



JMTRにおける照射試験用キャプセルのための 非破壊検査

Non-Destructive Tests of Capsules for JMTR Irradiation Examination

田中 秀隆 長尾 美春 大沢 謙治 佐藤 政四

Hidetaka TANAKA, Yoshiharu NAGAO, Kenji OSAWA and Masashi SATO

大洗研究開発センター
材料試験炉部

Department of JMTR
Oarai Research and Development Center

March 2007

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

JMTR における照射試験用キャプセルのための非破壊検査

日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター

材料試験炉部

田中 秀隆*、長尾 美春、大沢 謙治⁺、佐藤 政四

(2007 年 2 月 20 日受理)

JMTR を用いた照射試験では、中性子照射量等の照射パラメータを精緻に制御、予測、評価する先進的な照射試験が増加してきている。これに伴い照射試験用のキャプセルの内部構造も複雑化してきた。本報告書では、これまで JMTR の照射試験用キャプセルに対して行われてきた放射線透過試験、浸透探傷試験、超音波探傷試験等の非破壊検査の手法について概説するとともに、JMTR 改修後に照射試験を行う場合のキャプセルの内部構造の確認方法について検討した結果を報告するものである。

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

+ J-PARC センター加速器ディビジョン

※ 出向職員

Non-Destructive Tests of Capsules for JMTR Irradiation Examination

Hidetaka TANAKA*, Yoshiharu NAGAO, Kenji OSAWA⁺ and Masashi SATO

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

(Received February 20, 2007)

Irradiation examination are increasing in advanced irradiation research for accurate prediction control and evaluation of irradiation parameter such as neutron fluence, etc. by using JMTR. Irradiation capsule internals are therefore structurally complicated recently.

This report described the procedure of non destructive tests such as radiographic test, penetrant test, ultrasonic test, etc. for inspection of irradiation capsules in JMTR, and the result of Test-case of confirmation procedure for internal parts of irradiation capsules.

Keywords: Non-Destructive Test, JMTR, Irradiation Capsule

⁺ Center Accelerator Division, J-PARC

※ Research Staff on Loan

目 次

1. はじめに	1
2. キャプセルの非破壊検査とその概要	1
2.1 放射線透過検査	2
2.2 浸透探傷検査	4
2.3 超音波探傷試験	5
3. 今後のキャプセルの放射線透過検査の適用について	5
3.1 内部構造確認	5
3.2 放射線透過試験法によるキャプセルの内部構造確認についての試行	6
4. まとめ	8
謝辞	8
参考文献	8
附録 現在の JMTR キャプセル等検査基準の概要	22

Contents

1. Introduction	1
2. Present Non Destructive Tests of Capsules	1
2.1 Radiographic Test	2
2.2 Penetrant Test	4
2.3 Ultrasonic Examination	5
3. Future Application of Radiographic Test for Capsules	5
3.1 Confirmation for Internal Parts of Irradiation Capsules	5
3.2 Examination of Confirmation Procedure for Internal Parts of Capsule	6
4. Summary	8
Acknowledgements	8
References	8
Appendix Outline of the Inspection Standard of Capsules for JMTR Irradiation Tests	22

1. はじめに

材料試験炉 JMTR (熱出力 50MW) は 1968 年に臨界し、1970 年から共同利用運転が行われている。現在では主に、軽水炉材料の研究、核融合炉材料の開発、大学による基礎基盤研究、及び R I 生産のため照射試験に利用されている。JMTR を用いた照射試験では照射試料と、主にキャプセルと呼ばれる容器に封入し炉心内に装荷して照射を行う方法と、キャプセルよりも小型なラビットと呼ばれる容器に封入し、それを水力ラビット照射装置により JMTR 運転中の任意の時間に炉心内に装荷、取出しを行うことにより照射する方法がある。

キャプセル及びラビット (以下キャプセル等と略記) は、炉心に装荷する前に、炉心に装荷された場合の炉心配置及び安全性、キャプセル等自体の安全性が確認される。炉心配置に対する安全性は、対象とするキャプセル等が炉心に装荷された場合に炉心に投入される反応度、過剰反応度、停止余裕等の運転制限値を越えていないことについて主に核計算コードにより確認している。

一方でキャプセル等自体の安全性については、キャプセル等が炉心に装荷されている期間において、破損、照射試料の脱落等により炉心に影響を与えないように製作されているかどうかについて確認している。国内で年間数十本 (2005 年度の実績では 40 本) のキャプセル等を製作し、照射試験を実施している試験研究炉は JMTR のみである。キャプセル等に必要な検査は、保安規定に基づいて定められた「JMTR キャプセル等検査基準」¹⁾に従って実施している。特にキャプセル等の健全性を確認する上で重要な溶接部については、耐圧検査やヘリウム漏れ検査に加えて非破壊検査を実施している。

JMTR は 2006 年 8 月に一旦運転を停止し、その後約 4 年間かけて改修を行い、2011 年度から運転を再開する計画である。JMTR の運転再開後は、先進的な照射試験をこれまで以上に安全かつ精確に実施することが要求されるが、このためには、キャプセル等の設計製作技術のみならず、製作されたキャプセル等の健全性を確認するための技術が不可欠である。

そこで本報では、現在の JMTR に装荷するキャプセル等についての非破壊検査について概説するとともに、今後 JMTR で照射試験を行う場合のキャプセル等の検査方法について検討した結果を報告する。

2. キャプセルの非破壊検査とその概要

JMTR で照射試験を行うためのキャプセル等の検査には、照射試料検査、部品検査、中間検査、最終検査、受入検査等があり、各々の検査においては、JMTR キャプセル等検査基準に従い、材料検査、外観検査、寸法検査、重量検査、表面密度検査、真直度検査、超音波探傷検査、渦流探傷検査、放射線透過検査、エチレングリコール検査、標示検査、照射履歴検査、耐圧検査、ヘリウム漏れ検査、絶縁抵抗検査、導通検査、浸透探傷検査、機能検査、構成確認検査等を組み合わせて行っている。それらのうち主な非破壊検査は、放射線透過検査、浸透探傷検査及び超音波探傷検査であり、これらの非破壊検査の概要、実施方法等について次に示す。

2.1 放射線透過検査 (RT)

キャプセル概略図と主な溶接部の撮影法を図 1 に示す。JMTR で照射試験を行うキャプセルは外筒、上部端栓、下部端栓、レジューサから構成される。また、照射試験中に試料部の温度をオンラインで測定するための熱電対その他の計装がされたキャプセルの場合には、計測線を引出すための保護管が追加される。キャプセルを構成する部品は、そのほとんどが円筒状であるため、内部のロウ付け部を除けば、基本的に全て円周溶接により組立てられる。

キャプセルの放射線透過検査において、一般的な配管と異なるのは、その内側に照射試料等の充填物が存在することである。そのため、次に示す撮影方法を適宜選択して検査を行っている。

- (1) 二重壁両面撮影
- (2) 二重壁片面撮影
- (3) サイド判定撮影
- (4) 内部確認のための撮影

具体的には、キャプセルの製作工程において、放射線透過検査を実施する場合に照射試料等の充填物が排除できるときは、通常は二重壁両面撮影により撮影を行うが、対象となる溶接部が突合せ溶接ではなく、全てソケット型の差込溶接となっている場合には、撮影配置によりビードの影と差し込みしろの影が重なることがあるため、二重壁片面撮影により撮影を行う。

照射試料等の充填物が排除できない場合には、サイド判定撮影により撮影を行う。

2.1.1 二重壁両面撮影

二重壁両面撮影は、管の円周溶接継手の撮影方法として、JIS Z 3106-2001「ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法」附属書 2 に規定されている撮影方法である。二重壁両面撮影の撮影配置を図 2(a) に示す。

この撮影方法は、管の外径が 100 mm 以下に限定される方法で、溶接継手を含む平面に対して斜めに照射し、溶接部を楕円形のリング状になるように撮影する。これは、JIS Z 3106-2001 に斜めに照射するための X 線焦点の移動距離 S は規定されていないが、管径が細いほど大きくしないと、線源側とフィルム側のビードの影が重なってしまうため（リング状に写らなくなる）、線源側とフィルム側の影が区別できないことがある。

判定対象はリングの両脇部を除く線源側とフィルム側のビードの部分で、有効長さは規定されていないため、見えるところまでとなる。おおよそ全周の 1/3 程度であるため、全周撮影するためには 1 ビードにつき 3 方向から撮影する。

透過度計は原則として線源側、すなわち試験体のビードの上に置き、このときの識別最小線径の区分は P2 級を適用する。

レジューサと保護管の溶接部の撮影例を図 2(b) に示す。この撮影例は正常な溶接部であるが、溶け込み不良があった場合にはビードに沿って黒い線がリング状に現れ、ブローホール等の場合には黒点、割れは黒い線となって現れる。

2.1.2 二重壁片面撮影

二重壁片面撮影は、二重壁両面撮影と同じく、管の円周溶接継手の撮影方法として、JIS Z 3106-2001「ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法」附属書 2 に規定されている撮影方法である。二重壁片面撮影の撮影配置を図 3(a)に示す。

二重壁片面撮影は、二重壁両面撮影の場合とは異なり、斜めに照射するための X 線焦点の移動距離 S は、焦点-試験体間距離 $L1$ の 1/4 以下としなければならないことが JIS Z 3106-2001 に規定されている。

判定対象はフィルム側のビードの部分で、有効長さは全周の 1/6 以下と規定されているため、全周撮影するためには最低 6 枚撮影する必要がある。透過度計は原則として線源側、すなわち試験体のビードの上に置き、識別最小線径の区分は P1 級を適用する。

二重壁片面撮影の撮影例を図 3(b)に示す。この撮影例では、透過度計はフィルム側に置いているため F の記号をつけて撮影している。

キャプセルにおいては、二重壁片面撮影を行う部分は外筒と下部端栓の差し込み部分の溶接部のみであり、その場合の透過度計識別最小線径の基準となる母材の厚さ $t1$ の考え方を図 4 に示す。この場合の透過度計識別最小線径の基準となる母材の厚さは差し込まれる側の母材の厚さと差し込みしろの厚さの和を適用する。

2.1.3 サイド判定撮影²⁾

サイド判定撮影の撮影配置を図 5 に示す。この撮影法は、主に外筒と下部端栓、外筒と上部端栓、上部端栓とレジューサの溶接部に対して行い、撮影時にはキャプセルの周囲に散乱線防止治具、透過度計、フィルムマークを配置する。なお散乱線防止治具は、二重壁両面撮影、二重壁片面撮影に比べて透過厚の増加による散乱線の影響で識別限界コントラストが小さくなり、透過度計の識別最小線径の本数が減少するのを防止するために使用する。

サイド判定撮影で撮影する部位は、図 6 に示すように上下のビードの影が充填物の影と重なって観察ができなくなる部分を避け、充填物の陰にならない両脇部分である。透過度計識別最小線径の区分は平板の突合せ溶接部の区分 (JIS Z 3106-2001 附属書 1 表 5) に従い、母材の厚さはキャプセルの最大透過厚さ T としている。

ここで、最大透過厚さ T は図 7 に示すようにキャプセルの半径 r 、肉厚 t から三平方の定理を用いて

$$\text{最大透過厚さ } T = 2 \times \sqrt{r^2 - (r - t)^2} \quad \dots\dots\dots (1)$$

により求める。

(1)式から求めた最大透過厚さ T と同じ板厚の散乱線防止治具の上に透過度計を配置して撮影することで、透過写真の必要条件である透過度計識別最小線径を確認する。

サイド判定撮影によるキャプセル端栓溶接部の模式図及び透過写真を図 8 に、同じく圧接型のラビットの接合部分及び写真をそれぞれ図 9 に示す。

図 8,9 に示した透過写真は、各々正常な溶接部を示したものであるが、溶接部に溶け込み不足が生じている場合には、正常なものとは比べて内側部分に線状の影が写る。参考までに、正常な溶接部と溶け込み不足がある場合の模式図を図 10 に示す。

撮影については、 120° ずつ回転させ 3 方向から撮影している。なお、理論的には全周を全て撮影するためには無限に分割する必要がある、現実的ではなく、また溶け込み不足は一部分にだけ現れることはなく、全周に渡ってハッキリとしたライン状に写ることが多いことから 3 方向からの撮影で十分にカバーすることができる。

この撮影法は狭照射野撮影であるので、試験対象部以外を鉛板等で遮蔽することにより、像質が良くなる。図 6 に示した撮影配置の他にも、フィルム-試験体間の距離を大きくとることにより、散乱線を低減する方法³⁾ もあり（フィルムから試験体の見込み角度が小さくすることで散乱比が小さくなることによる）、図 11 に示すように試験体の下に板材の下敷き（試験体と同じ材質のもの）を入れて撮影することもある。なお、この場合、下敷きを入れた分だけ透過厚が増加するので透過度計識別最小線径の区分を適用する母材の厚さは「母材の厚さ=散乱線防止治具の厚さ T + 下敷きの厚さ T'」となる。

2.1.4 内部確認のための撮影

キャプセル等の場合には、単に溶接部の健全性を確認するだけでなく、キャプセル内に試料や部品が図面通り正しく組み込まれていることを確認しなければならない。そのためキャプセルの内部確認について、図 12 に示す撮影配置により、図 13 に示すように数箇所に分けて X、Y の 2 方向撮影している。実際に撮影したキャプセル及びラビットの透過写真を各々図 14,15 に示す。

図 14 に示したキャプセルは、JMTR の中性子スペクトルを評価するためのもので、キャプセルの中には放射化ワイヤのセットを配置している。放射化ワイヤのセットの内訳は、主に Al (Co が約 0.11% 含有)、Fe、Ti、Mn、Ni、Ta であるが、写真では部分的に確認することができる。この撮影写真では、中央部に白い線のようなものが写っているものが放射化ワイヤである。

図 15 に示したラビットもキャプセルの場合と同様に JMTR の中性子スペクトルを評価するためのもので、内部には放射化ワイヤのセットが配置されたものである。この撮影写真でもキャプセルの場合と同様に中央部に白い線のようなものが写っているものが放射化ワイヤである。ただし、写真左側の白い像は放射化ワイヤを Cd フォイルでカバーしたものであるが Cd フォイルの内部の放射化ワイヤまでは確認できない。

このように、これまで放射線透過試験により、確認できる範囲で内部構造を確認してきた。

2.2 浸透探傷検査 (PT)

キャプセルの浸透探傷検査は、JIS Z 2343-2001 の溶剤除去性染色浸透探傷試験 (II-C-d) に従って、キャプセル溶接部のうち上部端栓のロウ付け部以外、すなわち浸透液の除去処理が可能な部分について行う。

この検査は、基本的に JMTR において最も過酷な条件で照射試験を行うキャプセルについて実施されるものであり、現在、JMTR キャプセル等検査基準で要求されているのは、キャプセルの外筒が沸騰水と接する JMTR のシュラウド照射装置 (OSF-1) で使用するキャプセル (以下、

OSF-1 キャプセルと略記) の中間検査においてのみである。なお、OSF-1 キャプセル以外のキャプセル等の外筒は非沸騰の一次冷却水 (原子炉入口温度 49°C以下) と接している。

OSF-1 キャプセル以外のキャプセルについての浸透探傷検査として、JMTR キャプセル等検査基準における要求事項ではないが、再照射キャプセル (JMTR ホットラボにおいて、他のキャプセルで照射した材料試料をセル内において遠隔操作により別のキャプセルに組み込み照射試験を行うキャプセル) について行う場合がある。これは、主にセル内でキャプセルの組立を行う場合において、遠隔操作で溶接を行う場合である。このときの浸透探傷試験の状況を図 16 に示す。

この探傷方法は基本的に JIS Z 2343-2001 の溶剤除去性染色浸透探傷試験 (II-C-d) によるが、キャプセルに遠隔操作で現像材をスプレーした場合、均一に塗布するのは難しく、またセル内に現像材が散逸した場合にはそれを除去することが困難なため、ハケ塗りタイプの速乾式現像剤を採用している。試験対象部位は接近が不可能なため、トランシット、双眼鏡を使用して遮蔽窓の外から観察した。これにより、キズの有無を十分に把握することができることが確認できた。

なお、遠隔操作による浸透探傷試験の検討段階においては、浸透液の除去処理の際、拭き残しによる擬似模様が懸念されたが、実際に試験を行った際には拭き残しによる擬似模様は僅かであり、また一部現像剤の塗布が厚めになることはあったが、検査自体は十分可能であることを確認している。

2.3 超音波探傷試験 (UT)

JMTR の照射試験で使用されるキャプセル外筒の素材は薄肉ステンレス鋼管がほとんどであるが、JIS 規格では溶接部の超音波探傷試験の対象部の板厚は、6 mm以上必要とされており、またオーステナイト系ステンレス鋼の溶接部は音響異方性があるため、超音波の挙動が不安定となることもあり、キャプセルの溶接部には超音波探傷試験は適用していない。

しかし部品検査では、減肉等の欠陥の存在による局所的な照射脆化により破損することを防止するため、構造が単純で超音波探傷試験による検査が可能なキャプセル外筒管に限定し、試験を行っている。なお、外筒管の超音波探傷試験は素材の段階で、製鋼メーカーにより水浸法で実施される。

3. 今後のキャプセルの放射線透過検査の適用について

3.1 内部構造確認

JMTR を利用した照射試験において、キャプセル等の非破壊検査は、照射試験中のキャプセルに不具合が発生した場合においても外筒の保護により炉心の安全性を担保するため、主にキャプセルの外筒表面の傷の有無、溶接部の健全性を確認するために実施されてきた。

一方近年の照射試験技術向上により、照射試験後の中性子照射量等の照射条件のパラメータ評価において、放射線透過写真を利用した、キャプセル等の内部構造を確認するケースが増加してきている。この背景として、近年の照射試験では、中性子照射量、スペクトル、温度等の照射パラメータを精緻に制御または評価する照射試験が増加してきたことに伴い、照射試料形状の多様

化、熱電対や自己出力型中性子検出器その他の計装の増加、中性子スペクトル調整のための中性子吸収材の配置等、複雑な内部構造のキャプセルが増加してきたことが挙げられる。

照射パラメータを精緻に制御または評価するために、解析による高精度な予測、評価⁴⁾が行われる。しかし、設計図面に変更が表れないキャプセルの製作過程における照射試料の数の変更等に伴うスペーサ等の部品の配置、試料形状の変更や単純な部品の誤配置等があると、これらの影響により、照射パラメータの値が予測した値と大きく異なる場合がある。従って、照射試験の“品質”の観点から、キャプセルの組立てが完了した後において必要に応じて詳細な内部構造を検査し確認することは、今後の照射試験においては、非常に重要となる。

キャプセルの完成後に内部構造を非破壊で確認する方法としては、イメージングプレートを利用する方法があるが、本報では、現行の放射線透過試験の手法を工夫することにより、どの程度まで内部構造を確認することができるか、について検討した。

3.2 放射線透過試験法によるキャプセルの内部構造確認についての試行

現行の放射線透過試験の手法により、どの程度までキャプセルの内部構造を確認することができるかを検討するため、X線強度を変えたときの透過写真の写り方を示す簡単な実験を行った。

キャプセルはステンレス鋼またはアルミニウム製の外筒、その内側に試料部の温度調整用の発熱体（熱媒体）又はヒータ等、試料ホルダ、試料等から構成されている。そのため、まず、図 17 に示すように、キャプセルの外筒を模擬したステンレス鋼製の管 A（ $\phi 60\text{mm}$ 、厚さ 2mm）の内部にインナキャプセル又は試料部温度調整用の熱媒体を模擬したステンレス鋼製の管 B（ $\phi 40\text{mm}$ 、厚さ 1.5mm）を用意し、比較のため B の管を A の管に半分だけ挿入し、さらに試料スペーサを模擬したアルミニウム製のブロック（ $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 70\text{mm}$ ）を配置した。そこに、試料に見立てたアルミニウム製のフルエンスモニタを 4 個用意し、そのうち 2 個はアルミブロックの上、残りの 2 個は A と B の管内にそのまま配置した。

X線は 2 個のアルミニウム製ブロックの間に真上から（焦点-フィルム間距離 800 mm）、X線発生装置の管電圧をパラメータにして撮影した。管電圧は 100kV、120kV、140kV について行った。このときの電流値及び撮影時間は、5mA 及び 1 分とした。

撮影結果を図 18 に示す。管電圧が 100kV の場合には、ステンレス鋼管 B 内のアルミニウム製ブロックを透過する管電圧であったため、図 18(a) に示すように配置した 4 本全てのフルエンスモニタが確認できてはいるが、管 B 内は濃度が薄いためコントラスト（濃度差）が低く、あまり識別しやすい写真とはいえない。内部を確認するには十分だが全体的に濃度が低い。

管電圧が 120kV の場合には、図 18(b) に示すように、全てのフルエンスモニタが確認できるが、この中で最も識別しやすかったのは、ステンレス鋼管 A のアルミニウム製ブロック上のフルエンスモニタであった。ステンレス鋼管 A の左側に配置したフルエンスモニタは濃度が濃く、ステンレス鋼管 B 内に配置したものは濃度が薄い。それでも 100kV の写真と比べれば全体的に濃度が濃く、識別しやすい範囲にある最も良く撮れた写真といえる。

次に管電圧を 140kV とし、透過力を上げた場合には、図 18(c) に示すように、より密度の高い、又は透過厚の厚い部分まで識別しやすくなったが、同時に密度の低い部分や透過厚の薄い部分の濃度は必要以上に濃くなり、管 A 内にそのまま配置したフルエンスモニタは識別できなかった。

次に、図 17 においてアルミニウム製のブロックを同じ寸法のステンレス製のブロックに置き換えて撮影した結果を図 18(d)に示す。このときの管電圧は 160kV である（電流値及び撮影時間は、5mA 及び 1 分）。この場合は、僅かにステンレス鋼管 A 内のステンレス製ブロック上のフルエンスモニタが確認できた。これは、ステンレス鋼の方がアルミニウムより密度が高いため、X 線が透過しにくいことによる。しかし、それ以外のフルエンスモニタは透過力が強すぎたり、逆に遮蔽されたりしてコントラスト（濃度差）が得られないため識別できなかった。

またステンレス製ブロックの濃度分布に着目すると透過厚はほとんど差がないはずなのに周辺部の濃度が中央に比べて高い。これは周辺部が散乱線の影響を受けているためである。

二つのブロックのうち、特に管 A 側が強く影響を受けており、これは管 A 側のブロックの方がフィルムに近いと推測できる。ブロックの幅がもう少し小さければフルエンスモニタ周囲の濃度も変わるため、識別コントラストに影響する可能性がある。

これらの実験を含めた検討結果から、キャプセルの内部構造をある程度詳細に確認するためには、コントラスト（濃度差）を増加させ、散乱線の影響を最小限に抑えることが必要であり、その方法としては大きく次に示すものがある。

(1) 着目する物体とその周囲のコントラスト（濃度差）が最大になる適切な濃度の設定

キャプセルを撮影した時、周囲に対して着目する物体のコントラストが最大となる濃度が存在する。そのためキャプセルを仮撮影した後、X 線フィルム又は管電圧の特性曲線から着目する物体を透過した部分の濃度が最適（濃度値 2.5）⁵⁾ となるような撮影条件（管電圧、照射時間）を決定することが必要である。

(2) 散乱線防止対策

密度が高い物質を透過させるには、対象とする物質にあわせて管電圧を調整しなければならない。しかし、管電圧を上げて X 線のエネルギーを増大させるとコンプトン効果の寄与が高まり、散乱線の影響も大きくなる。このため散乱線の影響を最小限に抑え、狙い通りの濃度を得るための工夫が必要である。撮影時にはキャプセルの周辺部が強く散乱線の影響を受けるため、例えば、サイド判定撮影と同じようにキャプセルの左右を板材等で挟む、又は撮影したい部分をキャプセルの中心線上に写るように配置するのも有効である。

この撮影方法は、基本的に現行の非破壊検査において、放射線透過試験における手順をあまり増加させることなく、実施することが可能である。

4. まとめ

現在、JMTRにおいて使用するキャプセルのための非破壊検査の方法について概説すると共に、今後必要とされる非破壊検査について検討した。

その結果、今後の非破壊検査においては、最近のJMTRにおける照射試験の動向から、原子炉の安全性に加えて、照射試験の“質”を高める観点から、新たにキャプセル等の内部構造を完成後に非破壊検査により確認することが必要である。そのための検討を行った結果、現在のJMTRのキャプセルのための放射線透過試験の手法を利用することにより、あまり検査のための手順を増加させることなく、ある程度の内部構造の確認ができることがわかった。

謝辞

本報告書の作成に際し、ご指導を頂きました新見素二・材料試験炉部長、内容について貴重なご意見を頂きました中島照夫・大洗研究開発センター副所長、並びに資料の提供に関して多大なご協力を頂きました材料試験炉部関係諸氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター：“JMTR キャプセル等検査基準” ,(2005)
- 2) 大岡紀一、他：私信 (1984)
- 3) 社団法人 日本非破壊検査協会：“放射線透過試験Ⅲ” , p 9-10, (2002)
- 4) 日本原子力研究開発機構：“未来を拓く原子力 原子力機構の研究開発成果 2006” ,p140,(2006)
- 5) 社団法人 日本非破壊検査協会：“放射線透過試験Ⅱ” , p 59-61, (1999)

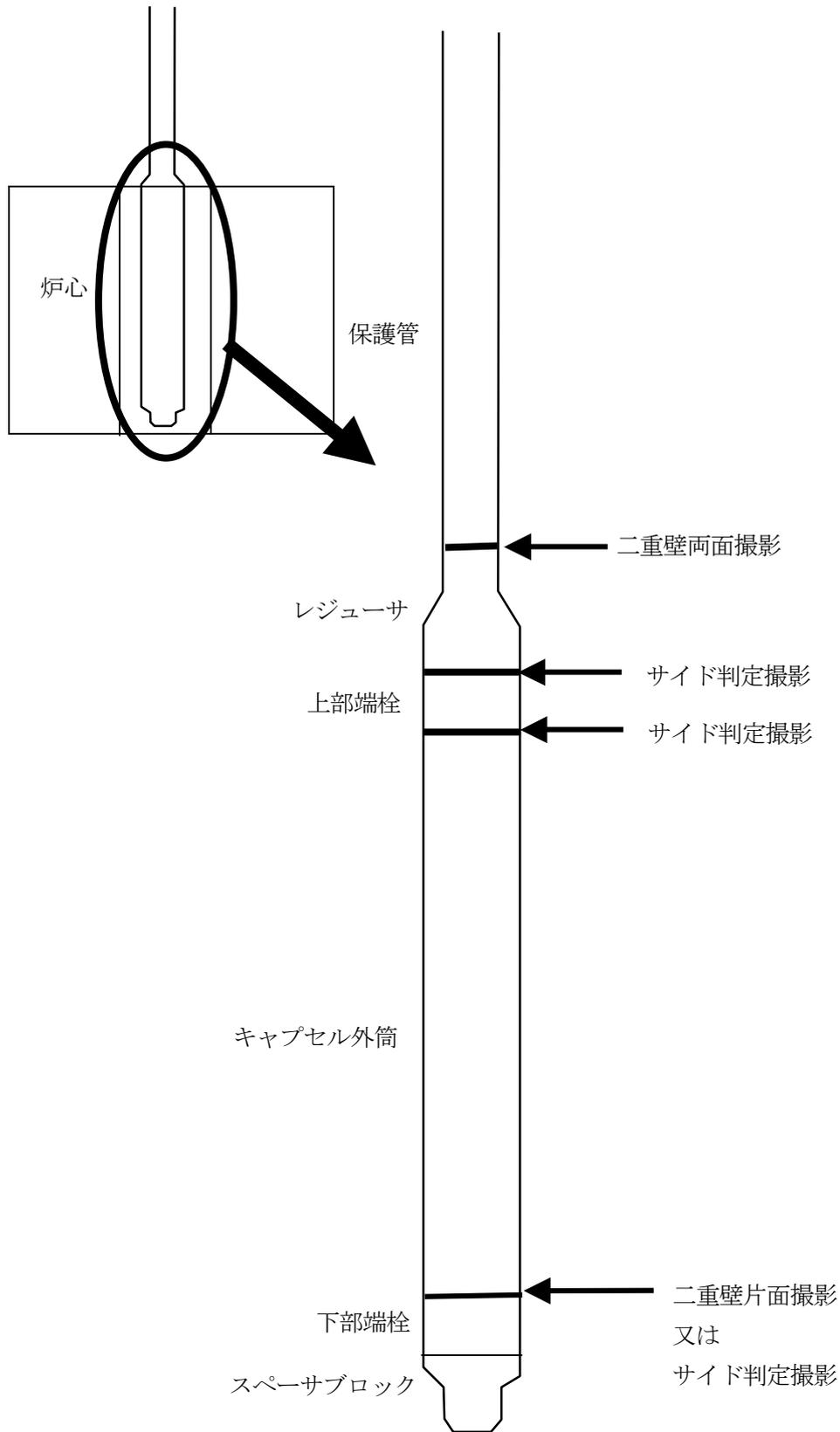
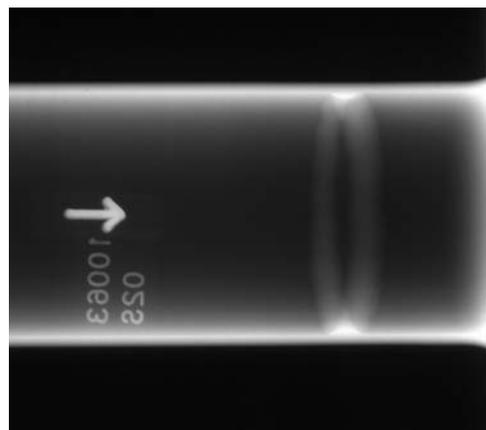
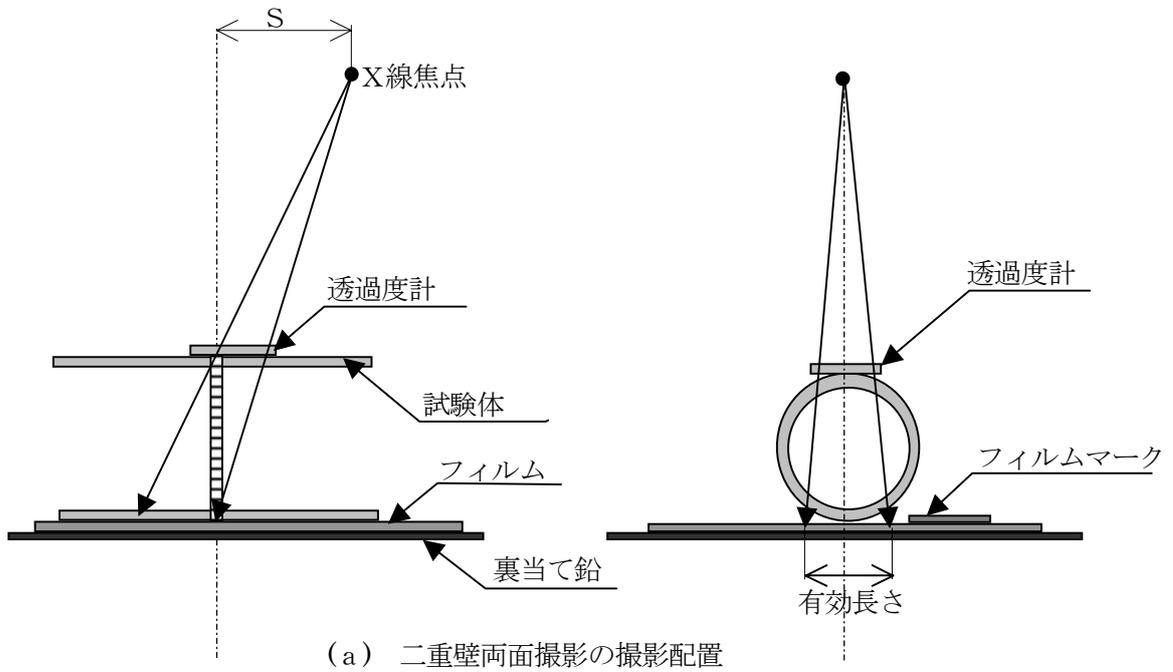
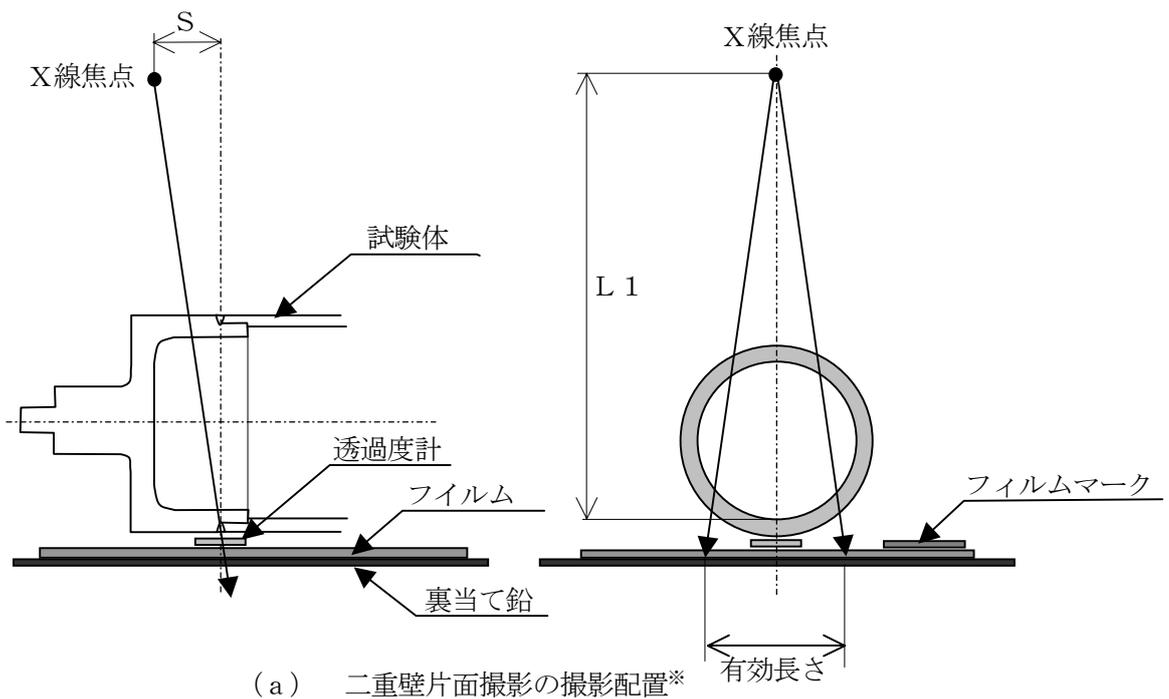


図1 主な溶接部の撮影法



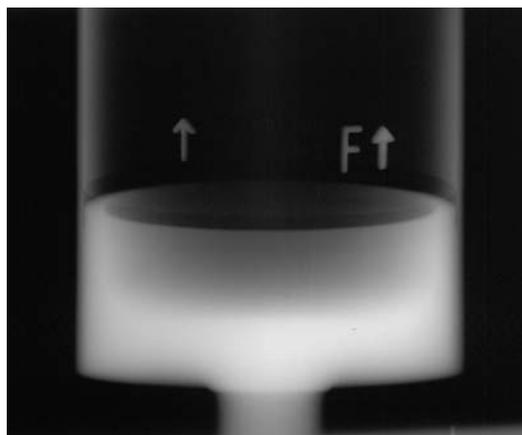
(b) 二重壁両面撮影により撮影したレジューサと保護管の溶接部

図2 二重壁両面撮影



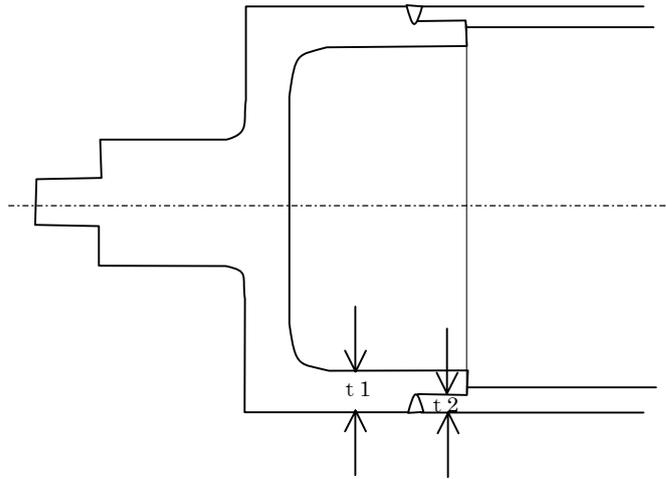
※二重壁片面撮影を選択する場合の理由

下部端栓の差込しろの長さが短いと、図3(a)よりもX線焦点を左にすると、上のビードの影と下の差込しろの端の影が重なって観察しにくい写真となる。一方で図3(a)よりもX線焦点を右にすると、上のビードの影が差込しろの端よりも手前になるため、二重壁両面撮影が可能な範囲は存在するが、ほとんどリング状の像にならずにつぶれたような形に写る。(不可ではないが不恰好である。) それよりさらに右にすると、上のビードの影と下のビードの影が重なるため判別できなくなる。以上の理由から二重壁両面撮影は適切でなく、フィルム枚数を増やすことになっても下側のビードのみを対象とした二重壁片面撮影が用いられる。



(b) 二重壁片面撮影により撮影したキャプセル外筒と下部端栓の溶接部

図3 二重壁片面撮影



図のような差し込みの溶接部においては、実際の溶接部の厚さは t_2 となるが、これを母材厚 t_1 同士の突合せ溶接と考え、そのうち厚さ $(t_1 - t_2)$ までは確実に欠陥が存在しないものとして取扱う。従って透過度計識別最小線径の区分には母材厚 t_1 を適用する。

図4 透過度計識別最小線径の基準となる母材の厚さ

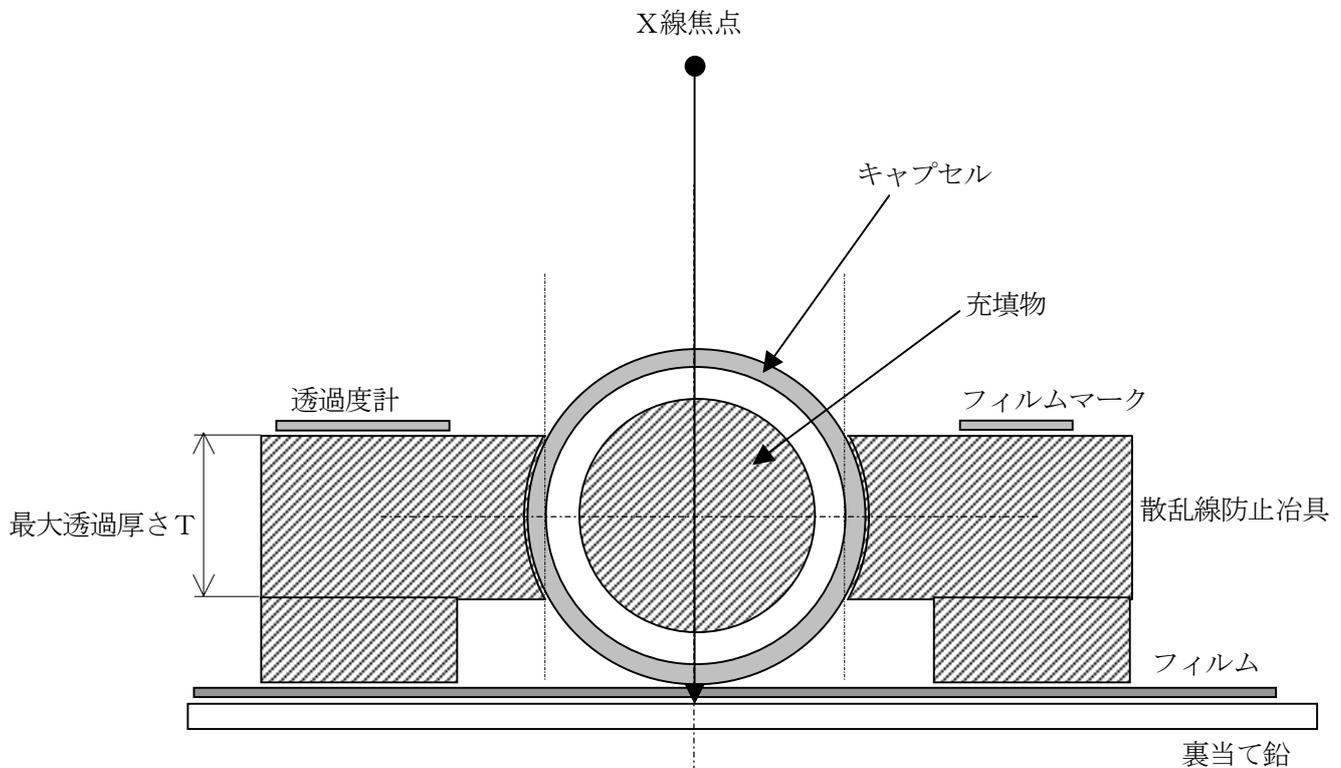


図5 サイド判定撮影の撮影配置

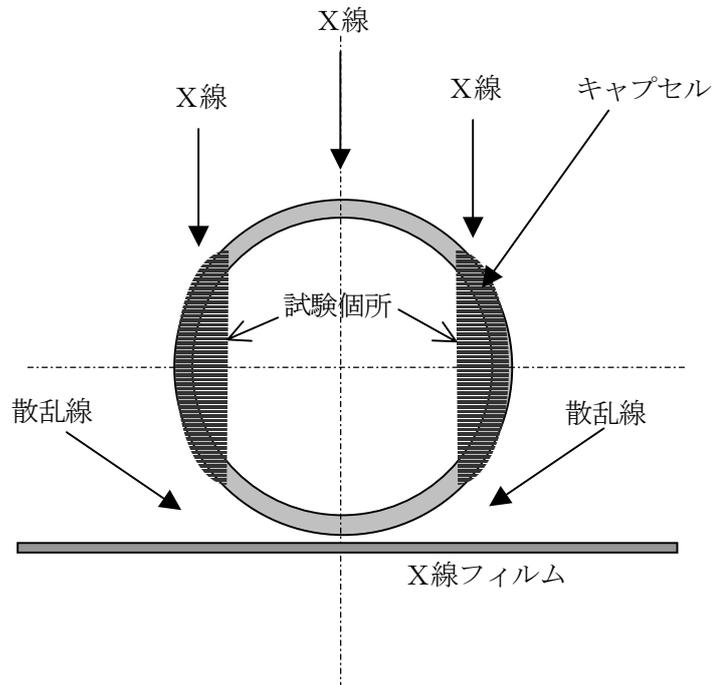
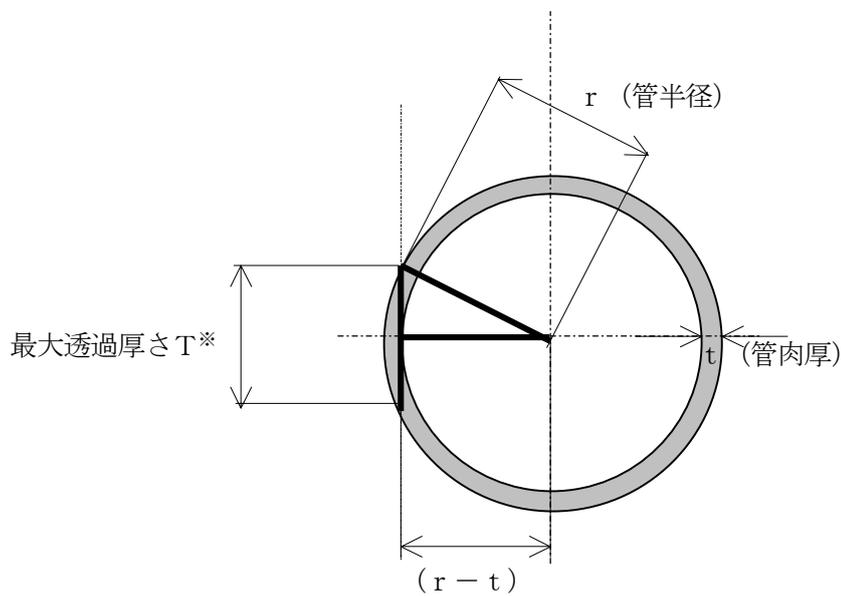


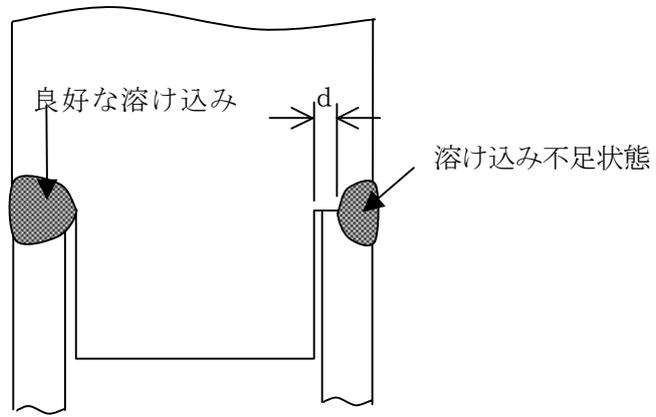
図6 サイド判定撮影の対象となる試験箇所



$$\text{最大透過厚さ } T = 2 \times \sqrt{r^2 - (r - t)^2}$$

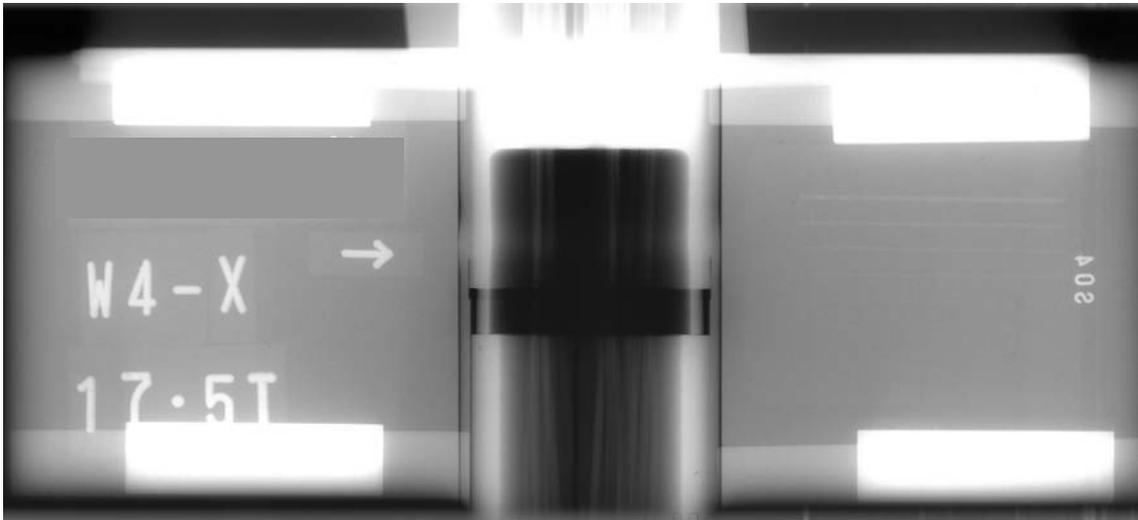
※最大透過厚さT=透過度計識別最小線径の基準となる母材厚さ

図7 最大透過厚さの求め方



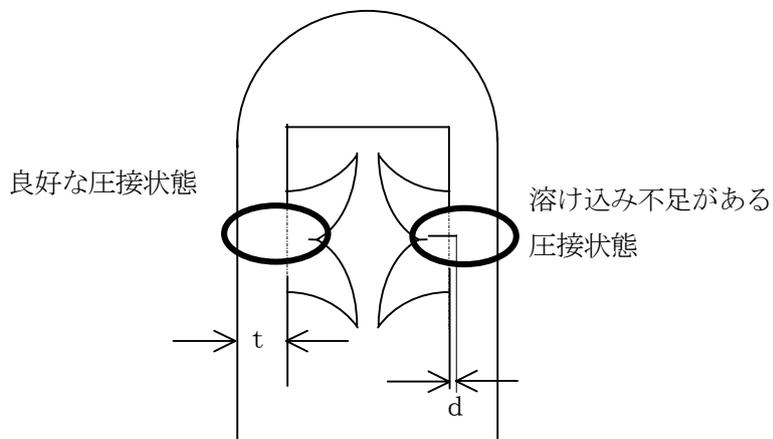
(a) キャプセル端栓溶接部の溶け込み不足

サイド判定撮影によって端栓に外筒を押し込んだ溶接部分を撮影した模式図。少なくともキャプセル外筒の母材厚までは完全に溶け込んでいなければならないので、 d に有意値が見られる場合は溶け込み不足と判断する。



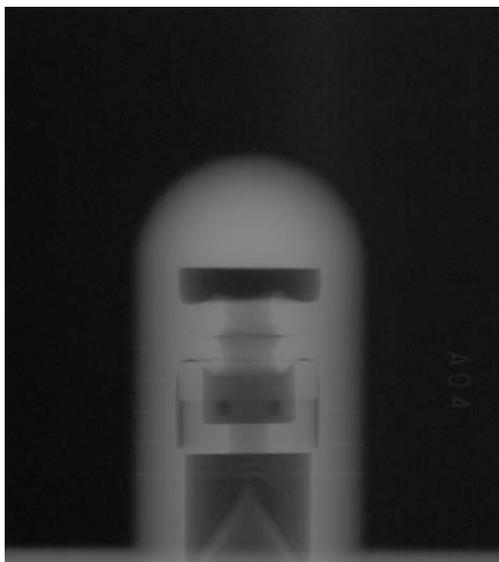
(b) サイド判定撮影
(キャプセル本体と上部端栓の溶接部の正常な場合の撮影例)

図8 キャプセル端栓溶接部



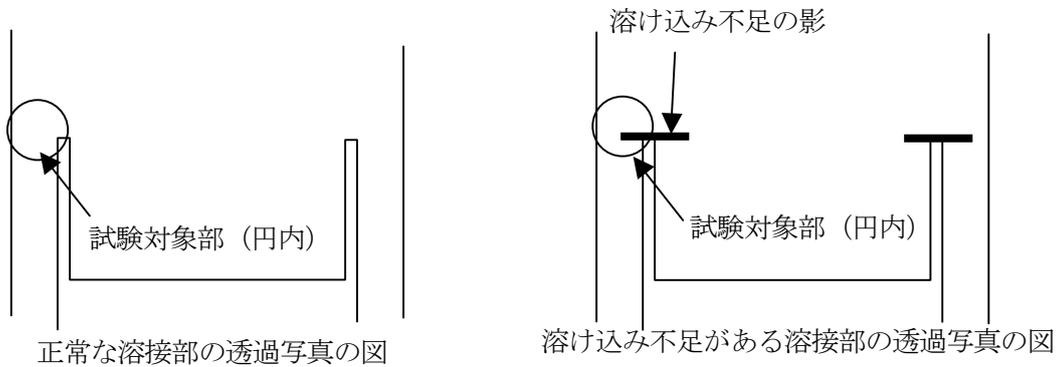
(a) ラビット圧接部の溶け込み不足

圧接で製作するラビットは、摩擦熱で溶けて押し込まれた蓋と本体の母材の一部が本体の内側と外側にはみ出て余盛を形成する。
 外側は仕上げのため切削するが、内側はそのまま残り、図9のようになる。
 圧接部の肉厚は本体側の肉厚 t (外径と内径の差) 以上必要であり、 d に有意値が見られたときは溶け込み不足 (必要厚さ接合できていない) と判断する。



(b) サイド判定撮影
 (圧接型ラビットの圧接部の正常な場合の撮影例)

図9 圧接型ラビットの圧接部



正常な溶接部 (左図) : 溶接部が完全に溶け込んでいるため、円内の部分には何も写らない。
 溶け込み不足がある溶接部 (右図) : 溶け込み不足はほぼ全周に渡って線状の影となって現れる。
 本来、右と左の溶け込み不足の影は繋がっているが、実際には充填物に遮蔽されて内側の影は写らない。

図 10 正常な透過写真と溶け込み不足がある透過写真の違い

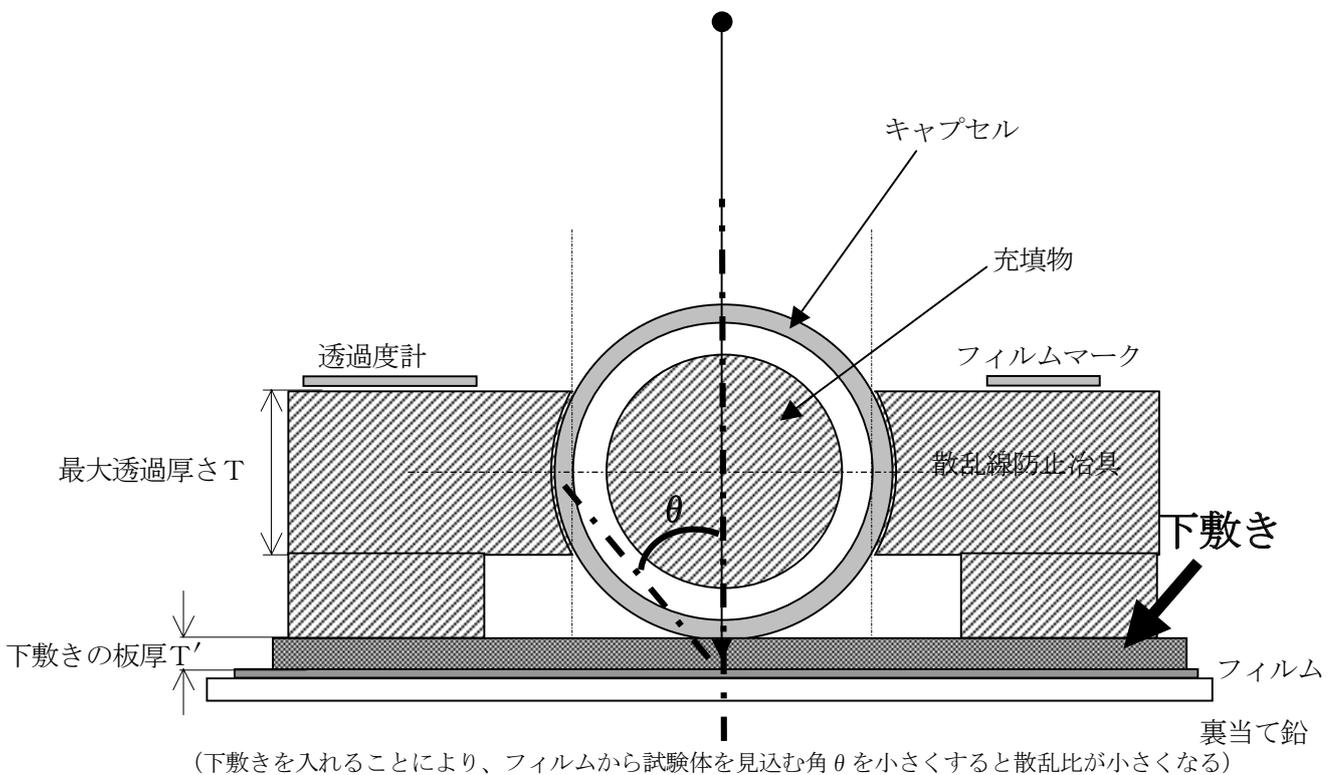


図 11 サイド判定撮影の撮影配置その 2

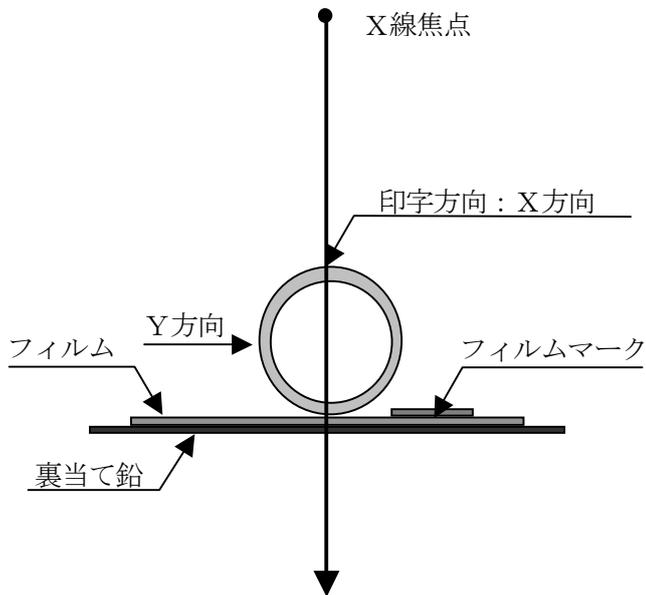


図12 内部確認の撮影配置

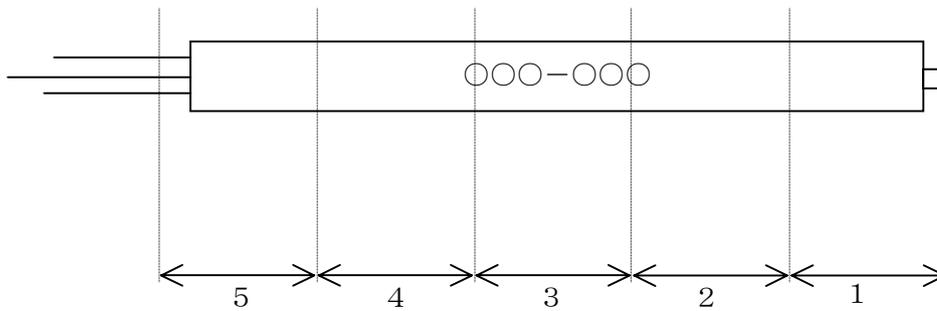
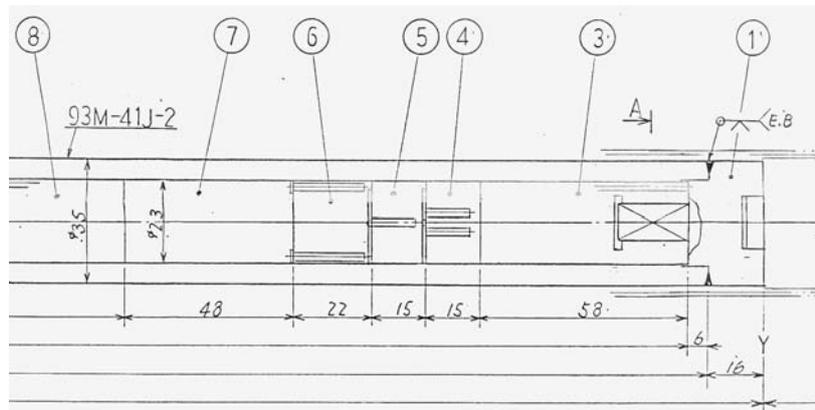


図13 内部確認撮影の分割方法

キャプセル印字部を真上とし、各2方向 (X, Y)

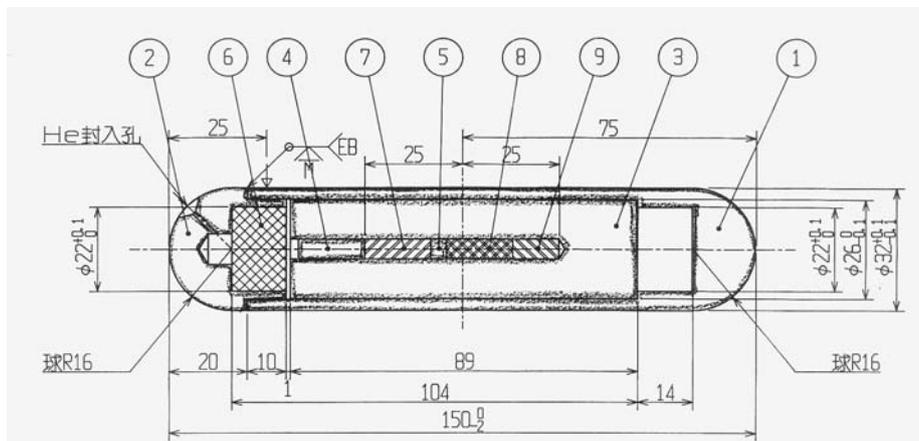


(a) キャプセルの設計図面例



(b) キャプセルの撮影例

図 14 キャプセル内部確認



(a) ラビットの設計図面例

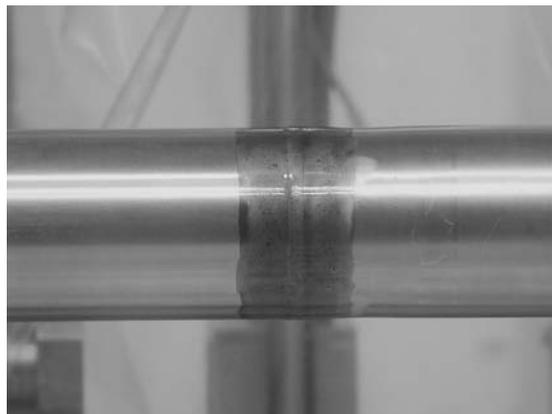


(b) ラビットの撮影例

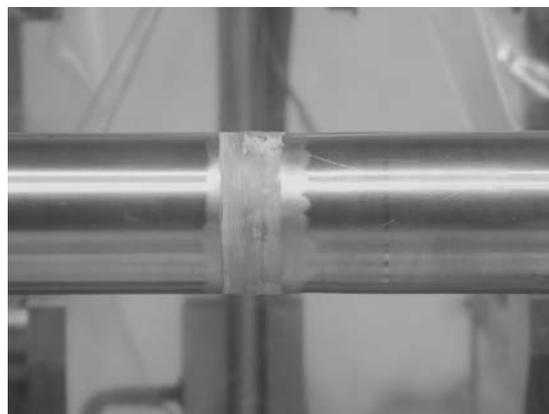
図 15 ラビット内部確認



(a) セル内遠隔作業風景（浸透液を塗布した状態）



(b) 浸透液を塗布した試験対象部



(c) ハケ塗り式の現像材を塗布した試験対象部

図 16 ホットラボにおけるセル内遠隔操作による浸透探傷試験

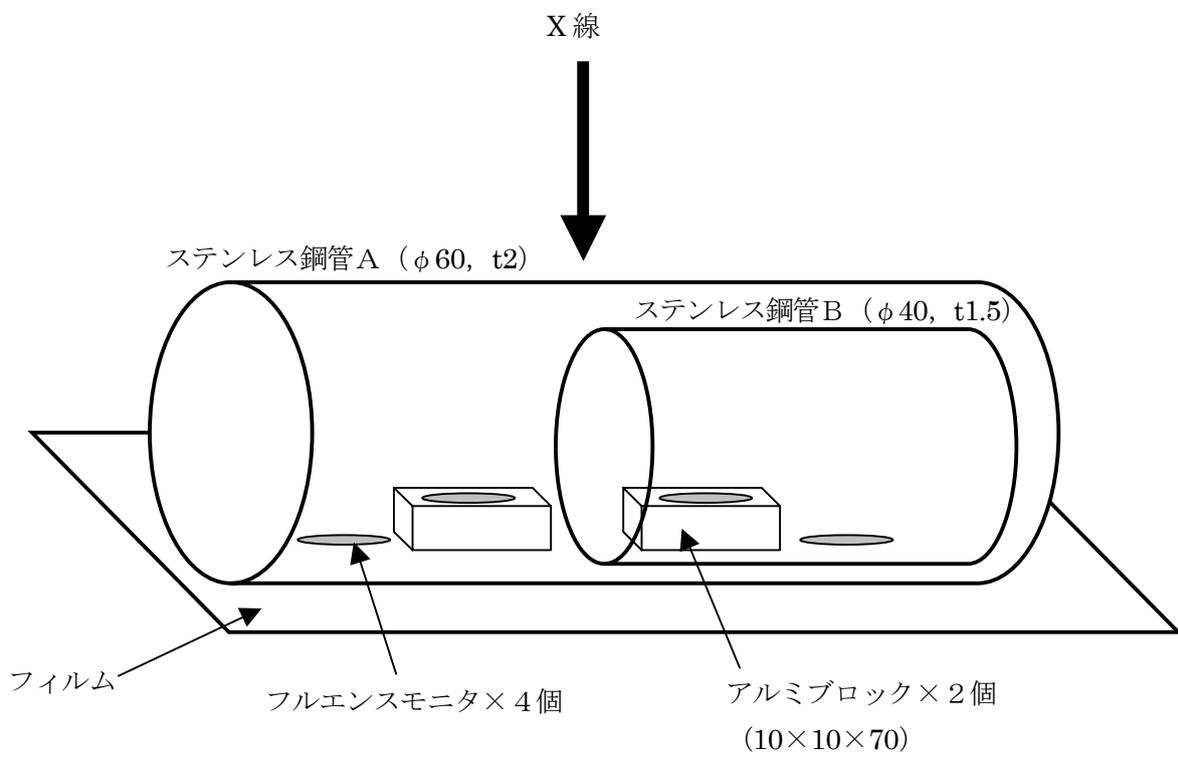
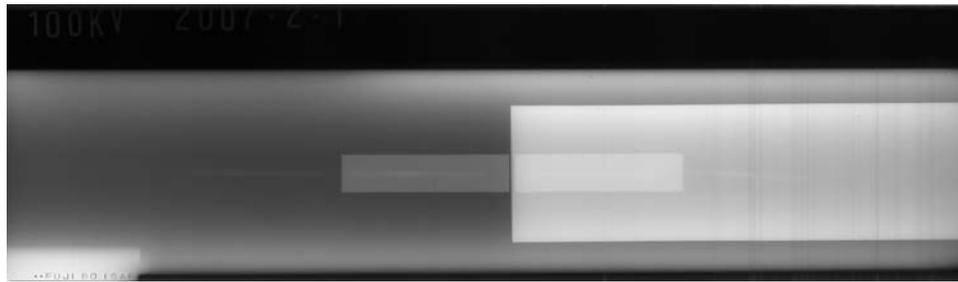
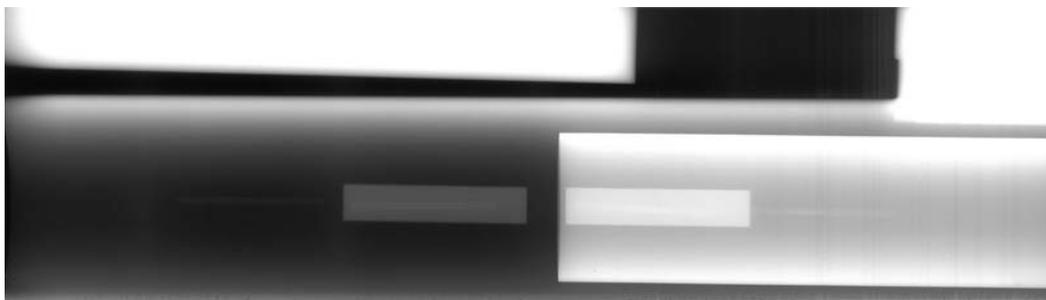


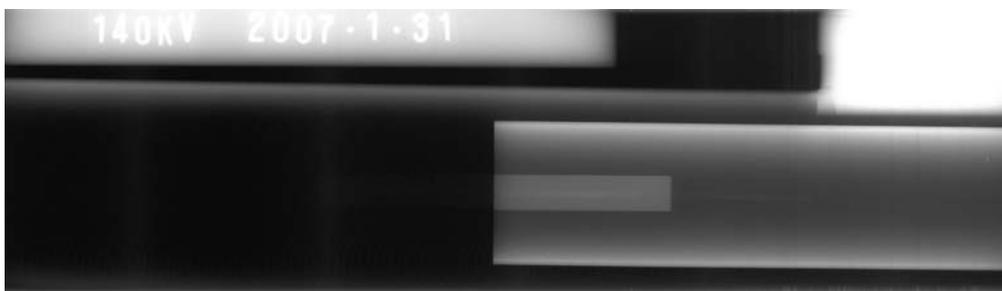
図 17 キャプセルの内部構造の確認のための検討の実験体系



(a) 管電圧 100 k V 5mA 1min (アルミニウム製ブロック使用)



(b) 管電圧 120 k V 5mA 1min (アルミニウム製ブロック使用)



(c) 管電圧 140 k V 5mA 1min (アルミニウム製ブロック使用)



(d) 管電圧 160 k V 5mA 1min (ステンレス鋼製ブロック使用)

図 18 内部確認に関する実験の撮影結果

附録 現在の JMTR キャプセル等検査基準の概要

1 材料検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(1)

材料検査は、製造メーカーが発行する材料検査成績証明書等による記録確認を行う。

[要領]

- ① JIS 認定工場又は公的試験機関（以下「公的機関等」という。）が発行したミルシート、分析記録等による記録確認とする。
 - イ. ミルシートに記載されている材質が、部品に使用している材料の材質と一致していることを自主検査記録及び承認図により確認する。このとき、JIS 規格の番号及び必要に応じて制定年号を確認のこと。
 - ロ. ミルシートに記載されているチャージ番号、ロット番号、素材寸法等が、部品に使用した材料と一致していることを自主検査記録により確認する。必要に応じて、素材の刻印又はステンシルと照合する。
 - ハ. 化学分析結果と JIS 規格（適用した規格の制定年号に注意すること）の基準値を照合する。外国規格を使用する材料については、必要に応じて、その規格を提示させる。

[注]

- (イ) 製品分析を行った材料については、試料採取位置により分析結果のバラツキがないことを確認する。
 - (ロ) Co が検出されている場合で、含有量の指定がないときは、設計者に確認すること。
- ニ. 材料試験結果は、上記「ハ」に準じて確認する。
 - ホ. 表面状態、非破壊検査結果等を確認する。
 - ヘ. 材料に履歴がある場合は、前歴も確認する。（例：引抜き管の製造メーカーでの検査）
 - ト. 品質保証管理担当者等のサインを確認する。
- ② 材料検査成績証明書の入手が困難な場合は、その材質等を示すカタログ等による記録確認とする。
 - イ. 市販品の場合は、カタログ等に表示している材質について、関連する規格と照合する。
 - ロ. 照射試料の場合は、キャプセル等受入審査資料（以下「受入審査資料」という。）と照合する。（開示制限の分析記録であっても、原則として、提示を求める。）

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(1)

材料検査は、製造メーカーが発行した材料検査成績証明書等の内容が、所定の規格値等を満足していること。

[補足]

- ① 公的機関等が発行したミルシート、分析記録等による記録確認の場合は、次による。
 - イ. 使用した材料の材質が承認図等と相違ないこと。
 - ロ. 原則として、素材製造時に適用した規格・基準に適合していること。
 - ハ. ミルシート、分析記録等の発行日及び発行者が明らかであること。
 - ニ. ミルシート、分析記録等の照合日及び照合者が明らかであること。
- ② カタログ等による記録確認の場合は、次による。
 - イ. 原則として、①に準ずる。
 - ロ. 照射試料については、受入審査資料と一致していること。

2 外観検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(2)

外観検査は、自然光又は白色光のもとで、目視等により行う。

[要領]

- ① 承認図との照合を行い、加工ミス、バリ、面取り等の有無について観察する。
- ② 目視及び触手（白色綿手袋等）により検査対象物表面のすりきず・へこみの有無、油脂類、塗料、錆、スケール、汚れ、表面あらさ等を観察する。また、必要に応じて、光学機器等を使用する。
 - イ. 表面あらさは、必要に応じて、比較用表面あらさ標準片又は表面あらさ計を使用する。
 - ロ. キャプセル保護管の原子炉ノズルフランジを貫通する部位（シール部）については、きず及びバリ等について、詳細に観察する。
 - ハ. 燃料ペレット等については、必要に応じて、標準欠陥と対比する。
- ③ 溶接部表面は、溶接ビード及び熱影響部の仕上り状態を観察する。
 - イ. きず、着色等の有無を確認する。
 - ロ. 必要に応じて、溶接ビードの幅及び高さを測定する。
- ④ 特記事項
 - イ. 石英管等に封入された試料等で、内部確認が困難な場合は、試料及び構成物の写真と試料検査一覧表及び受入審査資料との照合を行う。

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(2)

外観検査は、次の事項に適合すること。

- イ. 表面は十分に清浄であり、錆、油脂、塗料等が付着していないこと。
- ロ. 表面に割れや有害なきず等の欠陥が認められないこと。
- ハ. 表面あらさは、検査要領書又は承認図に記載されたとおりであること。

[補足]

- ① 形状、仕上り状態及び員数が、承認図又は検査要領書と一致していること。
- ② きずの有害性については、種類、存在場所及び使用条件等によって異なるので、基本的なことのみに以下を示す。必要に応じて、設計者と協議して判定する。
 - イ. 割れがないこと。
 - ロ. 割れ以外のきず（線状きず、丸みを帯びたきず、欠け、打ちきず、へこみ、偏平等）については、以下による。
 - (イ) 原則として、線状きず及び欠けがないこと。
 - (ロ) 開先部、嵌合部、シール部等には、きずがないこと。
 - (ハ) 標準欠陥と対比した場合は、標準欠陥以下であること。
- ③ 表面あらさは、承認図又は検査要領書に記載された指定仕上げ以上であること。
- ④ 溶接部表面は、以下による。
 - イ. 割れ及び有害なきずがないこと。
 - ロ. アンダーカット等で有害なものがないこと。
 - (イ) 指示していない手直しが施されていないこと。
 - (ロ) 溶接止端部の処置が適切であること。
 - ハ. 異常な着色が認められないこと。
 - ニ. 溶接ビードの幅、高さ等が不均一でないこと。

3 寸法検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(3)

寸法検査は、検査対象物の主要寸法をノギス等を用いて行う。

[要領]

- ① 検査対象物の主要寸法を鋼尺、巻尺、ノギス、マイクロメータ、超音波厚さ計等の器具を用いて測定する。ただし、直接測定することが困難な場合は、限界ゲージ、計算等の間接的方法とする。
 - イ. 測定器は、校正が行われていることを確認する。
 - ロ. マグネスケール等を用いるときは、測定前、測定後等、適当な時期に 0 点等の確認を行う。
- ② 測定精度は、ノギスを用いる場合は 1/10mm、マイクロメータ及びシリンダーゲージを用いる場合は 1/100mm、鋼製直尺及び鋼製巻尺を用いる場合は 1/1mm を目安とする。
 - イ. 承認図に記載されている公差の範囲が測定可能な測定器を用いる。
- ③ 公差の指示がない寸法に対する公差は、JIS B 0405-1991「普通公差—第 1 部：個々に公差の指示がない長さ寸法及び角度寸法に対する公差」等に準じて行う。⁽⁵⁾
 - イ. 承認図又は検査要領書に記載されている公差の等級を確認する。

④ 特記事項

- イ. 外径及び内径の測定は、直角 2 方向を必要に応じて数カ所測定する。
- ロ. 照射試料と熱媒体、熱媒体と内・外筒などは、必要に応じて、挿入・取出しの確認を行う。

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(3)

寸法検査は、測定値が検査要領書又は承認図に記載された許容値内であること。

[補足]

- ① 公差範囲外の測定結果が得られた場合は、測定器を点検して再測定又は測定器を変更して再測定を行い、測定値を確認し判定する。
測定器を変更する場合は、一桁精度の良いものを用いるとよい。

4 質量検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(4)

質量検査は、天秤等を用いて行う。

[要領]

- ① 天秤等を用いて測定又は自主検査記録の確認とする。
 - イ. 照射試料及び部品の重量は、自主検査記録を確認する。
 - ロ. キャプセル及びラビットの完成時の重量は、原則として、立会いの上測定する。
- ② 直接測定するのが困難である場合は、計算等の間接的方法とする。
 - イ. OSF-1 キャプセルの完成時の重量は、部品重量測定結果の集計による。
- ③ 測定値の丸め方は、原則として JIS Z 8401-1999「数値の丸め方」による。⁽⁶⁾

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(4)

質量検査は、次の事項に適合すること。

- イ. 計測付キャプセル又は無計測キャプセルの重量は、空気中において 30kg 以下であること。
- ロ. ラビットの重量は、空気中において 130g 以上、600g 以下であること。
- ハ. OSF-1 キャプセルの重量は、空気中において 100kg 以下であること。

[補足]

- ① 判定基準は、キャプセル等の完成時の質量検査に適用する。
- ② 照射試料及び部品の重量は、測定値が適正であること。

5 真直度検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(5)

真直度検査は、すきまゲージ又はトランシット等を用いて行う。

[要領]

- ① 定盤を基準として測定し、部品等の全周及び該当する長さに対して求める。
 - イ. すきまゲージによる測定は、検査対象物を定盤上で転がして検査対象物と定盤との隙間をすきまゲージで測定する。測定値の最大値を真直度とする。
 - ロ. ダイヤルゲージによる測定は、以下のように行う。
 - (イ) 定盤に V ブロック (2 個) を置き、その上に検査対象物をのせる。
 - (ロ) 検査対象物を回転させ、その最大値と最小値の差の 1/2 を真直度とする。
- ② トランシットによる真直度測定は、原則として、以下のように行う。

[OSF-1 キャプセルの例]

- イ. OSF-1 キャプセル及び重りのついたピアノ線を天井から吊るす。
- ロ. OSF-1 キャプセルの側面を 800mm ピッチでマークする。
- ハ. ピانو線の上部・下部間を測定して、トランシットの垂直精度を校正する。
- ニ. 吊り金具上部側面を基準点として、800mm ピッチ毎にマークされた各点の角度をトランシットで測定し、記録する。
- ホ. 測定は、OSF-1 キャプセルの 0° 及び 90° の 2 方向について行う。
- ヘ. 基準点と測定点との水平方向変位 (l mm) は、OSF-1 キャプセルトランシット間距離 (L mm) 及び測定した角度 (θ 秒) より、計算によって求める。($L=10m$ とすると、1 秒 = $1/200,000$ となる。)

$$\text{計算式} : \theta = l / L$$

- ト. 各測定点の外径を実測し、測定値の 1/2 の数値に「ヘ」で求めた l を加える。
- チ. この値と基準点の半径との差 (軸線からの変位) を計算で求め、その値をグラフ化して真直度を求める。
- ③ 上記①又は②の方法で測定するのが困難な場合は、JMTR 技術課長の承認を得た測定方法で行う。

ただし、真直度測定治具を作成し検査に用いる場合は、あらかじめ JMTR 技術課の検査を受け、合格したものを使用することとする。

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(5)

真直度検査は、測定値が検査要領書又は承認図に記載された許容値内であること。

[補足]

- ① キャプセル外筒部は、0.3/全長以下とする。
- ② ラビットは、0.1/150 以下とする。
- ③ OSF-1 キャプセルは、外筒部で 1/3000 以下及び全長で 1/1500 (5.16/7744) 以下とする。

6 標示検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(6)

標示検査は、名称及び切断マークを目視により確認するとともに、主要寸法の測定をノギス等を用いて行う。

[要領]

- ① 印字及び切断マークについて、名称、位置、大きさ等を承認図と照合する。
 - イ. 切断マークについては、その位置寸法を測定する。
- ② キャプセル名称及び鏝の切り欠きの位置を承認図と照合する。
 - イ. キャプセルを炉心に装荷する時の位置決めで使用されるため、炉心方向を確認する。

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(6)

標示検査は、印字や切断マークが明確であり、それらの大きさ及び場所が検査要領書又は承認図に記載されたとおりであること。

7 ヘリウム漏れ検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(7)

ヘリウム漏れ検査は、「JIS Z 2331 ヘリウム漏れ試験方法」等に準じた方法で行う。

[要領]

- ① ヘリウム漏れ試験は、JIS Z 2331-1992 「ヘリウム漏れ試験方法」(7) に示す以下の方法を準用する。ただし、試験方法については、検査対象物に適合した方法とする。
 - イ. 真空外覆法
 - ロ. スニッフアー法
 - ハ. 加圧積分法
 - ニ. ベルジャー法
 - ホ. その他

- ② ヘリウム漏れ試験時は、次のことを確認する。(真空法の例)
- イ. バックグラウンドが安定していること。
 - ロ. 標準リークの値。
 - ハ. 検出感度の計算結果。
 - ニ. 検査対象部にヘリウム導入後、一定時間経過後の検出器の指示値。
- ③ 検査対象部からの漏れ量を求めた結果を確認する。

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(7)

ヘリウム漏れ検査は、ヘリウムの漏れ量が検査要領書又は承認図に記載された値以下であること。ただし、原則として、燃料試料の場合の漏れ量は $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下、材料試料の場合の漏れ量は $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下とする。

[補足]

- ① 必要に応じて次の判定基準を用いること。
- イ. 照射試料が燃料試料の場合は、 $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下。
 - ロ. 照射試料が材料試料の場合は、 $1 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下。

8 エチレングリコール検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(8)

エチレングリコール検査は、エチレングリコール溶液に検査対象物を浸漬して発泡の有無を確認するエチレングリコール試験法で行う。

[要領]

- ① 容器内を真空引きして検査対象物表面から発泡の形成の有無及び状況を観察する。
- イ. 発泡の形成が検査対象物表面に付着しているガスによるものか、欠陥部から発生しているものかを見極めること。
 - ロ. 検査対象物表面に付着しているガスによる発泡の形成が多く、欠陥部から発生しているものかの判断が困難な場合は、検査対象物表面を洗浄して、再度行う。

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(8)

エチレングリコール検査は、検査対象物の表面から気泡の発生がないこと。

[補足]

- ① 欠陥による気泡の発生がないこと。

9 耐圧検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(9)

耐圧検査は、検査対象物に気圧又は水圧をかけることによる加圧法で行う。

[要領]

- ① 検査対象物に圧力を加える方法で行い、変形の有無を観察する。また、溶接部等からの漏れの有無を圧力計及び発泡液等を用いて観察する。
 - イ. 水圧を加える場合は、原則として純水を用い、フィルターを通して注入する。
 - ロ. ガス圧を加える場合は、ヘリウム、窒素、アルゴン等を用いる。
- ② 耐圧検査は、検査要領書に記載された試験圧力及び時間で行う。

[参考]

- イ. 接続箱、ユニット及び案内管は、ガス圧で 2.2MPa まで加圧。
- ロ. キャプセル外筒部は、ガス圧で 0.49MPa まで加圧。

③ 特記事項

- イ. キャプセル保護管部は、加圧漏れ確認を行う。

[参考] ガス圧で 1.42MPa まで加圧。

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(9)

耐圧検査は、検査要領書又は承認図に記載された試験圧力に耐え、かつ有害な漏洩のないこと。

[補足]

- ① 変形のないこと。
- ② 圧力計の指示値は、漏れによる降下がないこと。
- ③ 溶接部等からの漏れによる発泡がないこと。

10 浸透探傷検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(10)

浸透探傷検査は、「JIS Z 2343-1 : 2001 非破壊試験—浸透探傷試験—第 1 部：一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様分類」等に準じて行う。

[要領]

- ① JIS Z 2343-1 : 2001 非破壊試験—浸透探傷試験—第 1 部：一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様分類⁹⁾ に示す以下の方法を準用する。ただし、試験方法については、検査対象物に適合した方法とする。

- イ. 染色浸透液（タイプⅡ）－有機溶剤（液体）（方法C）－速乾式（フォームd）
 - ロ. その他
- ② 溶接部の検査では、ビード部及び熱影響部を検査対象とし、JIS Z 2343-1 に示す一連の処理工程が完了した後、目視及び拡大鏡を用いてきずの有無を確認する。
- イ. 浸透指示模様が確認された場合は、必要に応じて、浸透指示模様の分類を行う。
 - ロ. 探傷試験方法に誤りがあった場合及び浸透指示模様がきずによるものか疑似指示か判断の困難な場合は、最初の工程からやり直す。
 - ハ. ビード部を削って再試験を行う必要が生じた場合は、設計者及び製作者の了解を得てから行うこと。
- ③ 素材及び加工部品の検査でも、②に準ずる。

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(10)

浸透探傷検査は、割れ、線状欠陥、円形状欠陥がないこと。

[補足]

- ① 開先部、外筒等の加工部品及び溶接部の検査では、浸透指示模様がいないこと。
- ② 素材の検査では、原則として、浸透指示模様がいないこと。
- ③ 総理府令第 74 号、旧 JIS 規格、通商産業省告示第 501 号⁽¹⁰⁾ 等の規格に示されている判定基準を用いて検査を行った場合は、その判定基準に従う。

1 1 放射線検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(11)

放射線検査は、「JIS Z 3104 鋼溶接継手の放射線透過試験方法」等に準じて行う。

[要領]

- ① 透過写真の撮影は、JIS Z 3104-1995 「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」⁽¹¹⁾ 等に準じた以下の方法で行う。ただし、試験方法については、検査対象物に適合した方法とする。
 - イ. 二重壁片面撮影方法
 - ロ. 二重壁両面撮影方法
 - ハ. サイド判定撮影方法⁽¹²⁾
 - ニ. その他の方法
- ② サイド判定撮影方法で透過写真を撮影する場合は、以下の点に留意のこと。
 - イ. 肉厚補償マスク等により散乱線防止措置を行う。
 - ロ. 溶接部の溶込み量が確認できる撮影配置とする。
 - ハ. 透過写真の濃度は、2.5 を目標とする。

- ③ 透過写真の観察は、暗室内等で明るい観察器を用いて行う。
- イ. 溶接部の検査では、撮影された透過写真により、透過写真の必要条件（識別最小線径、濃度範囲、試験部の有効長さ等）が満足していることを確認してから、きずの有無を確認する。
 - ロ. キャプセル等の内部確認のための検査では、撮影された透過写真により、照射試料等の状態、熱電対等の位置関係を承認図と照合する。
- ④ 溶接部にきずが存在する場合は、その形状、寸法等を測定する。また、きずの種類、寸法、形状等を確定する上で必要があれば、狭照射野撮影方法等により再撮影を行う。
- ⑤ 特記事項
- シース熱電対の検査は、溶接部に加えて必要に応じて測温接点の位置も調べる。

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(11)

放射線検査は、次の事項に適合すること。

- イ. 溶接部（圧接部を含む）のきずは、検査要領書に記載された許容値内であること。
- ロ. キャプセル等の内部確認のために行う透過試験結果は、照射試料及び構成部材の位置が検査要領書又は承認図に記載されたとおりであること。

[補足]

- ① 溶接部の判定基準は、次のいずれかによる。
- イ. JIS Z 3104-1995 を適用する場合は、原則として、「きずの分類」の 1 類。
 - ロ. JIS Z 3106-2001 を適用する場合は、原則として、「きずの像の分類」の 1 類。⁽¹³⁾
 - ハ. きずは肉厚の 10%以下。（ただし、割れ及び溶込み不足等の線状きずがないこと。）
 - ニ. その他、特に指定する値。（ただし、割れがないこと。）
- ② 内部確認結果は、検査要領書又は承認図に記載されたとおりの配置であること。

1 2 超音波探傷検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(12)

超音波探傷検査は、「JIS G 0582 鋼管の超音波探傷検査方法」等に準じて行う。

[要領]

- ① 外筒管、燃料被覆管等に用いる管の探傷試験は、JIS G 0582-1998「鋼管の超音波探傷検査方法」⁽¹⁴⁾等に準じて行う。
- イ. 原則として、水浸法で行う。
 - ロ. 対比試験片は、原則として、検査対象とする管と同一ロットから採取したもので、管の呼び厚さの 10%以下の深さの人工きずを設けたものとする。
 - ハ. 通商産業省告示第 501 号等を準用する場合は、その規格に基づく人工きずを設けた対比試験片を用いるものとする。

- ② 外筒等に用いる丸棒の探傷試験は、「通商産業省告示第 501 号」等に準じて行う。
- イ. 半径方向の探傷は、底面エコー方式により行う。
- ロ. 軸方向の探傷を行う場合は、原則として、検査対象とする棒と同一ロットから採取した標準試験片を用いて行う。
- ハ. 特記事項
- 丸棒から外筒等の管を製作したときは、必要に応じて、① に示す探傷試験を行う。
- ③ 試験結果は、試験条件等を記載した書類及びチャート紙により確認する。また、必要に応じて立会検査を行う。
- ④ 特記事項
- 溶接部の検査を行う場合は、JIS Z 3060-2002「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」⁽¹⁵⁾等に準じて行う。

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(12)

超音波探傷検査は、測定値が検査要領書に記載された値以下であること。

[補足]

- ① 管の探傷試験結果は、きずからの反射波の高さが、対比試験片の人工きずからの反射波の高さより低いこと。
- ② 丸棒の探傷試験結果は、以下によること。
- イ. 半径方向の探傷結果は、きずからの反射波の高さが、きずのない部分の底面からの反射波の高さの 20%以下で、かつ底面からの反射波の高さが、きずのない部分の底面からの反射波の高さの 50%を超えること。
- ロ. 軸方向の探傷結果は、きずからの反射波の高さが、標準試験片の標準穴からの反射波の高さを探触子ときずのある部分との距離について補正した値以下とする。
- ③ 溶接部の探傷結果は、原則として、きずは肉厚の 10%以下であること。(ただし、割れ及び溶込み不足等の線状きずがないこと。)

1 3 渦流探傷検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 条の(13)

渦流探傷検査は、「JIS G 0568-2006 鋼の貫通コイル法による渦流探傷検査方法」等に準じて行う。

[要領]

- ① 探傷試験は、JIS G 0568-2006「鋼の貫通コイル法による渦流探傷検査方法」⁽¹⁶⁾等に準じて行う。
- イ. 試験コイルは、対比試験片の人工きずを十分検出できるものとする。

- ロ. 対比試験片は、原則として、検査対象とする管と同一ロットから採取したもので、管の呼び厚さの10%以下の深さの人工きずを設けたものとする。
 - ハ. 通商産業省告示第501号等を準用する場合は、その規格に基づく人工きずを設けた対比試験片を用いるものとする。
- ② 試験結果は、試験条件等を記載した書類及びチャート紙により確認する。また、必要に応じて立会検査を行う。

(2) 判定基準

検査基準第50条の(13)

渦流探傷検査は、測定値が検査要領書に記載された値以下であること。

[補足]

- ① きずによるインピーダンスの値が対比試験片の標準きずによるインピーダンスの値以下であること。

1.4 絶縁抵抗検査

(1) 検査方法

検査基準第49条の(14)

絶縁抵抗検査は、絶縁抵抗計を使用して行う。

[要領]

- ① 絶縁抵抗計を用い、原則として、下記の電圧を印加し測定する。
- イ. 熱電対 : 100V DC
 - ロ. ヒータ : 500V DC
 - ハ. SPND : 10V DC

(2) 判定基準

検査基準第50条の(14)

絶縁抵抗検査は、測定値が検査要領書に記載された値以上であること。

[補足]

- ① 熱電対及びヒータは、1MΩ以上とする。⁽¹⁷⁾
[参考値] メーカー等の管理基準値は、5MΩ以上。
- ② SPND は、 1×10^9 Ω以上とする。

1.5 導通検査

(1) 検査方法

検査基準第49条の(15)

導通検査は、回路計を使用して行う。

[要領]

- ① 回路計（テスター）を用いて、電気抵抗を測定し、測定値を記録する。

(2) 判定基準

検査基準第 50 条の(15)

導通検査は、電線間に断線がないこと。

[補足]

- ① 電気抵抗の測定値は、適正であること。

1.6 通過検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 の(16)

通過検査は、限界ゲージを使用して行う。

[要領]

- ① Go ゲージにより通過を確認し、No ゲージにより止まることを確認する。
- ② アルミニウム製ラビットの通過検査は、温水による表面処理を施す前に行う。

(2) 判定基準

検査基準第 50 の(16)

通過検査は、製作したラビットが限界ゲージの通り側・止まり側の限界内にあること。

1.7 表面密度検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 の(17)

表面密度検査は、スミヤ法で採取した試料をアルファカウンター等で測定して行う。

[要領]

- ① 原則として、スミヤ法で採取した試料をアルファカウンター等で測定した結果を確認する。
- ② スミヤ法による試料採取が困難な場合は、J M T R 技術課長の承認を得た適切な方法により測定した結果を確認する。

(2) 判定基準

検査基準第 50 の(17)

表面密度検査は、測定値が検査要領書に記載された値以下であること。ただし、 α 線放出核種の許容表面密度は、原則として $0.04\text{Bq}/\text{cm}^2$ 以下とする。

[参考値]

① α 線放出核種の表面密度は、必要に応じて以下の値を用いる。(搬出物品等の基準)

イ. U、Th等は $0.4\text{Bq}/\text{cm}^2$ 以下。

ロ. U、Th等以外は $0.04\text{Bq}/\text{cm}^2$ 以下。

(注：U、Th等とは、天然U、 ^{235}U 、 ^{238}U 、天然Th、 ^{232}Th をいう。)

② 特記事項

OSF-1キャプセルの再照射燃料試料については、測定値が検査要領書に記載された値以下であること。参考値を以下に示す。

イ. α …………… $1 \times 10^{-2} \text{Bq}/\text{cm}^3$ 以下。

ロ. β , γ …………… 370 Bq/cm^3 以下。

1.8 構成確認検査

(1) 検査方法

検査基準第49の(18)

構成確認検査は、目視又は必要に応じて光学機器等を使用して承認図との照合を行う。

[要領]

① 以下のキャプセル等について、照射試料及びスペーサ等の構成部材がキャプセル内に組立てられることを検査要領書又は承認図と照合する。

イ. 無計測キャプセル (バスケット型)

ロ. 再照射のキャプセル

ハ. 再照射のOSF-1キャプセル

② 特記事項

照射試料、計測付キャプセル、無計測キャプセル (密封型)、ラビット及びOSF-1キャプセルの内部構造については、「2. 1.1 放射線検査」に定める内部確認のための検査による。

(2) 判定基準

検査基準第50の(18)

構成確認検査は、照射試料及び構成部材をキャプセル等に組込む際に、それらが検査要領書又は承認図に記載されたとおりに組立てられていること。

1.9 機能検査

(1) 検査方法

検査基準第49の(19)

機能検査は、検査要領書に記載された方法に従って行う。

[要領]

- ① 安全上必要な事項等について、検査要領書に従って行う。
 - イ. OSF-1 キャプセルの希釈管の通気
 - ロ. その他、安全上必要な事項
- ② 特記事項
 - イ. 再利用バスケットは、把手の装着状況（着脱）の良いことを確認する。
 - ロ. 再利用バスケットを使用する無計測キャプセルの検査では、把手部の着脱用ピンがバスケットに装着されていること（バスケット表面から突き出していること）を確認する。

(2) 判定基準

検査基準第 50 の(19)

機能検査は、検査対象物が検査要領書に記載された機能を満足していること。

2 0 照射履歴検査

(1) 検査方法

検査基準第 49 の(20)

照射履歴検査は、照射履歴を記載した書類による記録確認を行う。

[要領]

- ① 照射履歴の記載項目の例を以下に示す。

イ. 燃料セグメント番号	ロ. ^{235}U 初期濃縮度	ハ. 照射期間
ニ. 平均燃焼度	ホ. 核物質組成	ヘ. 放射能強度
ト. 渦流探傷試験チャート	チ. ガンマスキャンチャート	
- ② 特記事項
再利用バスケットは、使用回数を書類により確認する。

(2) 判定基準

検査基準第 50 の(20)

照射履歴検査は、検査対象物の照射履歴（照射期間、照射場所、照射内容等）の記録確認ができること。

[補足]

- ① 再利用バスケットの使用回数は、20 回以下であること。

引用文献等

- (1) 総理府令第 74 号「試験研究の用に供する原子炉等の溶接の技術基準に関する総理府令」
- (2) 日本規格協会編：JIS 用語辞典，基本・一般編（1986）
- (3) 日本工業規格 Z 2300-1991「非破壊試験用語」
- (4) 日本非破壊検査協会編：非破壊試験用語辞典（1990）
- (5) 日本工業規格 B 0405-1991「普通公差－第 1 部：個々に公差の指示がない長さ寸法及び角度寸法に対する公差」
- (6) 日本工業規格 Z 8401-1999「数値の丸め方」
- (7) 日本工業規格 Z 2331-1992「ヘリウム漏れ試験」
- (8) 通商産業省令第 63 号「発電用核燃料物質に関する技術基準を定める省令」
- (9) 日本工業規格 Z 2343-1：2001「非破壊試験－浸透探傷試験－第 1 部：一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様分類」
- (10) 通商産業省告示第 501 号「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準」
- (11) 日本工業規格 Z 3104-1995「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」
- (12) 大岡紀一、他：私信（1984）
- (13) 日本工業規格 Z 3106-2001「ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法」
- (14) 日本工業規格 G 0582-1998「鋼管の超音波探傷検査方法」
- (15) 日本工業規格 Z 3060-2002「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」
- (16) 日本工業規格 G 0568-1993「鋼の貫通コイル法による渦流探傷試験方法」
- (17) 電気技術基準調査委員会編：内線規程（JEAC－8001－1986）

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
物質の量	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
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
質量体積 (比体積)	立法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
(物質の)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	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度 ^(d)	セルシウス度	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻¹ ・cd=m ⁻² ・cd
(放射性核種の)放射能吸収線量, 質量エネルギー当量, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (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った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。組立単位を形作る際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
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・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 ² ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
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	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・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 ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・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)	m ² ・kg ² ・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 ² ・A
吸収線量	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 ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・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 ² ・s ⁻³ =kg ² ・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	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ 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	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ 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 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² 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=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ジャンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fem	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	carat	1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリー	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

