこで、これらを改善することによりノイズを低減させ、照射下試験での電位差法の測定精度の向上を図る必要がある。また、新たな荷重負荷機構の採用に伴い、ユニット内部の試験片及び計測線等の配置も変更する必要がある。

(3) き裂発生試験における照射下試験要素技術の高度化

従来の照射下 SCC き裂発生試験ユニットでは、試験片の破断によって収縮するベローズ内に取付けた端子と MI ケーブルが接触することにより破断を検出していた。しかし、この方式では、計測回路がオープンとなりノイズ等の影響が大きく、破断の有無の判断が困難な場合があった。このため、き裂発生に伴う試験片の変形の検出が可能な方法を検討する必要がある。

これら技術的課題に対応したき裂進展・発生試験ユニットを新たに製作するため、従来ユニットの開発過程及び実際の照射下試験で得られた知見などを踏まえ、試験ユニットの開発を進めている。本報告では、これらの技術開発課題に関して、平成 19 年度に実施した検討状況について述べる。なお、本研究は、経済産業省 原子力安全・保安院の受託研究「軽水炉燃材料詳細健全性調査」の一環として実施したものである。

2. 技術開発課題

2.1 き裂進展試験ユニット

照射下き裂進展試験ユニットの従来試験からの開発課題及び平成 19 年度の目標を図 2.1 に示す。照射下き裂進展試験ユニットの荷重負荷機構の開発では、以下の項目についてテコ式き裂進展試験ユニットの技術検討を行い、その成立性を確認することを目標とした。

- ・ユニットの全体構造及び材料
- ・ユニットの構造解析
- ・ホットラボでの組立作業性

き裂長さ測定技術の高度化では、以下の項目について従来ユニットからの設計変更が及ぼす影響を検討し、測定精度を向上させるための測定方法の改善策を提案することを目標とした。

- ・絶縁方法の技術
- ・計測線の取付け方法
- ・キャプセル内での MI ケーブルの引き回し

2.2 き裂発生試験ユニット

照射下き裂発生ユニットの従来試験からの開発課題及び平成 19 年度の目標を図 2.2 に示す。照射下き裂発生試験ユニットのき裂発生時における試験片の破断・変形・微小き裂検出等を精度よく行うため、リニア可変差動トランス (LVDT) を用いた試験片の破断検出及び変形測定のための技術検討を行った。

3. 技術検討結果

3.1 き裂進展試験ユニット

3.1.1 荷重負荷機構

(1) ユニットの全体構造及び材料

図 3.1-1 に従来ユニット及び従来ユニットで用いられていた 0.4T-CT (厚さ 5.6 mm) 試験片を示す。荷重の負荷方式は、金属ベローズ、試験片及び固定端が直線上に配置されている単軸引張である。試験片への荷重は、キャプセル内の水圧 (高圧) とベローズ内のガス圧 (低圧) との差圧によりベローズが縮むことで負荷するものである。キャプセル内径によりベローズの有効断面積が制限されるため、最大荷重は約 3.2

kN である。一方、試験片が 0.5T-CT (厚さ 12.7 mm) と大型となり、必要とされる最大荷重が約 7.6 kN となることから、従来の単軸引張の試験ユニットは荷重容量不足のため採用できない。また、従来のユニットのベローズを大型化にすることで最大荷重を大きくすることができるが、キャプセル内の仕切管内径 ($\phi 44$ mm) の制限から、0.5T-CT (厚さ 12.7 mm) 試験片を装荷することは困難である。そこで、負荷荷重を大きくするために新たにテコを用いて荷重を増幅する方式 (以下、「テコ式」という。) を検討した。

テコ式に関しては、ハルデン炉で実績がある⁹⁾。その特徴は、支点を挟んでテコの力点と作用点とが交差している形 (以下、「はさみ式」という。) を取っている点で、力点にある金属ベローズ内をガスで加圧しベローズが伸びることで作用点にある試験片に引張荷重を負荷している。これまでに約 0.3T-CT (厚さ 5 mm) 相当の小型試験片での実績がある。ここで、この方式を直接導入して試験片を大型化すると、ベローズでガス圧を高めて大きな推力を発生させる必要があり、トラブル時にベローズの差圧が過大となったり、あるいはベローズの伸びが大きくなり破損する可能性がある。例えば、何らかの原因でキャプセル内の水圧が低下した場合や、試験片のき裂が大きく進んで変形した場合、ユニットが破損して機能しなくなる可能性がある。一方、従来ユニットのようなベローズ減圧方式では、トラブル時には荷重を負荷できなくなったり、あるいはベローズが縮みきったところで変位が止まるため、より安全性が高まると考えられる。さらに、一般に市販されているベローズの使用方法は、縮む方向に利用されるのが一般的であり、伸びる方向に利用される場合の保証が得られていない。従って、ベローズ加圧方式を必要とする「はさみ式」は、安全上の観点も含めて、検討の優先度を低くすることとした。

上記の荷重負荷機構の特徴について、表 3.1-1 に比較表としてまとめて示す。表には、平成 19 年度に検討したテコ式ユニット (新方式 (1)、(2)) も示してある。新方式 (1)、(2) は、いずれもベローズ減圧方式を採用し、「はさみ式」のようにテコが交差しない構造となっており、市販のベローズで対応可能である。新方式 (2) では、新方式 (1) の試験片の方向を逆向きにし、試験片リガメント側をユニットと反対側に配置することにより、作用点 (荷重ピン) と支点との距離が短くでき、テコ比を大きくしてもユニット長を短くすることが可能となる。また、試験片の周りに水流を遮へいする構造物がほとんどないために実機を模擬しやすいこと、キャプセル内での計測線 (MI ケーブル) の引回しの自由度が高いこと等の特長がある。これらのことから、試験片の大型化に対応した照射下 SCC き裂進展試験ユニットとして、新方式 (2) の成立性について優先的に検討を進めることとした。但し、新方式 (2) では、ハルデン方式や新方式 (1) とは異なり、電位差測定用の端子を試験片リガメント側から接続する必要があるため、感度良くき裂長さの変化を測定するためには、端子を極力試験片の側面からき裂部分を挟むように取り付けるなど、端子位置や形状の最適化の検討が必要となる。

テコ式ユニットにおいて、ベローズの寸法は、キャプセル内仕切管内径 ($\phi 44$ mm) の制限から、外径 $\phi 27$ mm 以下、全長約 30 mm 以下 (端栓含む) のものが必要である。このため、使用圧力、発生荷重も考慮し、図 3.1-2 に示すような外径 $\phi 25$ mm \times 内径 $\phi 15$ mm のインコネル 718 製、2 重溶接ベローズを選定した。ベローズ単体での内外差圧 5 MPa での推力は、図 3.1-3 に示すように約 1.5 kN である。必要荷重の 7.6 kN に対し、安全側に最大荷重を 8.4 kN と設定し、テコ比の異なる以下の 2 種類の構造について検討した。

1) 推力をテコで3倍とする構造 {テコ比3、新方式(1)}

キャプセル内寸法、使用圧力、発生荷重から1個のベローズでは対応できないため、ベローズ2個を使用する構造とした。本方式のユニット構造の概念図を図3.1-4に示す。

2) 推力をテコで6倍とする構造 {テコ比6、新方式(2)}

テコ比が6でユニットが長くなる可能性があるため、試験片の取付け方向を今までと逆（切りかき部をベローズ側）とし、作用点と支点との距離を短くする構造とした。本方式のユニット構造の概念図を図3.1-5に示す。

レバー（テコ）、荷重ピン及び支点ピンの材料に関しては、支点への応力集中を考慮し、ステンレス鋼のうち降伏応力の大きいSUS630を選定した。また、図3.1-5に示す絶縁スリーブの材料に関しては、き裂長さを直流電位差法により測定する場合、試験片とユニット各部を絶縁しなければならないこと、また、高温環境下で最大8.4 kNの圧縮力が加わる荷重ピンも絶縁する必要があることを考慮して、機械的及び熱的特性が優れているイットリア添加部分安定化ジルコニア（ Y_2O_3 -PSZ）を選定した。

(2) ユニットの構造解析

有限要素法を用いた構造解析により、形状及び寸法の最適化を行った。解析にはANSYS（ANSYS Workbench 11.0SP1）コードを用い、線形応力解析を実施した。

1) 解析条件等

解析条件は次のとおりである。

- ・物性値 : 金属部はステンレス鋼、絶縁材はイットリア添加安定化ジルコニアの物性値を使用
- ・温度 : 325°C
- ・荷重 : ベローズ端栓部に1.5 kNを負荷
- ・その他 : キャプセル内圧によるユニット各部への外圧は無視
- ・解析モデル : 新方式(1)（テコ比3、ベローズ2個使用）を図3.1-6に、新方式(2)（テコ比6、試験片逆向き）を図3.1-7に示す。また、参考として新方式(2)における解析用のメッシュを図3.1-8に示す。
- ・応力の評価 : ステンレス鋼についてはミーゼスの相当応力、セラミック材については最大主応力を評価した。

2) 解析結果

新方式(1)の相当応力及び変位の解析結果を図3.1-9及び図3.1-10に示す。また、新方式(2)の相当応力及び変位の解析結果を図3.1-11及び図3.1-12に示す。新方式(1)及び(2)とも、相当応力の最大値は試験片側レバー部または荷重ピン部に発生する。作用点が力点側よりも力は大きいので、この近くに最大応力が発生する。最大変位は力点（ベローズ）側のレバー端部に発生する。

ステンレス部の相当応力の最大値は、新方式(1)及び(2)ともに700 MPa程度であり、SUS630では弾性領域にある。また、最大変位は、新方式(1)が約2.6 mm、新方式(2)が約2.3 mmである。レバー部にこの程度の変位が発生しても、レバー部が対向するレバー部やキャプセル内壁等に当たって荷重が負荷できなくなることはない。

以上の解析結果から、0.5T-CT（厚さ12.7 mm）試験片に目標荷重（約7.6 kN）が負荷できる見通しを得た。

(3) ホットラボでの組立作業性

試験ユニットが装荷されるキャプセルの組立てにはホットラボなどでの遠隔操作が必要であるため、照射済試験片の装荷方法及び必要な治具を検討した。試験片荷重ピンには大きな応力が発生することから、図3.1-13に示すように試験片荷重ピンは、レバーに対して横から差し込む構造にする必要がある。このため、レバーの試験片取付け部の狭い空間に試験片を取り付けてから、ウイング（端子ピン）または電位差用MIケーブルを取付けることになる。この方法はホットラボなどでのマニピュレータ作業上、多くの困難を伴う作業になることが予測されるため、絶縁スリーブを試験片に仮固定しておく治具及び試験片をレバー内で保持しておく治具を製作する必要があることが明らかとなった。これらの治具に関しては、今後、試作する試験ユニットに合わせて設計・製作し、マニピュレータ作業などにより、作業性等を確認する予定である。

3.1.2 き裂長さ測定技術

(1) 絶縁方法の技術

試験片の絶縁に関しては、従来ユニットでは試験片と荷重ピンとの間に酸化処理を施したジルカロイ-2（Zry-2）を挟むことで絶縁を保つようにしたが、絶縁酸化皮膜が破損する等の問題が生じた。このため、試験片と荷重ピンとの間に絶縁スリーブを挿入し、前に図3.1-5で示したように絶縁する構造とした。絶縁スリーブ材として、イットリア添加部分安定化ジルコニア（ Y_2O_3 -PSZ）を用い、試験片とレバーとの間の絶縁ができる様に絶縁スリーブに「ツバ」を設ける構造とした。

MIケーブル同士の絶縁に関しては、従来は酸化処理したZry-2カラーを各MIケーブルに取り付けて絶縁していたが、施工時にワイヤ等で固定しなければならなかった。このため、今後は、MIケーブル製作時にZry-2パイプを被せ、酸化処理することによって絶縁する方法も検討する予定である。

(2) 計測線の取付け方法

試験片への計測線（MIケーブル）の取付けに関しては、従来、MIケーブルの芯線とシースを溶接し、シースにキャップをかぶせてウイングに溶接していた。今後は、ノイズを低減させるために芯線とシースを絶

縁した状態で接続することを目的として、図3.1-14の端末処理方法を検討する予定である。MIケーブルの端末は、中空端子ピンにMIケーブルを取り付け、MIケーブルのシースと中空端子ピン間をジルコニアで絶縁する構造となっている。

試験片と計測線の取付けに関しては、マニピュレータによる遠隔操作での作業性を考慮して、図3.1-15～図3.1-19に示す方法を考案した。試験片及び端子ピンの概念図及び試験片への端子ピンの取付け例を図3.1-15及び図3.1-16に、加工を施した試験片及び端子ピンのイメージを図3.1-17及び図3.1-18に示す。最終的にユニットに試験片及び端子ピンを取り付けたイメージを図3.1-19に示す。

(3) キャプセル内でのMIケーブルの引き回し

従来ユニット、新方式(1)及び新方式(2)のキャプセル内ユニット配置図を図3.1-20、図3.1-21、及び図3.1-22に示す。また、従来ユニット及び新方式(2)に関して、MIケーブル引き回しの模式図を図3.1-23及び図3.1-24に示す。

従来のキャプセルに関しては、下部ユニットのMIケーブルが上部ユニットより長く、かつ中性子による照射の影響が大きかった。このため、従来のき裂進展試験では、下部ユニット側の方のノイズが大きくなる傾向があった。そこで、新方式では、MIケーブルを極力短く出来るように引き回しすることとした。特に、新方式(2)の場合は、試験片周りのスペースが確保できることから、MIケーブルをバランスよく、かつ最短に配置できることが明らかとなった。

3.2 き裂発生試験ユニット

従来型き裂発生試験ユニットの概略図を図3.2-1に示す。試験片の破断は、それによって収縮するベローズ内に取付けた端子とMIケーブルが接触することによる電気抵抗の変化から検出していた。しかし、この接点方式では、未破断の状態でも計測回路がオープンとなることからノイズが入りやすいこと、破断時に接点が接触した際も接触不良等によってノイズが入りやすいこと等から、破断の判別が困難な場合が多かった。このため、試験片が破断していない状態でのノイズを軽減し、より高精度にき裂発生を検出する方法として、リニア可変差動トランス(LVDT)方式を選定した。LVDT一体型ベローズとこれを用いたき裂発生ユニットを図3.2-2に示す。

LVDT方式のメリットは、破断検出におけるノイズ低減化の他に、試験片の変形(伸び)をリアルタイムで計測できることである。今後、測定精度向上のため、コイルの巻数、計測時の交流周波数や電流値等の最適化を検討する予定である。但し、LVDT方式の場合、計測線が1ユニット当たり6本増えること、LVDTをベローズに連結するためにユニットが長くなる等のデメリットもある。これに伴って、1キャプセルに組み込めるユニット数が減少する可能性があるため、LVDTユニットの短尺化等も併せて検討が必要である。また、計測線(コイル線材)にMIケーブルを使用する際は、ユニット長さに影響するため、セラミック被覆導線の使用も考慮する必要がある。なお、上記の技術検討は、き裂発生試験に使用する試験片は従来と同一のUCL試験片を想定した場合である。

4. 結 論

照射下き裂進展試験ユニット及びき裂発生試験ユニットに関する技術検討を行い、以下の結果が得られた。

(1) き裂進展試験ユニット

- ・ テコ式荷重負荷機構の採用により、0.5T-CT（厚さ 12.7 mm）試験片に目標荷重（約 7.6 kN）が負荷で
きる見通しを得た。
- ・ テコ比を6倍とする新方式(2)については、試験片周りの空間が十分とれることから、冷却水流量が十
分確保できること、計測線を最短で配線できるためにノイズを低減できることなど、多くのメリッ
トがあることが明らかとなった。
- ・ 試験片への計測線の取り付けに関しては、ホットラボでの作業性を考慮し、リガメント側に配線済み
の端子ピンを挿入する方式を提案した。
- ・ 計測時のノイズ低減に関しては、中空端子ピンを採用してMI ケーブルを絶縁する方法を提案した。

(2) き裂発生試験ユニット

試験片の破断・変形・微小き裂検出等を精度よく行える方法として、リニア可変差動トランス（LVDT）を
採用するユニット構造を検討し、今後さらに技術検討を進めるべき項目を抽出した。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、照射試験炉センター 河村 弘センター長 石原正博副センター長から有意義なご助言、ご指導を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 原子力委員会、「原子力政策大綱」、平成 17 年 10 月。
- 2) JMTR 利用検討委員会（委員長：宅間 正夫）、「我が国における材料試験用原子炉の役割と JMTR のあり方等に関する検討報告書」、平成 18 年 3 月。
- 3) 井手広史、松井義典、川又一夫、田口剛俊、金澤賢治、小沼勇一、渡邊浩之、井上修一、出雲寛互、石田卓也、斎藤 隆、加治芳行、宇賀地弘和、塚田 隆、石塚悦男、河村 弘：“ IASCC 照射試験に係るキャプセルの製作 (1) -き裂進展試験用キャプセル-”，JAEA- Technology 2008-011 (2008)。
- 4) 井手広史、松井義典、川又一夫、田口剛俊、金澤賢治、小沼勇一、渡邊浩之、井上修一、出雲寛互、石田卓也、斎藤 隆、加治芳行、宇賀地弘和、塚田 隆、石塚悦男、河村 弘：“ IASCC 照射試験に係るキャプセルの製作 (2) -き裂発生試験用キャプセル-”，JAEA- Technology 2008-012 (2008)。
- 5) (独) 日本原子力研究開発機構、「平成 18 年度軽水炉燃材料詳細健全性調査報告書」、平成 19 年 3 月。
- 6) T.M. Karlsen, P. Bennett, N.W. Høgberg, in: T.R. Allen, P.J. King, L. Nelson (Eds.), Proceedings of the 12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System – Water Reactors -, TMS, 2005, p. 337.

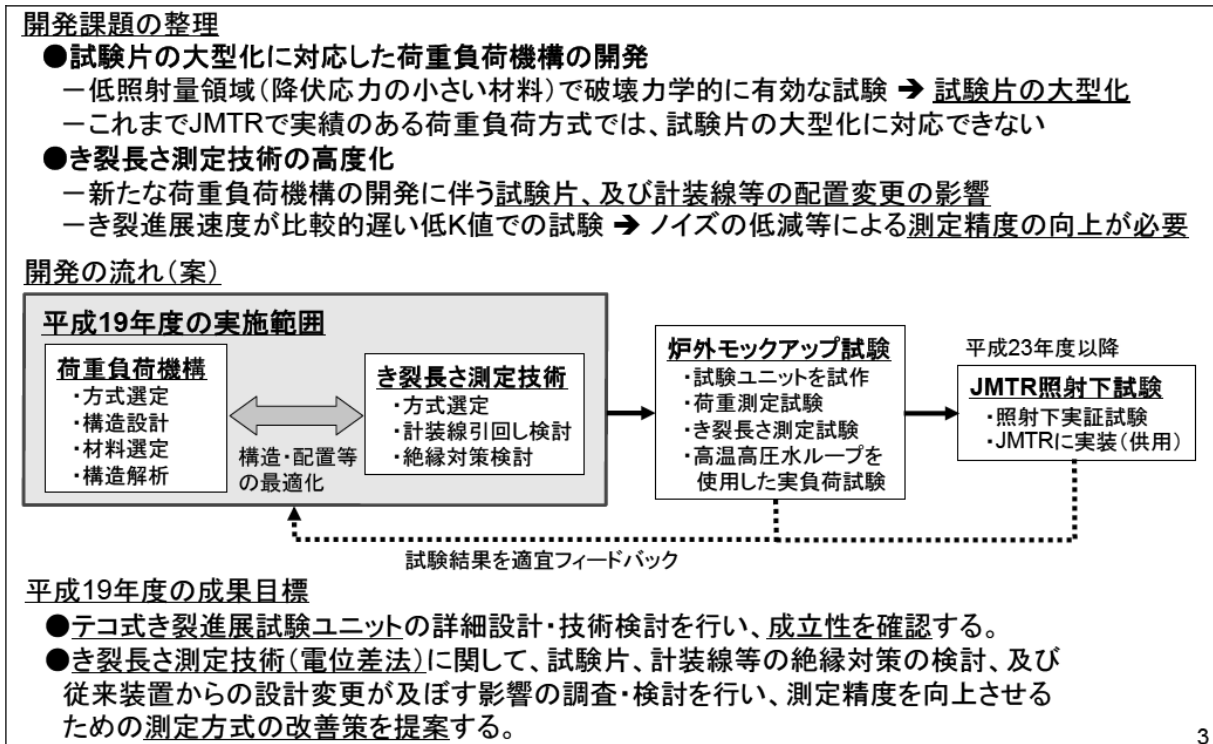


図2.1 照射下き裂進展試験ユニットの従来試験からの課題及び平成19年度の目標

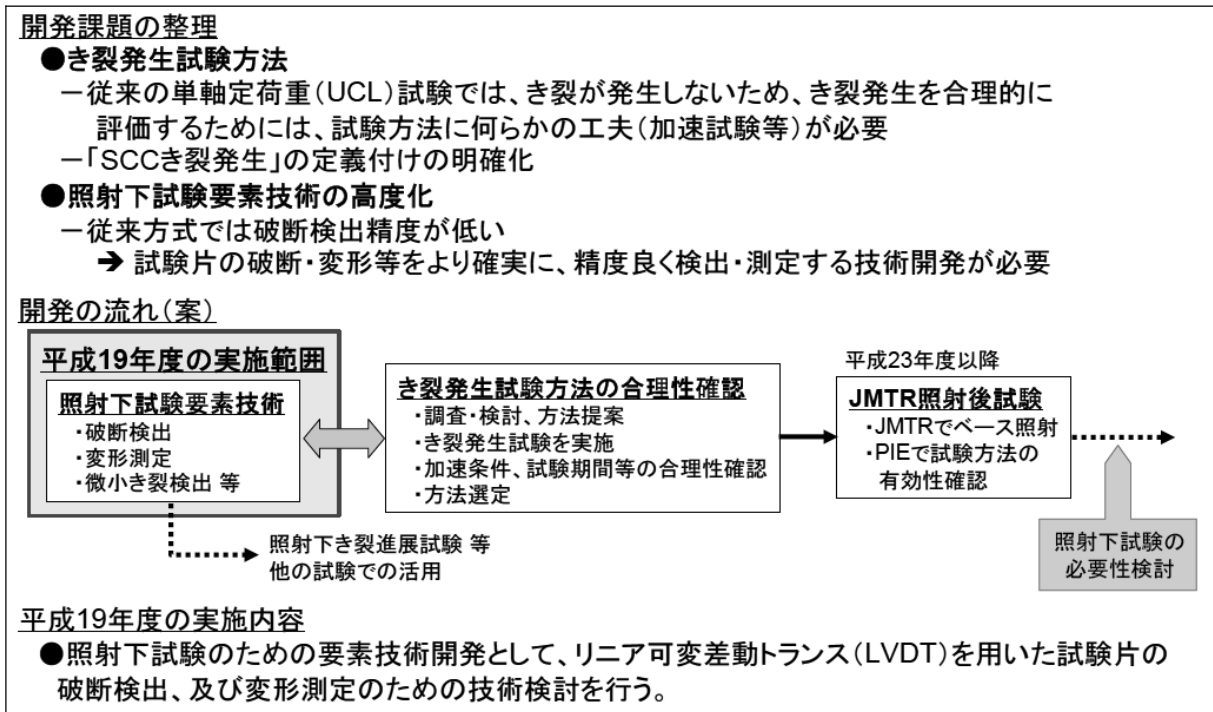


図2.2 照射下き裂発生試験ユニットの従来試験からの課題及び平成19年度の目標

表 3.1-1 荷重負荷機構の比較表

| 方式 | 荷重負荷機構 | 特徴 |
|---------------------|---|---|
| 単軸引張方式 ●JMTR従来方式 |  | <ul style="list-style-type: none"> ・単軸引張方式（ペロースが縮む力をそのまま利用して、試験片に引張荷重を負荷する） ・JMTRでは、小型試験片（0.4インチCT（厚さ5.6mm））での実績がある ・金属ペロース内のガス圧を減圧して、キャプセル内の水圧より低くすることで、ペロースが縮むことで荷重を負荷 ・最大負荷荷重は、ペロースの有効断面積に比例するため、キャプセル内径により制限される ・キャプセル中心軸と垂直方向にき裂が進む向きに試験片を配置する ・電位差法用測定端子がキャプセルの片側の狭い領域に集中するため、計装線（MIケーブル）の引回し方法が限定される ・最大荷重を発生させるためには、試験片の荷重線とキャプセル中心軸とを一致させる必要があるため、キャプセル内径によって試験片寸法が制限される <ul style="list-style-type: none"> → 0.5インチCT（厚さ12.7mm）試験片の装荷が困難 ・BWR水圧条件（約7MPa）であれば、ペロース内ガス圧は通常のポンペで加圧できる |
| テコ式 （はさみ式） |  | <ul style="list-style-type: none"> ・テコ方式（ペロースが押す力をテコで増幅し、試験片に引張荷重を負荷する。ハルデンでは、支点を挟んで力点と作用点とが交差する「はさみ式」を採用。テコ比2.5の実績がある） ・ハルデンでは、小型試験片（約0.3インチCT相当（厚さ5mm））での実績がある ・金属ペロース内のガス圧を加圧して、キャプセル内の水圧より高くすることで、ペロースが伸びることで荷重を負荷 <ul style="list-style-type: none"> → 加圧方式では、トラブル時にペロースが破壊する可能性 ・最大負荷荷重は、ペロースでの発生荷重（推力）とテコ比によって決まる。但し、荷重が大きい場合は、材料のたわみ量も考慮が必要となる <ul style="list-style-type: none"> → テコ比が小さいため、負荷荷重を大きくするためには、ペロースで大きい荷重を発生させる必要がある ・テコでペロース推力を増幅させるため、水圧変動の影響を受けやすい ・キャプセル中心軸方向にき裂が進む向きに試験片を配置する。荷重負荷機構側に試験片リガメントがある <ul style="list-style-type: none"> → 作用点（荷重ピン）と支点との間に試験片があるため、ユニット長が長くなる ・電位差法用測定端子をキャプセル内の比較的広い空間に配置できるため、計装線（MIケーブル）の引回しの自由度が高い ・試験片の寸法は、キャプセル内径が上限となり、ペロース側（力点）での変位量により制限される ・安定してペロース内を加圧するためには、高圧ガス圧縮機が必要になる |

表 3.1-1 荷重負荷機構の比較表 (続き)

| 方式 | 荷重負荷機構 | 特徴 |
|-----------------------------------|-----------------|---|
| テコ式 (新方式 (1)) | <p>●新方式 (1)</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ テコ方式 (ペロースが縮む力をテコで増幅し、試験片に引張荷重を負荷する。テコ比は3とする) ・ 金属ペロース内のガス圧を減圧して、キャプセル内の水圧より低くすることによって、ペロースが縮むことで荷重を負荷 ・ 最大負荷荷重は、ペロースでの発生荷重 (推力) とテコ比によって決まる。但し、荷重が大きい場合は、材料のためみ量も考慮が必要となる <ul style="list-style-type: none"> → テコ比が小さいため、負荷荷重を大きくするためには、ペロースで大きい荷重を発生させる必要がある ・ テコでペロース推力を増幅させるため、水圧変動の影響を受けやすい ・ キャプセル中心軸方向にき裂が進む向きに試験片を配置する。荷重負荷機構側に試験片リガメントがある <ul style="list-style-type: none"> → 作用点 (荷重ピン) と支点との間に試験片があるため、ユニット長が長くなる ・ 電位差法用測定端子をキャプセル内の比較的広い空間に配置できるため、計装線 (MIケーブル) の引回しの自由度が高い ・ 試験片の寸法は、キャプセル内径が上限となり、ペロース側 (力点) での変位量により制限される ・ BWR水圧条件 (約7MPa) であれば、ペロース内ガス圧は通常のポンペで加圧できる |
| テコ式 (新方式 (2)) 試験片逆向き 取付け | <p>●新方式 (2)</p> | <ul style="list-style-type: none"> ・ テコ方式 (ペロースが縮む力をテコで増幅し、試験片に引張荷重を負荷する。テコ比は6とする) ・ 金属ペロース内のガス圧を減圧して、キャプセル内の水圧より低くすることによって、ペロースが縮むことで荷重を負荷 ・ 最大負荷荷重は、ペロースでの発生荷重 (推力) とテコ比によって決まる。但し、荷重が大きい場合は、材料のためみ量も考慮が必要となる <ul style="list-style-type: none"> → テコ比が大きいため、ペロースで発生させる荷重を小さくできる ・ テコでペロース推力を増幅させるため、水圧変動の影響を受けやすい ・ キャプセル中心軸方向にき裂が進む向きに試験片を配置する。荷重負荷機構側とは逆側に試験片リガメントがある <ul style="list-style-type: none"> → 試験片の方向を逆にすることにより、作用点 (荷重ピン) と支点との距離を短くできるため、ユニット長を短くすることが可能 ・ 試験片の側面に電位差法用測定端子を接続することにより、キャプセル内の比較的広い空間に配置できるため、計装線 (MIケーブル) の引回しの自由度が高い ・ 試験片の寸法は、キャプセル内径が上限となり、ペロース側 (力点) での変位量により制限される ・ BWR水圧条件 (約7MPa) であれば、ペロース内ガス圧は通常のポンペで加圧できる |

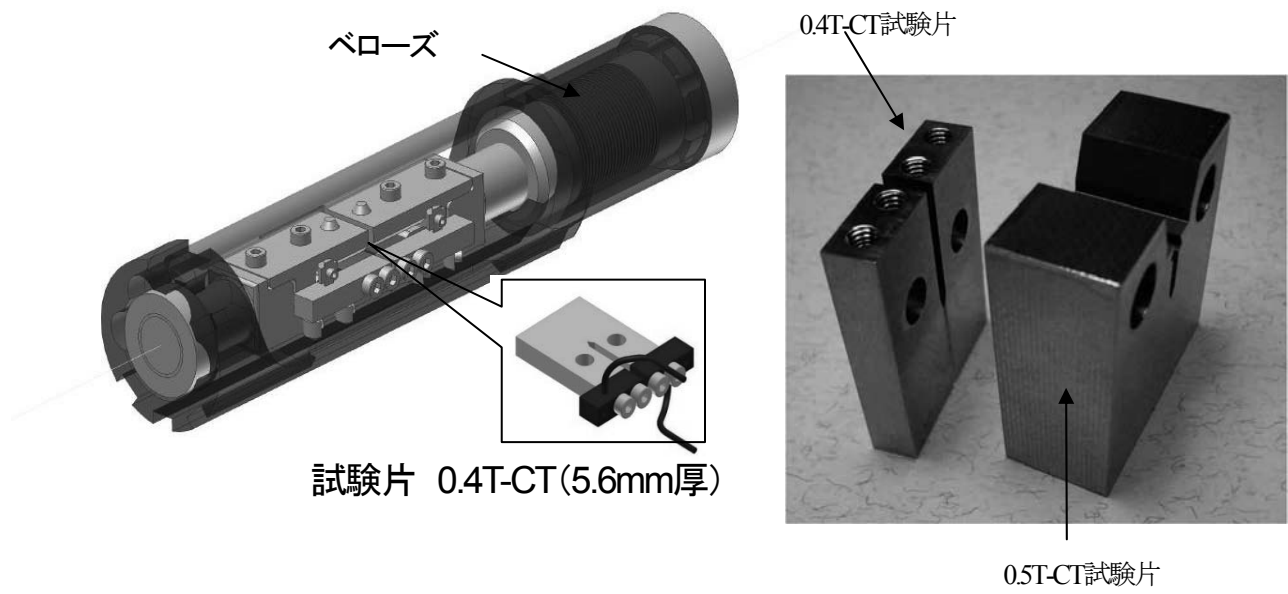


図3.1-1 従来型き裂進展試験ユニット及び試験片

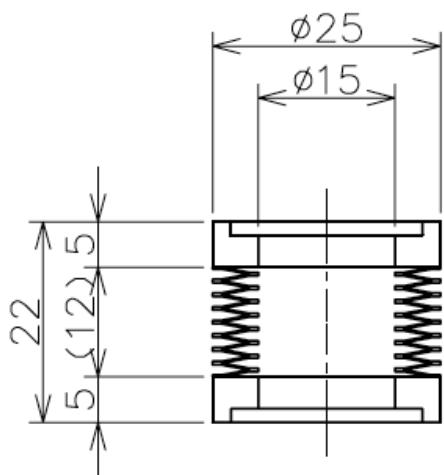


図3.1-2 き裂進展ユニット用ベローズ

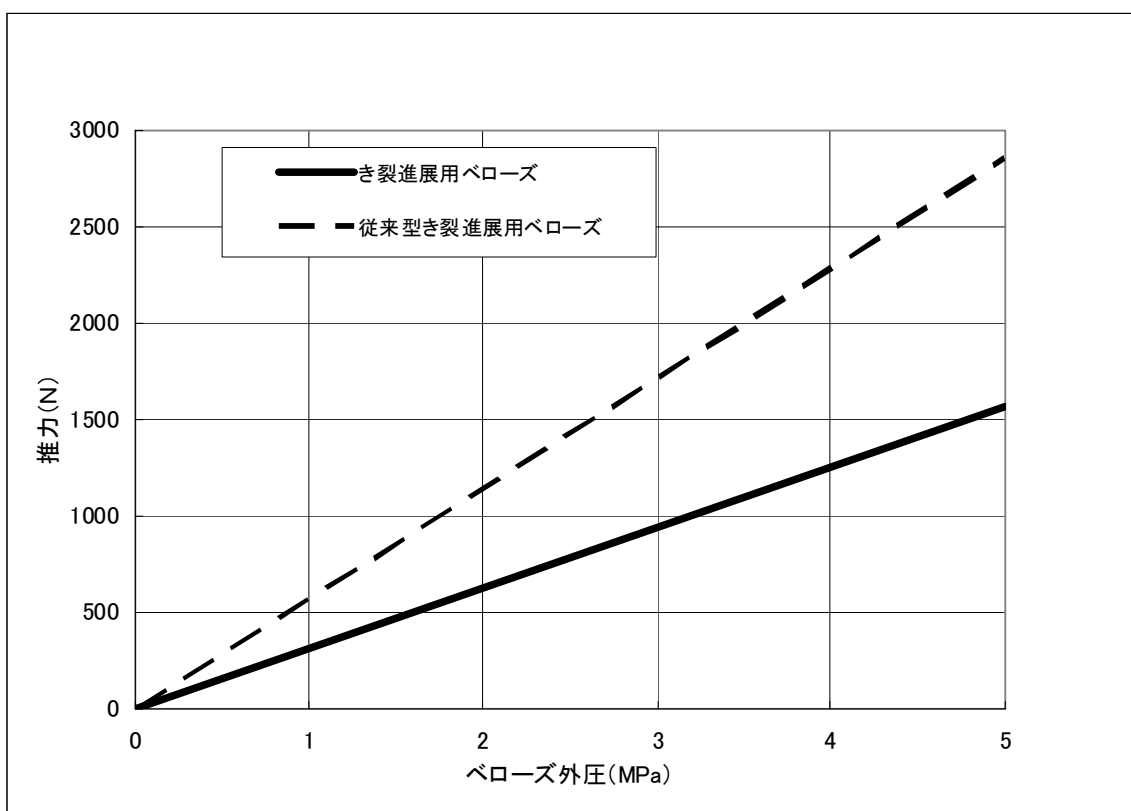


図3.1-3 ベローズ外圧と推力との関係図

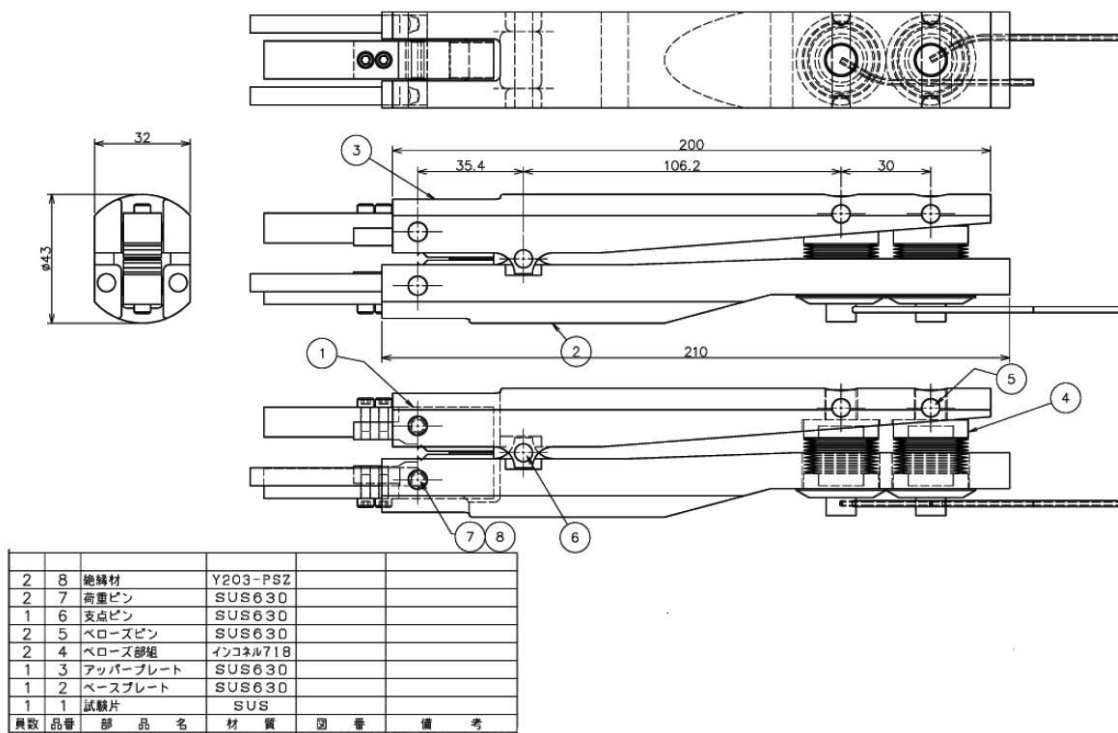
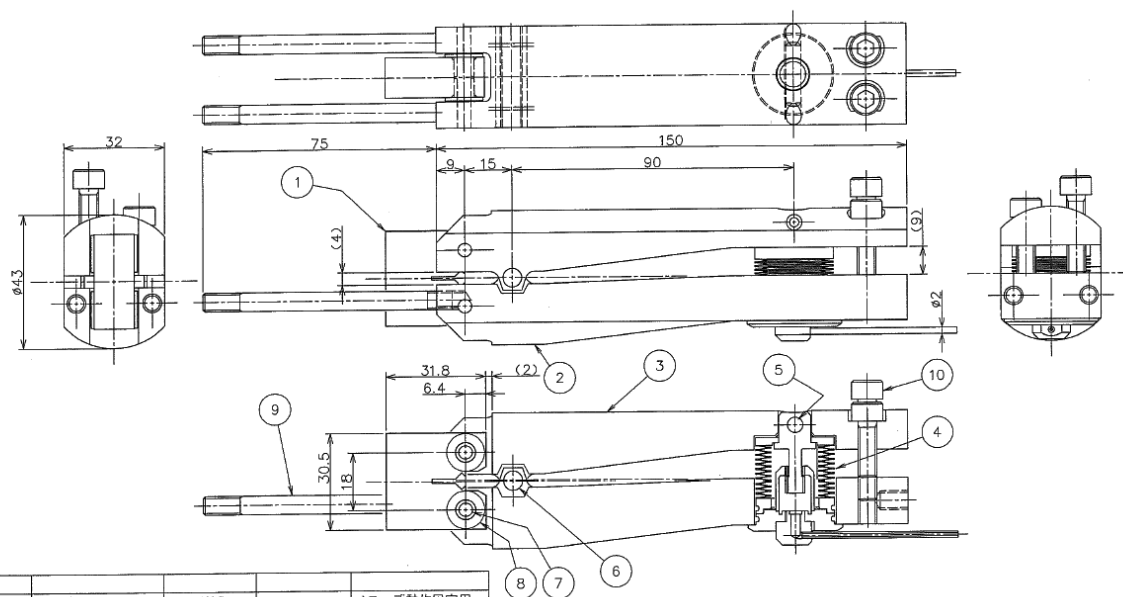
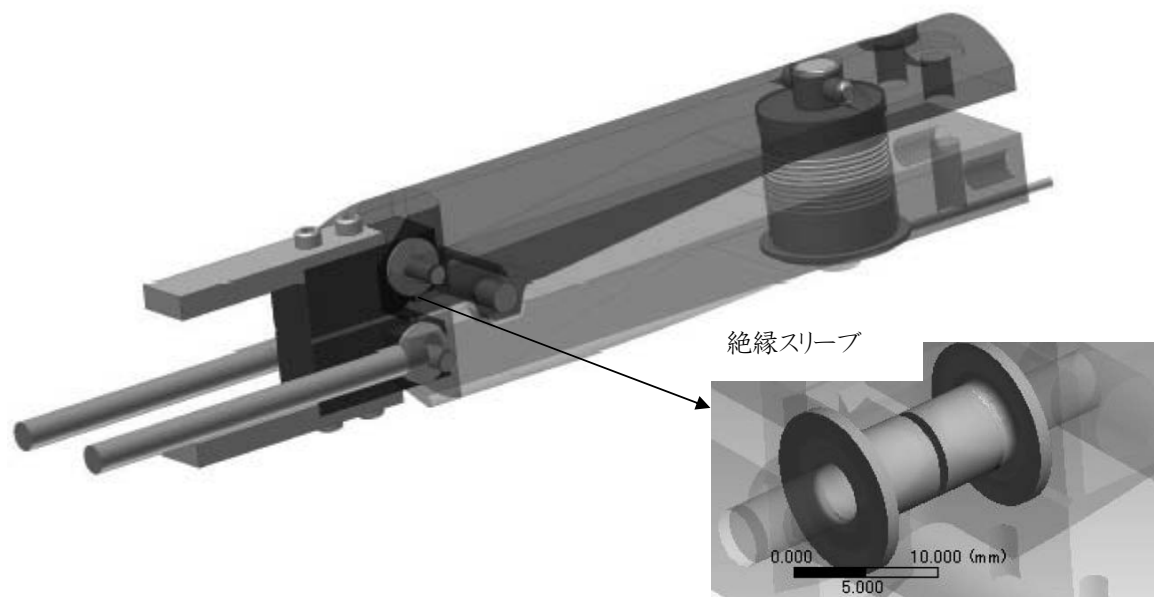


図3.14 新方式(1)推力をテコで3倍とするユニット構造



| | | | | | |
|----|----|---------|----------|------------|-----------|
| 2 | 10 | 固定ボルト | SUS | ---- | ペローズ動作固定用 |
| 2 | 9 | ロッド | SUS304 | DE-006-531 | |
| 4 | 8 | 絶縁材 | Y203-PSZ | DE-006-530 | |
| 2 | 7 | 試験ピン | SUS630 | DE-006-529 | |
| 1 | 6 | 支点ピン | SUS304 | DE-006-528 | |
| 1 | 5 | ペローズピン | SUS630 | DE-006-527 | |
| 1 | 4 | ペローズ部組 | NCF718巻 | DD-019-201 | |
| 1 | 3 | アッパーアーム | SUS630 | DD-019-200 | |
| 1 | 2 | ベースプレート | SUS630 | DD-019-199 | |
| 1 | 1 | 試験片 | SUS | DE-006-526 | |
| 数量 | 品番 | 部品名 | 材質 | 図番 | 備考 |

図3.1-5 新方式(2) 推力をテコで6倍とするユニット構造

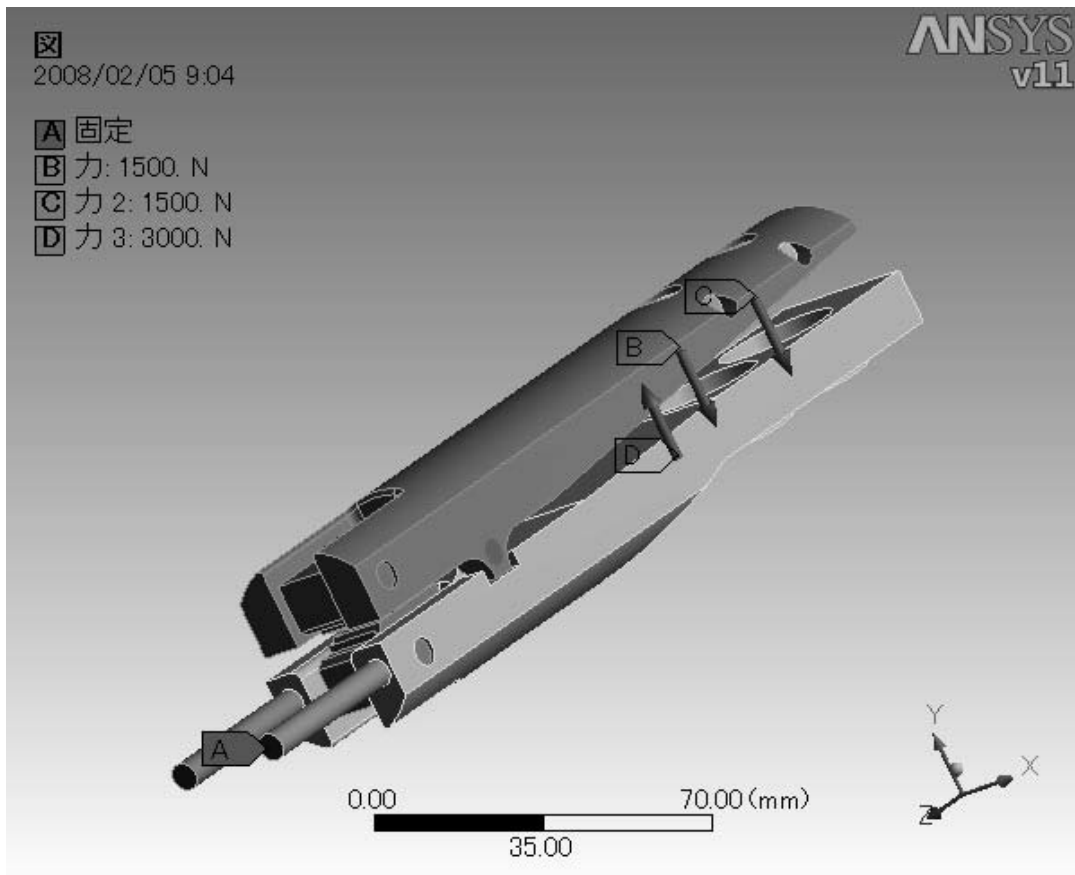


図3.1-6 新方式(1) (テコ比3、ベローズ2個使用) の解析モデル

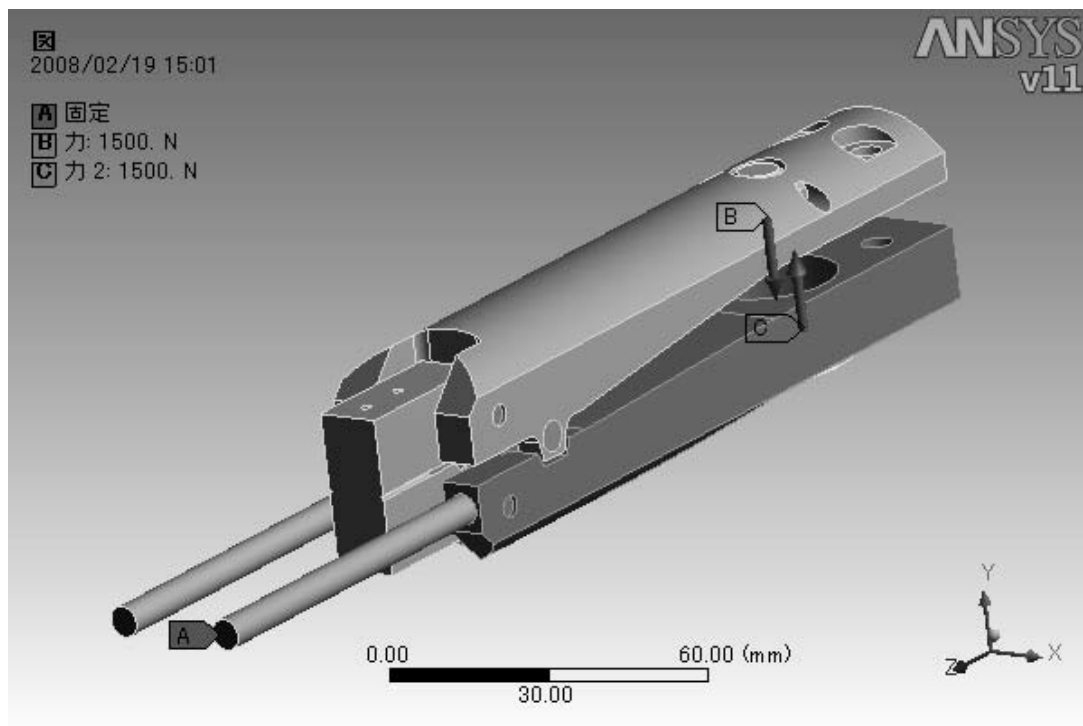


図3.1-7 新方式(2) (テコ比6、試験片逆向き) の解析モデル

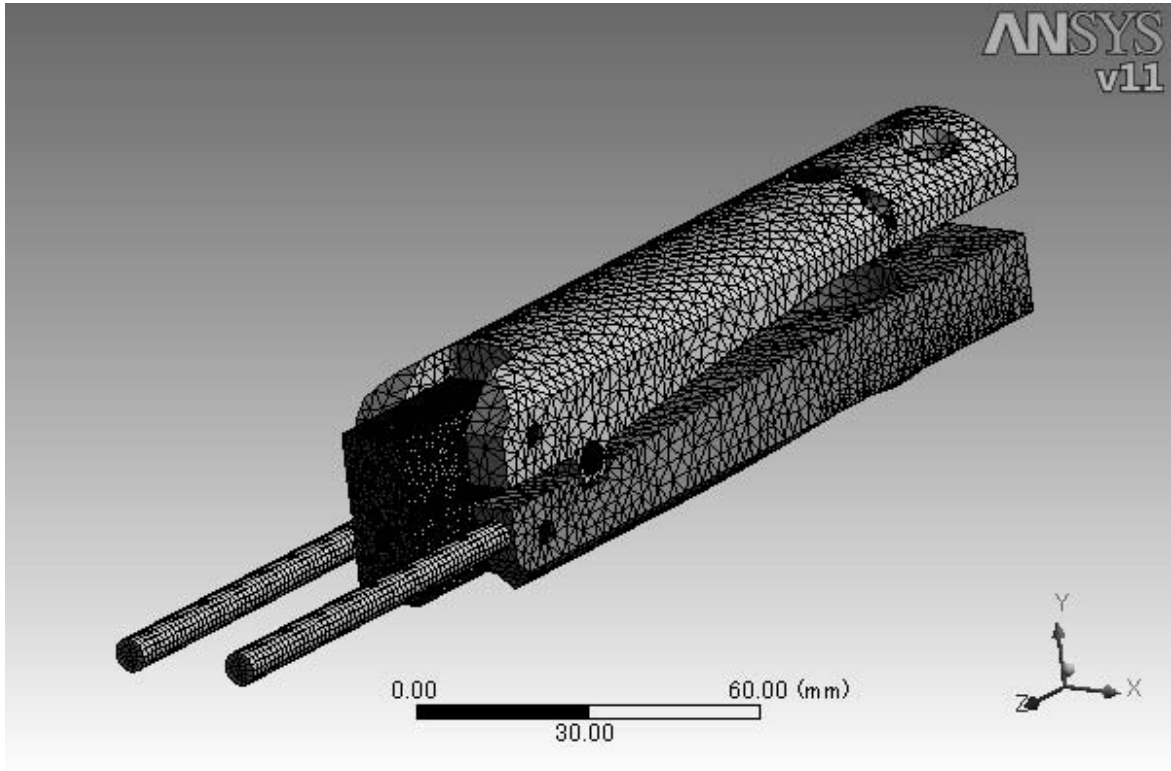


図3.1-8 新方式(2) (テコ比6、試験片逆向き) の解析メッシュ

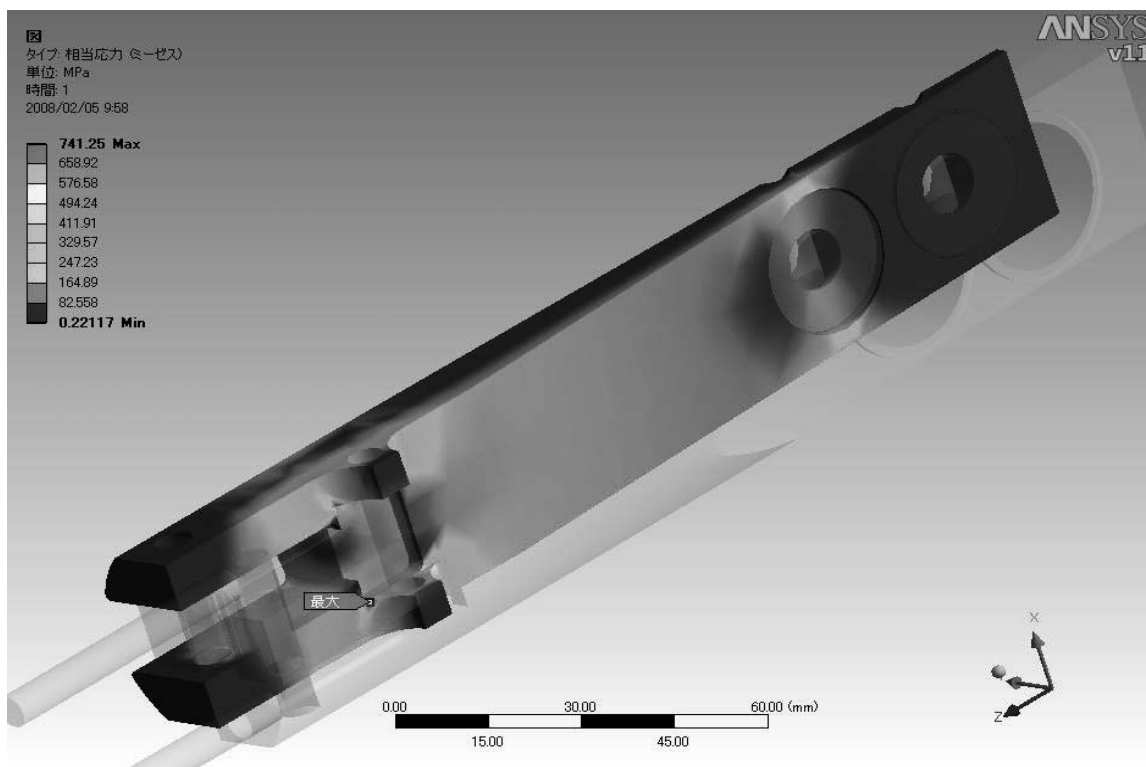


図3.1-9 新方式(1) (テコ比3、ベローズ2個使用) の相当応力解析結果

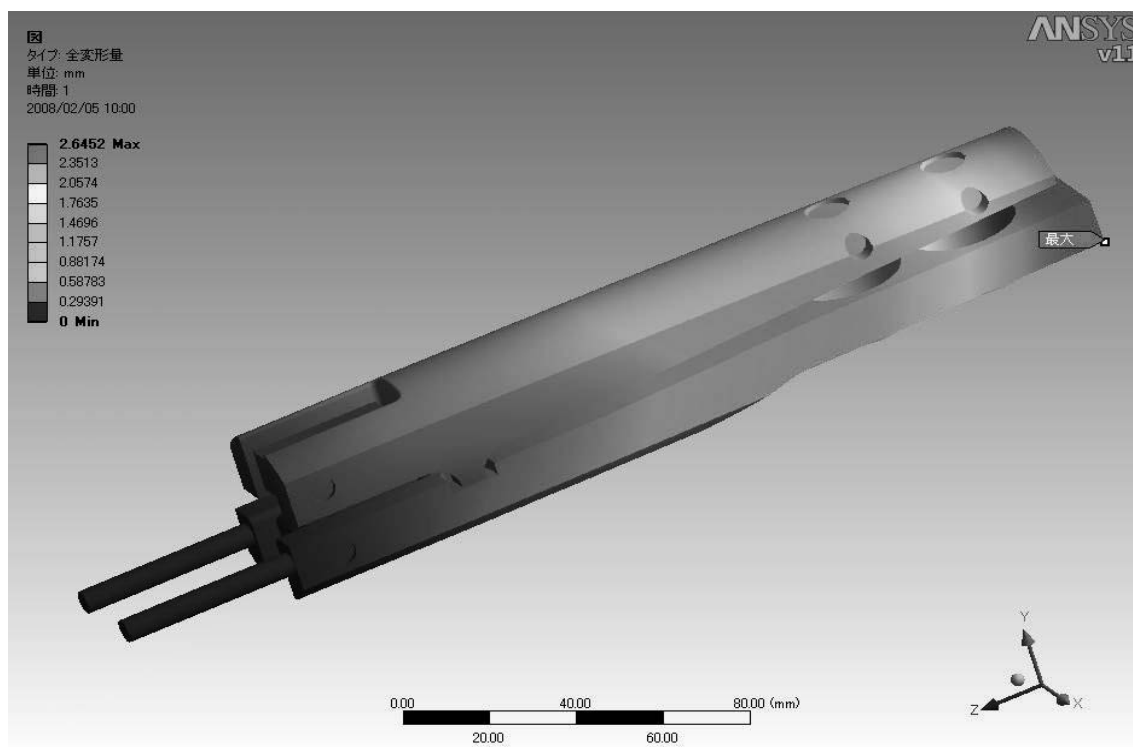


図3.1-10 新方式(1) (テコ比3、ベローズ2個使用) の変位量解析結果

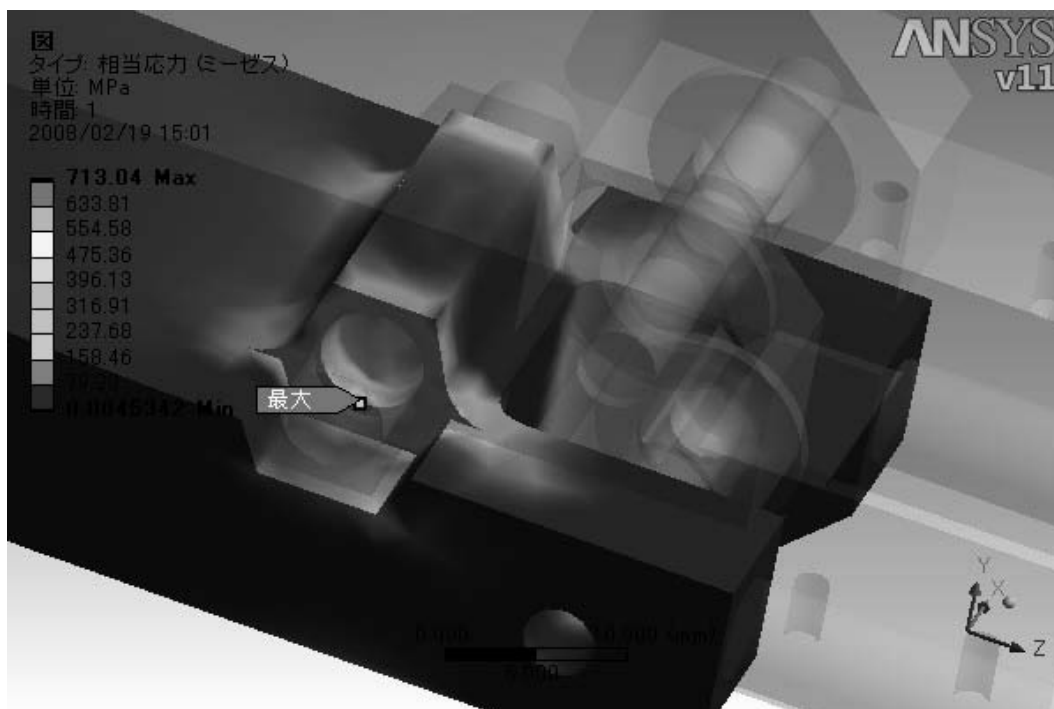


図3.1-11 新方式(2) (テコ比6、試験片逆向き) の相当応力解析結果

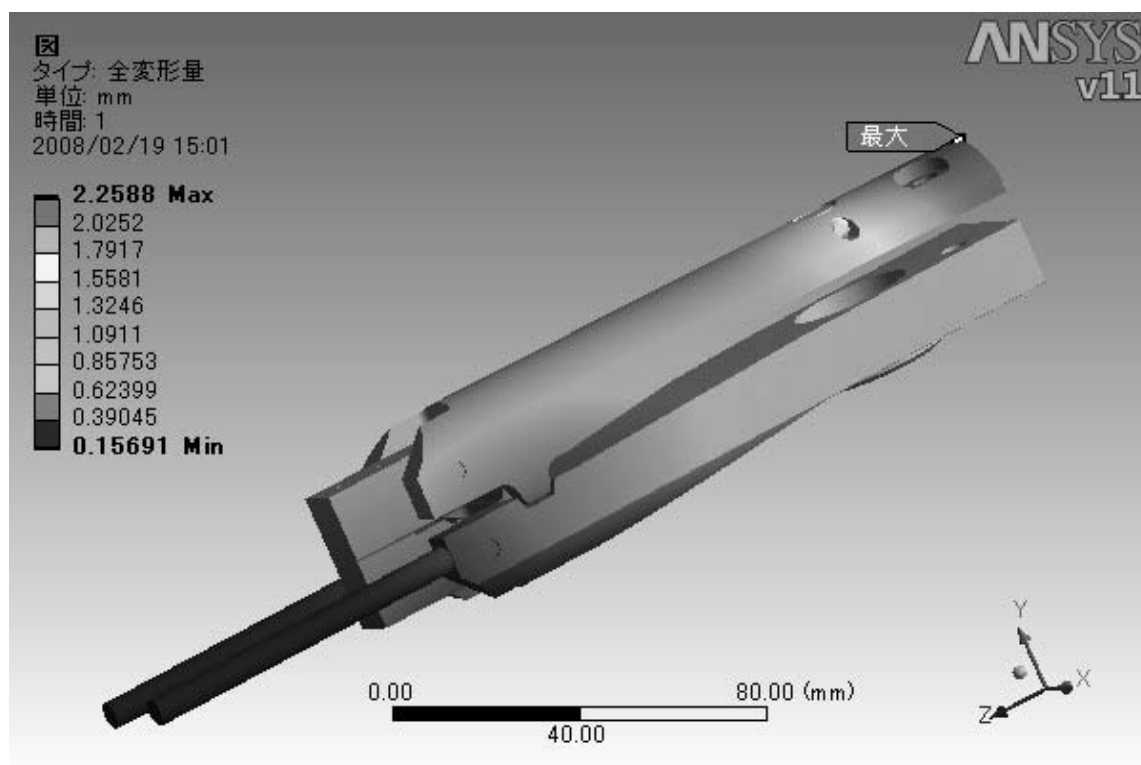


図3.1-12 新方式(2) (テコ比6、試験片逆向き) の変位量解析結果

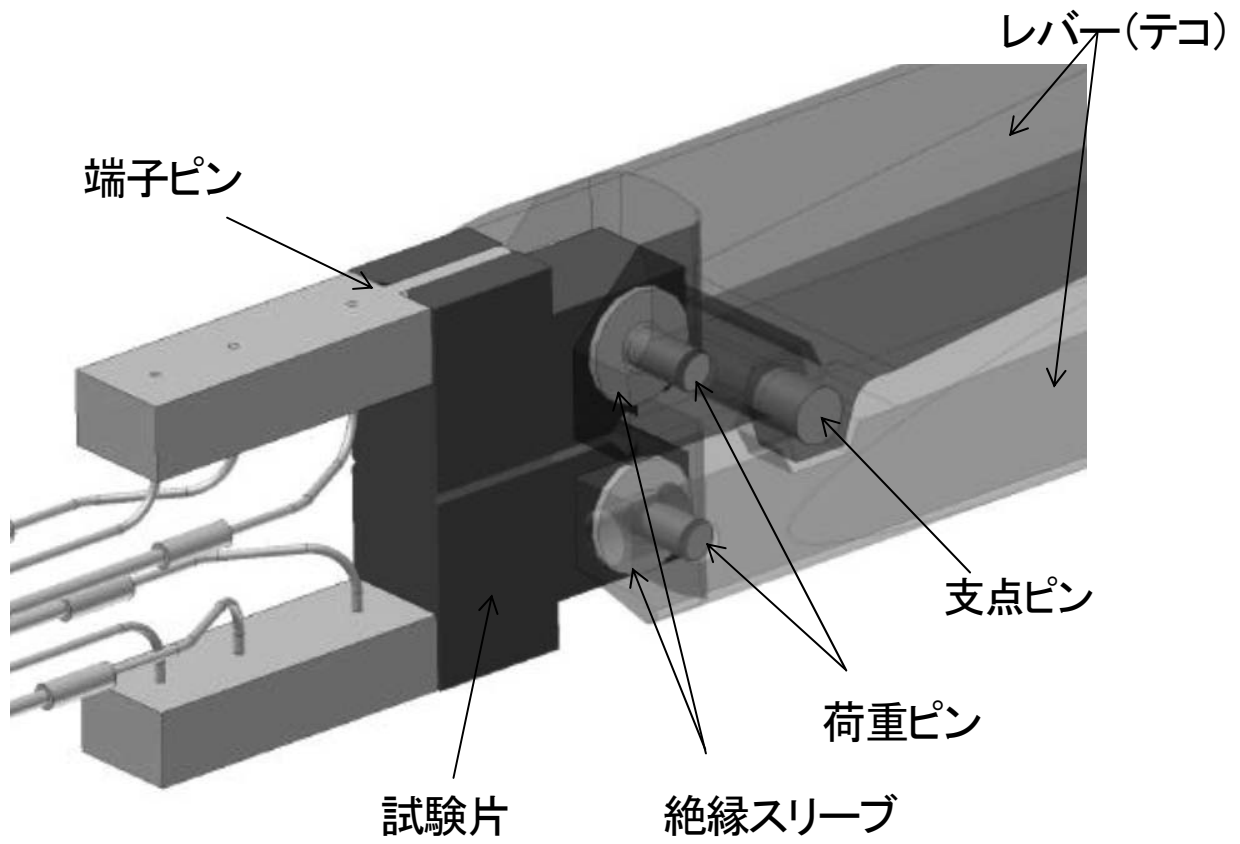


図3.1-13 ホットラボでの作業性を考慮すべき部位

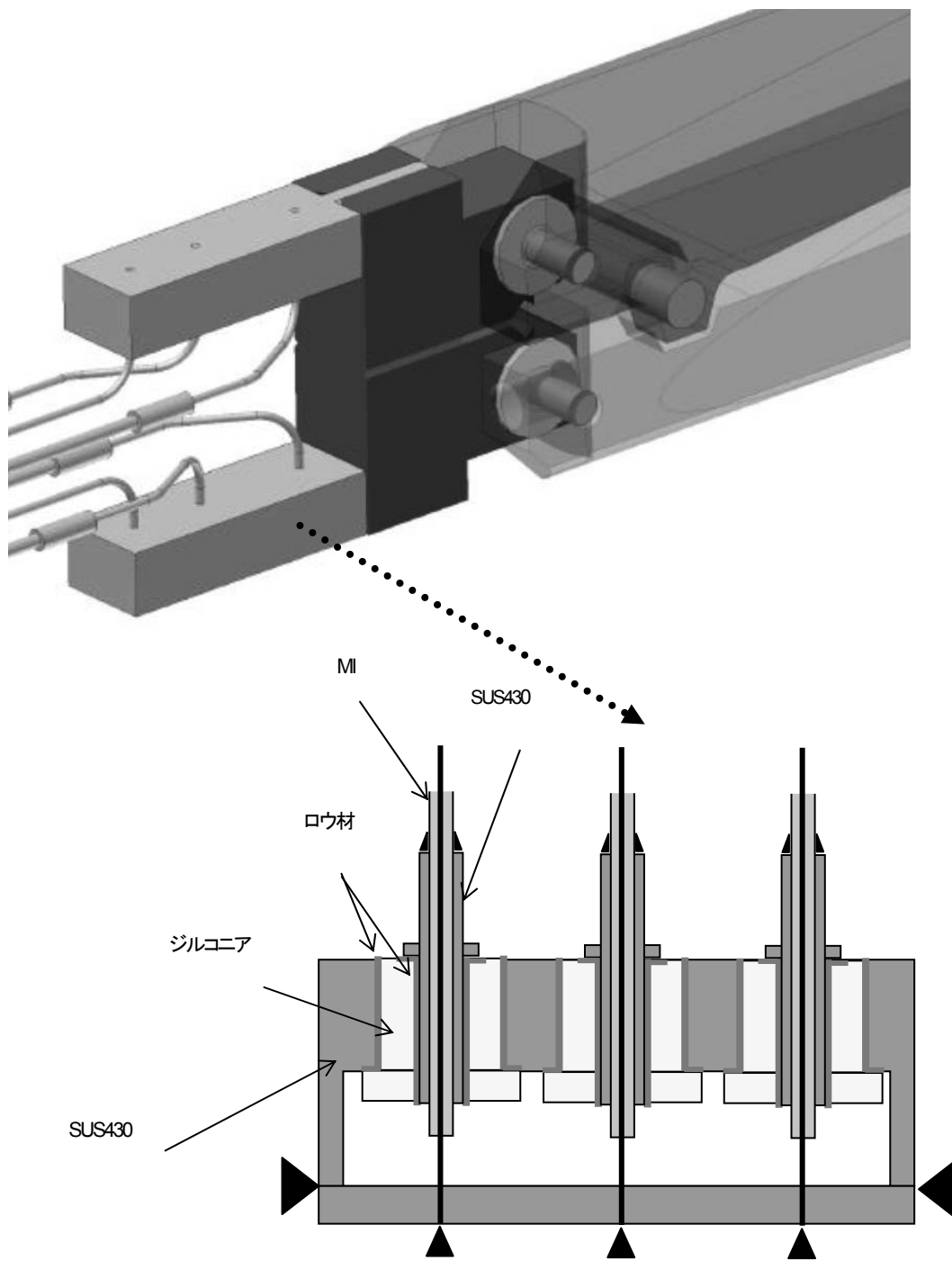


図3.1-14 端子ピン内の絶縁方法

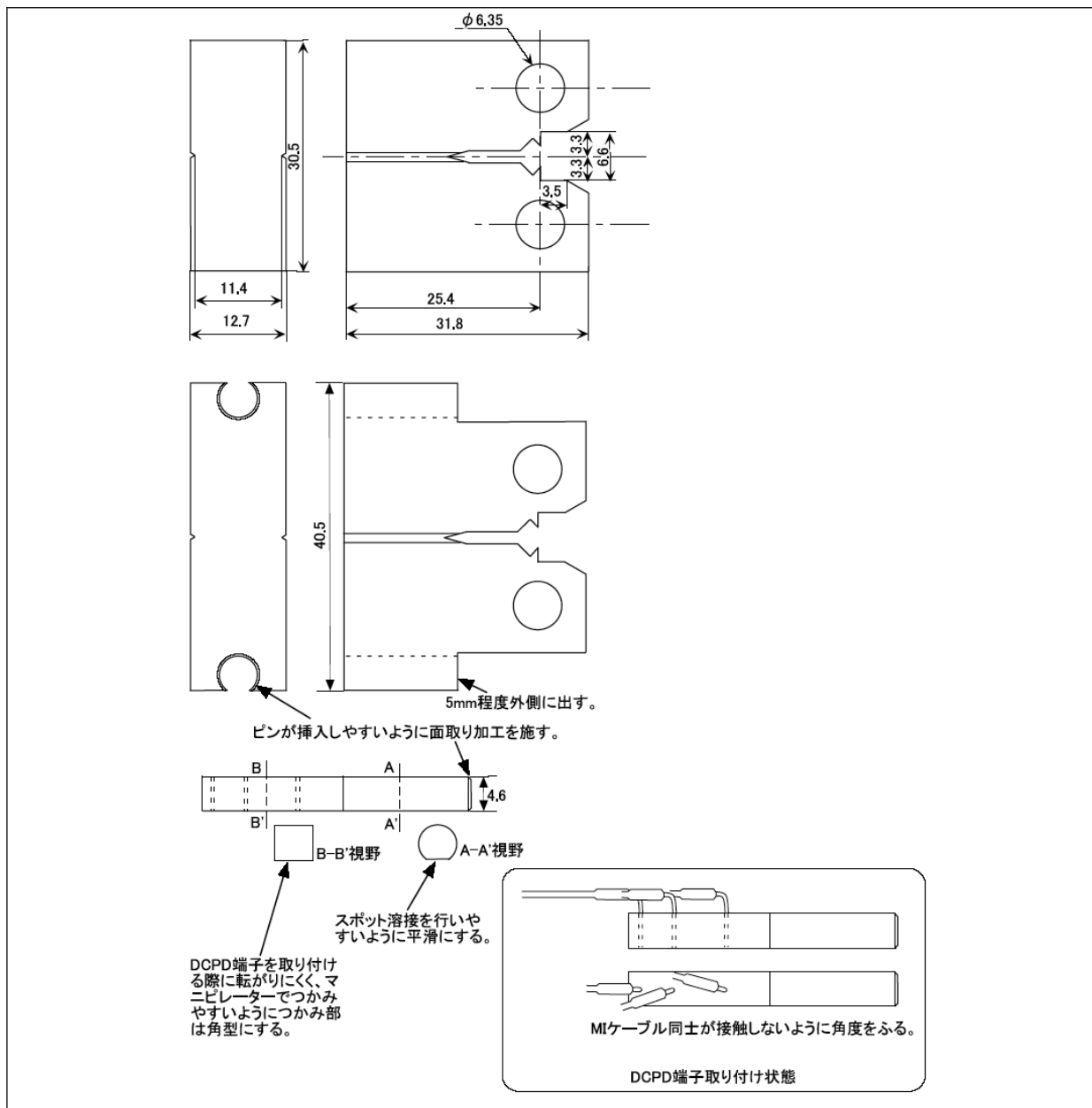
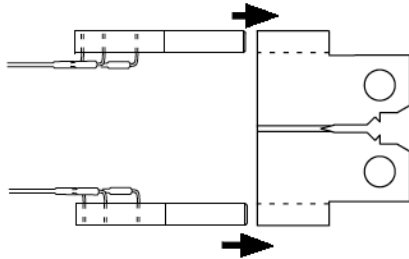
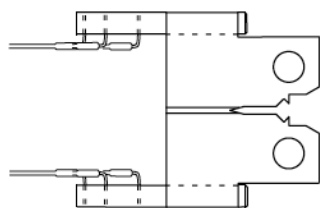


図3.1-15 試験片の加工及び端子ピンの概念図

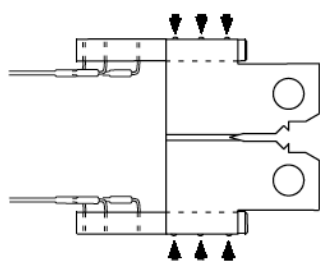
①DCPD端子用ピンを差し込む。



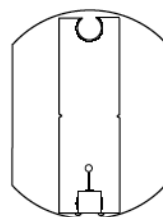
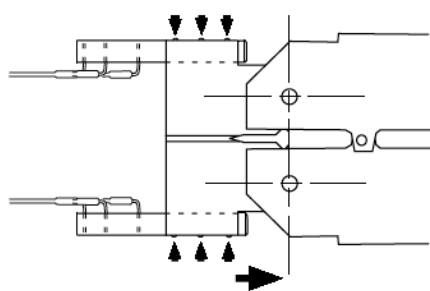
②更に強く押し込む。



③端子ピンとCT試験片をスポット溶接。



④荷重ユニットへセット。



※40.5mmであれば、従来設計の荷重ユニットより出ない。

図3.1-16 端子ピンの取付け例

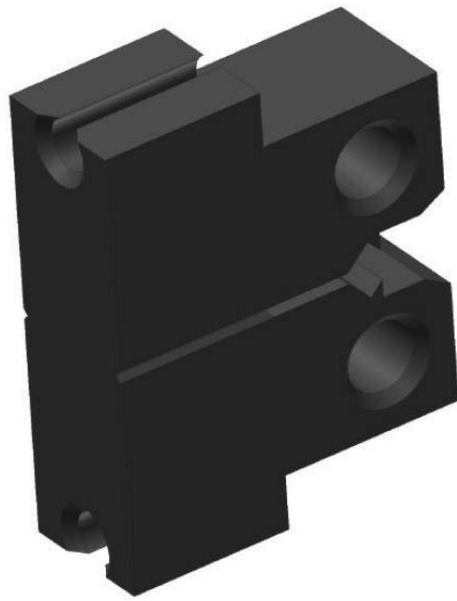


図3.1-17 端子ピン取付け部を加工した試験片の3Dイメージ

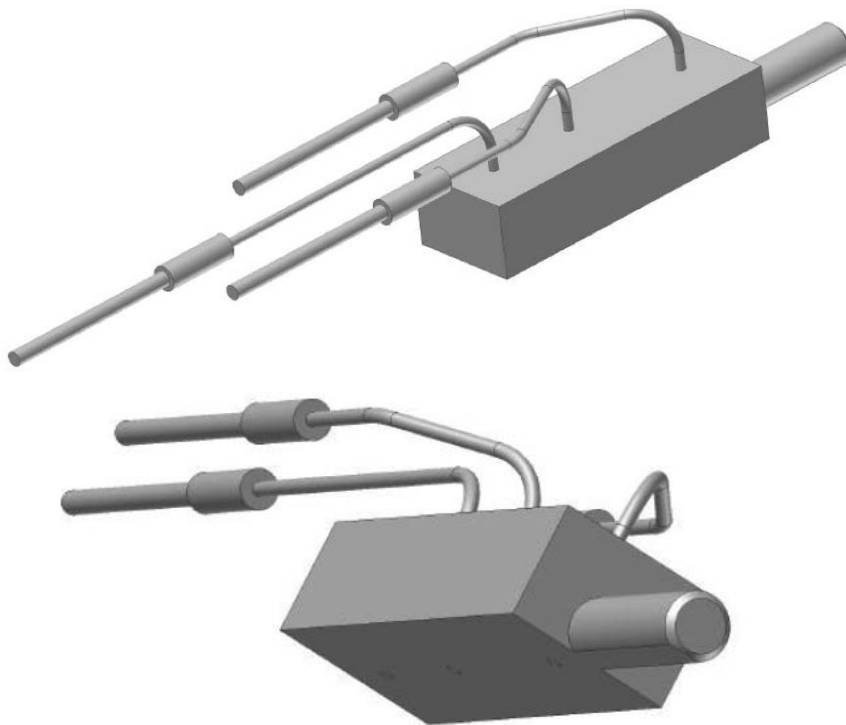


図3.1-18 電位差端子ピン3Dイメージ

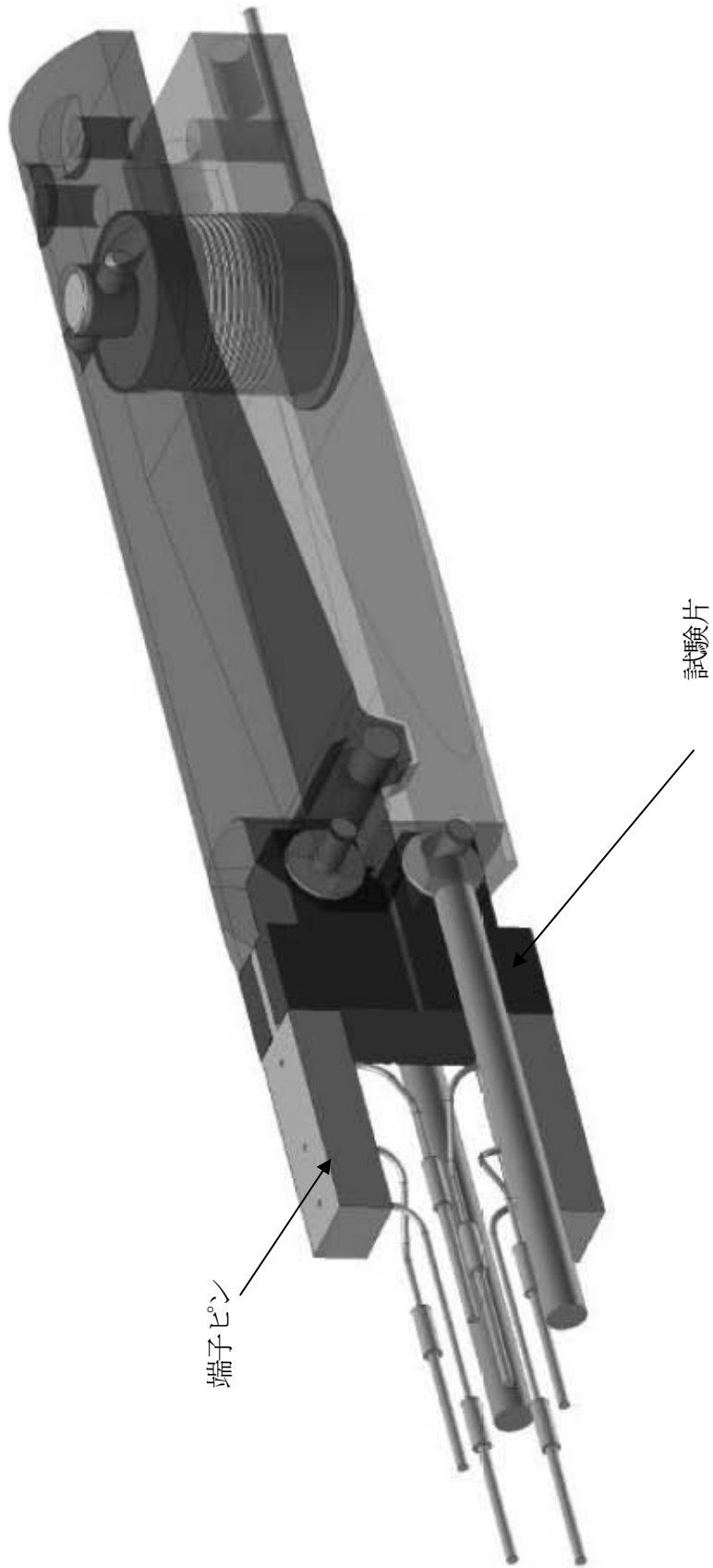


図3.1-19 取付け終了後のイメージ図

This is a blank page

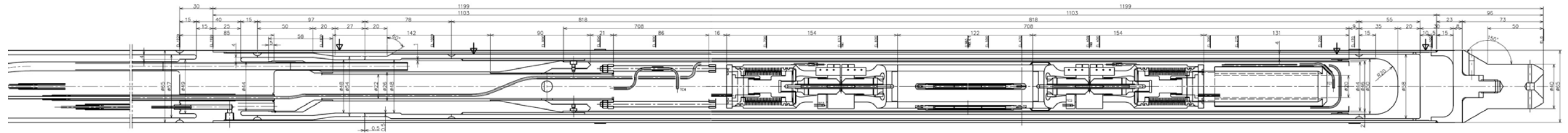


図3.1-20 従来型 ユニット配置

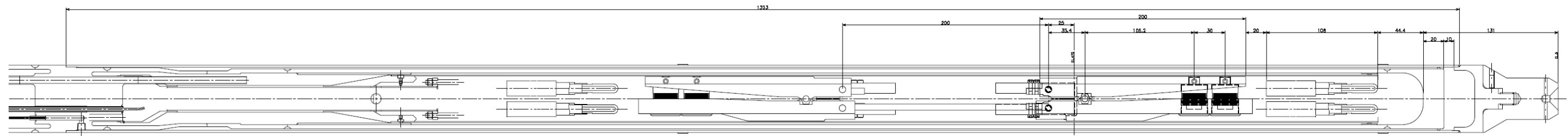


図3.1-21 新方式(1) ユニット配置

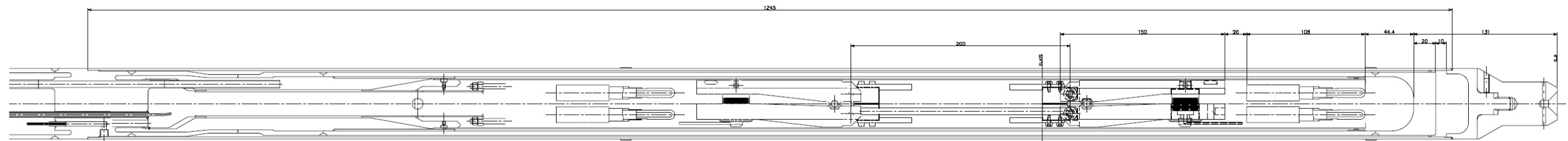


図3.1-22 新方式(2) ユニット配置

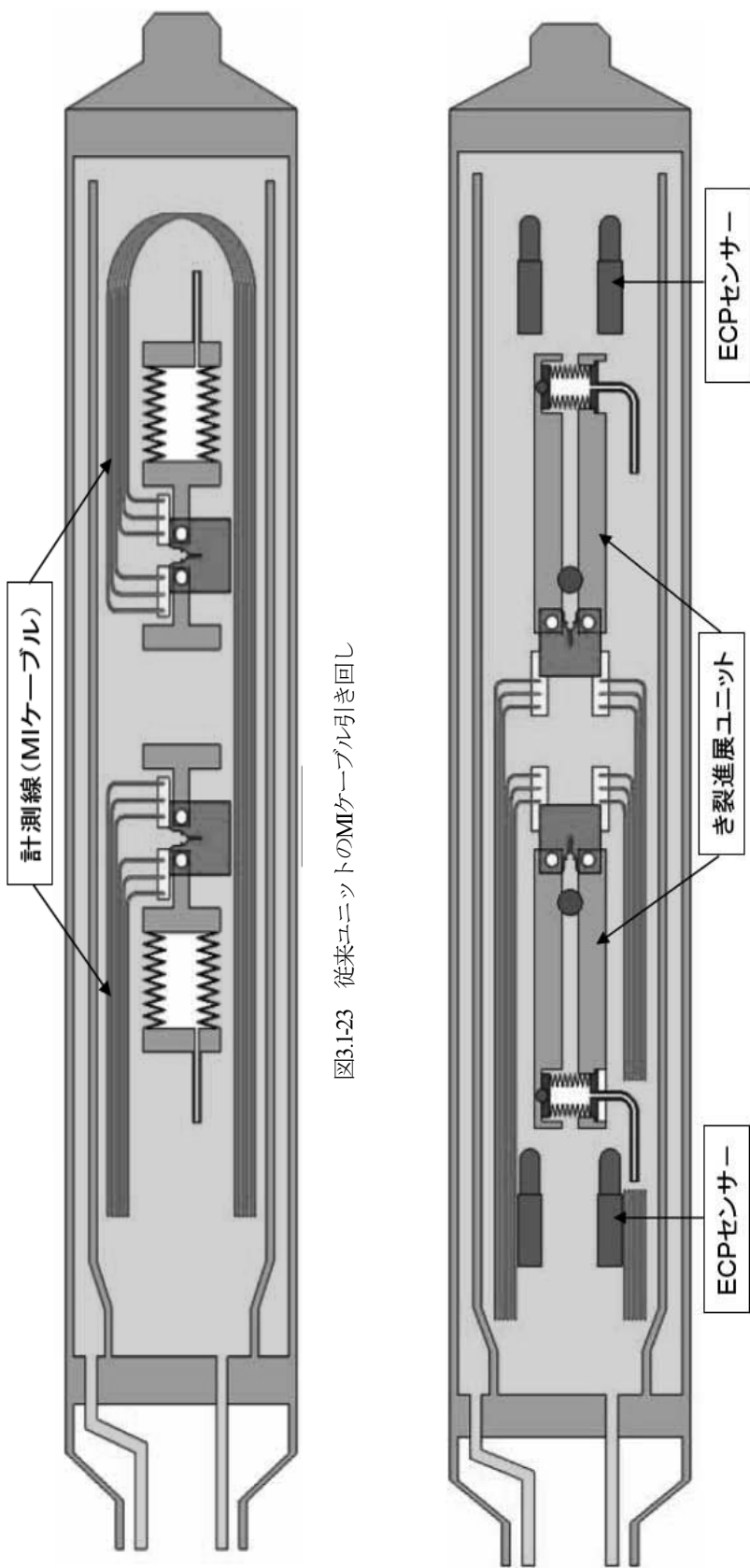


図3.1-23 従来ユニットのMIケーブル引き回し

図3.1-24 新方式②ユニットのMIケーブル引き回し

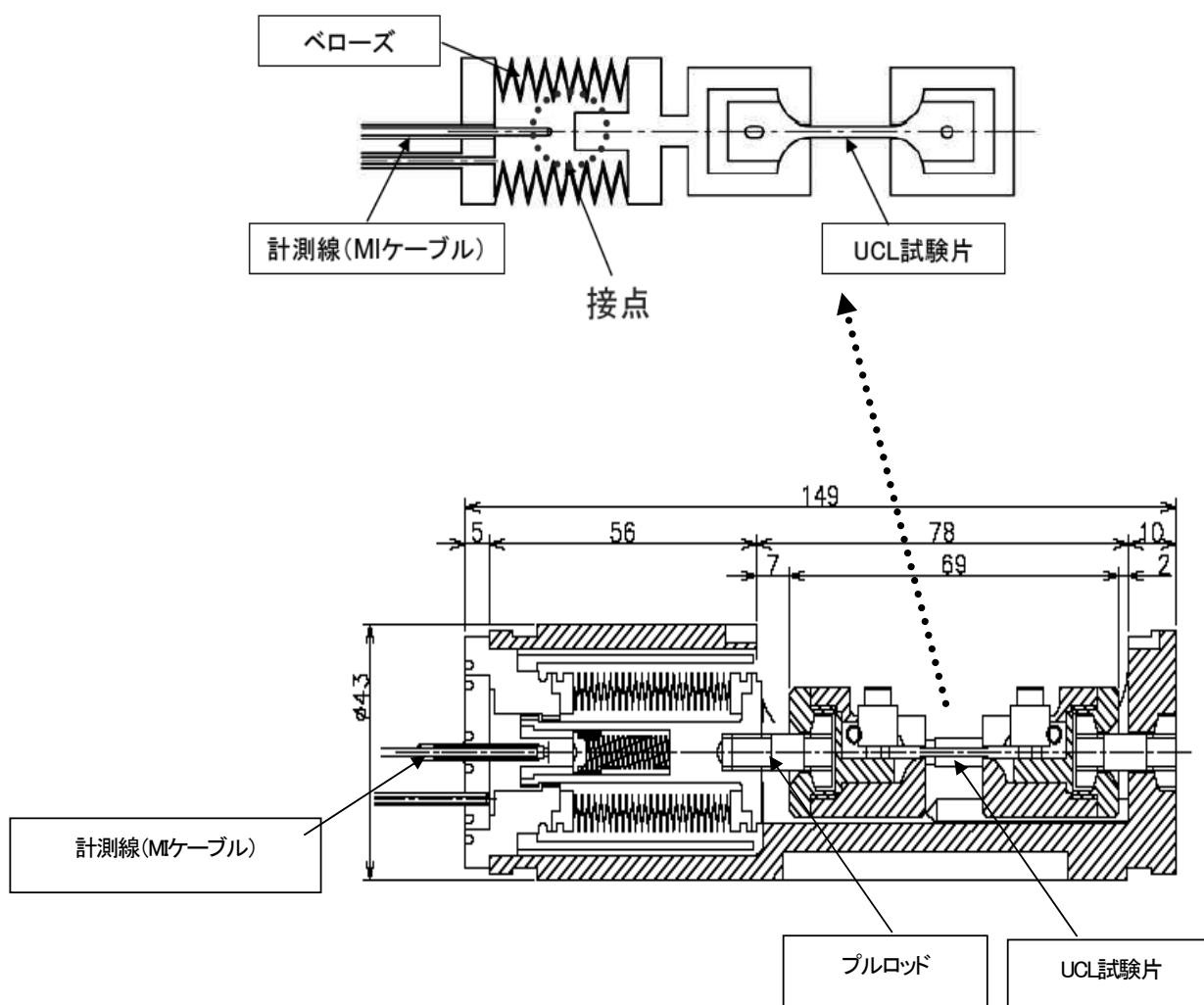


図 32-1 従来型き裂発生試験ユニットの概略図

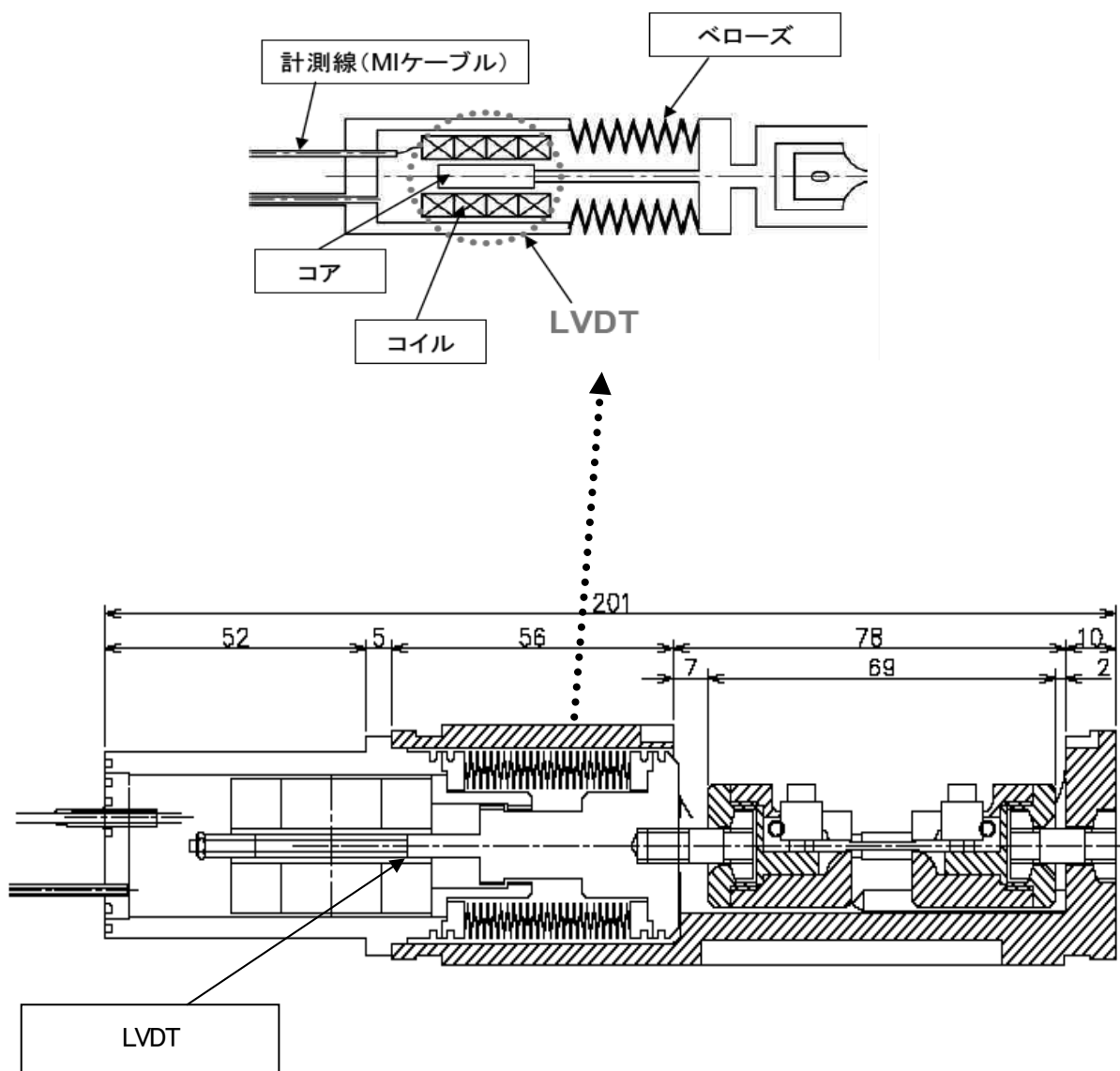


図 3.2-2 LVDT一体型ベローズを用いたき裂発生試験ユニットの概略図

This is a blank page

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

| 組立量 | SI基本単位 | |
|-------------------------|--------------|--------------------|
| | 名称 | 記号 |
| 面積 | 平方メートル | m ² |
| 体積 | 立方メートル | m ³ |
| 速度 | メートル毎秒 | m/s |
| 加速度 | メートル毎秒毎秒 | m/s ² |
| 波数 | 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 |
| 比透磁率 ^(b) | (数字の) | 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 | 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 |
| 光照度 | ルーメン | lm | cd sr ^(c) | cd |
| 放射線量 | ルクス | lx | m ⁻² cd | m ⁻² cd |
| 放射性核種の放射能 ^(f) | ベクレル ^(d) | Bq | s ⁻¹ | 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 | 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、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (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 |
| 粘力のモーメント | パスカル秒 | Pa s | m ⁻¹ kg s ⁻¹ |
| 表面張力 | ニュートンメートル | N m | m ² kg s ⁻² |
| 角速度 | ニュートン毎メートル | N/m | kg s ⁻² |
| 角加速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹ |
| 熱流密度, 放射照度 | ラジアン毎秒毎秒 | rad/s ² | m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻² |
| 熱容量, エントロピー | ワット毎平方メートル | W/m ² | kg s ⁻³ |
| 比熱容量, 比エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ |
| 比エネルギー | ジュール毎キログラム | J/(kg K) | m ² s ⁻² K ⁻¹ |
| 熱伝導率 | ジュール毎キログラム | J/kg | m ² s ⁻² |
| 体積エネルギー | ワット毎メートル毎ケルビン | W/(m K) | m kg s ⁻³ K ⁻¹ |
| 電界の強さ | ジュール毎立方メートル | J/m ³ | m ⁻¹ kg s ⁻² |
| 電荷密度 | ボルト毎メートル | V/m | m kg s ⁻³ A ⁻¹ |
| 表面電荷密度 | クーロン毎立方メートル | C/m ³ | m ⁻³ 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 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² s A |
| 透磁率 | ファラド毎メートル | F/m | m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ² |
| モルエネルギー | ヘンリー毎メートル | H/m | m kg s ⁻² A ⁻² |
| モルエントロピー, モル熱容量 | ジュール毎モル | J/mol | m ² kg s ⁻² mol ⁻¹ |
| 照射線量 (X線及びγ線) | ジュール毎モル毎ケルビン | J/(mol K) | m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹ |
| 吸収線量 | クーロン毎キログラム | C/kg | m ⁻¹ s A |
| 放射強度 | グレイ毎秒 | Gy/s | m ² s ⁻³ |
| 放射輝度 | ワット毎ステラジアン | W/sr | m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³ |
| 酵素活性濃度 | 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 |
| | カタール毎立方メートル | kat/m ³ | m ³ s ⁻¹ mol |

表5. SI接頭語

| 乗数 | 接頭語 | 記号 | 乗数 | 接頭語 | 記号 |
|------------------|-----|----|-------------------|------|----|
| 10 ²⁴ | ヨタ | Y | 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ²¹ | ゼタ | Z | 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ¹⁸ | エクサ | E | 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P | 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ¹² | テラ | T | 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁹ | ギガ | G | 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁶ | メガ | M | 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ³ | キロ | k | 10 ⁻¹⁸ | アト | a |
| 10 ² | ヘクト | h | 10 ⁻²¹ | ゼプト | z |
| 10 ¹ | デカ | da | 10 ⁻²⁴ | ヨクト | y |

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

| 名称 | 記号 | SI単位による値 |
|-------|------|---|
| 分 | min | 1 min=60s |
| 時 | h | 1 h=60 min=3600 s |
| 日 | d | 1 d=24 h=86 400 s |
| 度 | ° | 1°=(π/180) rad |
| 分 | ' | 1'=(1/60)°=(π/10800) rad |
| 秒 | " | 1"=(1/60)'=(π/648000) rad |
| ヘクタール | ha | 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 ⁻¹⁵ 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、記号数の定義に依存。 |
| ベベル | B | |
| デジベル | dB | |

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

| 名称 | 記号 | SI単位で表される数値 |
|-----------------------|-----|---|
| エルグ | 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 |
| フォトル | 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 ^(c) | Oe | 1 Oe ≐ (10 ³ /4π) A m ⁻¹ |

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≐ 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

| 名称 | 記号 | SI単位で表される数値 |
|-----------|------|---|
| キュリー | Ci | 1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq |
| レントゲン | R | 1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg |
| ラド | rad | 1 rad=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 f=1 fm=10 ⁻¹⁵ m |
| メートル系カラット | | 1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg |
| トル | Torr | 1 Torr=(101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm=101 325 Pa |
| カロリー | cal | 1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー), 4.184 J (「熱化学」カロリー) |
| マイクロン | μ | 1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m |

