JAEA-Technology 2020-026 DOI:10.11484/jaea-technology-2020-026



T91 鋼の切削加工による ADS ビーム窓小型模型の製作

Manufacturing Miniature Beam Window for Accelerator-Driven System by Cutting T91 Steel

渡辺 奈央 菅原 隆徳 大久保 成彰 西原 健司

Nao WATANABE, Takanori SUGAWARA, Nariaki OKUBO and Kenji NISHIHARA

原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター 分離変換技術開発ディビジョン

Partitioning and Transmutation Technology Division Nuclear Science and Engineering Center Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research

P

March 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

T91 鋼の切削加工による ADS ビーム窓小型模型の製作

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター 分離変換技術開発ディビジョン

渡辺 奈央、菅原 隆徳、大久保 成彰+、西原 健司

(2020年12月23日受理)

日本原子力研究開発機構では放射性廃棄物処理の負担軽減を目指した分離変換技術開発の一 環として、加速器駆動型核変換システム(ADS)の設計検討を行っている。ADS 特有の構成要 素であるビーム窓の材料には T91 鋼を使用し、その形状は薄肉の半球殻を想定している。しか しながら、このような薄肉の構造物が T91 鋼から製作可能であるかについては、これまで検討 を行ってこなかった。そこで本検討では、1/4 スケールの ADS ビーム窓小型模型を T91 鋼の 切削加工によって製作し、工程、製作精度そして形状測定方法についての検討を行った。その 結果、実機 ADS ビーム窓の製作上推測される設計形状との誤差は 5%程度であり、この加工誤 差による構造強度への影響は十分小さいことが分かった。

原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 + 燃料・材料工学ディビジョン

JAEA-Technology 2020-026

Manufacturing Miniature Beam Window for Accelerator-Driven System by Cutting T91 Steel

Nao WATANABE, Takanori SUGAWARA, Nariaki OKUBO+ and Kenji NISHIHARA

Partitioning and Transmutation Technology Division Nuclear Science and Engineering Center Nuclear Science Research Institute Sector of Nuclear Science Research Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 23, 2020)

As a part of partitioning and transmutation technology development to reduce the burden of radioactive disposal, an investigation of Accelerator-Driven System (ADS) has been performed by Japan Atomic Energy Agency. A beam window, which is an inherent structure of the ADS, is planned to be made from T91 steel and its shape is a thin hemisphere shell. However, it had never been tried to manufacture it out of T91 steel. In this investigation, we tried to manufacture miniature beam windows by cutting T91 steel, and to discuss the process, manufacturing accuracy and geometry measurement methods. As a result, considering a real scale ADS beam window, a figure error between designing and machining ones is estimated to be about 5%. Its effect would be very small to the structural strength.

Keywords: Accelerator-Driven System, Beam Window, T91, Manufacturing

⁺ Fuels and Materials Engineering Division

目次

1.	緒言	1
2.	予備試作	5
	2.1 目的	5
	2.2 製作	6
	2.2.1 SUS316L	6
	2.2.2 T91 鋼	7
	2.3 形状測定	7
	2.4 評価・検討	8
	2.4.1 形状測定手法について	8
	2.4.2 T91 鋼の加工性について	9
	2.4.3 完成品の形状について	9
	2.5 本製作に向けての見通し	9
3.	本製作	26
	3.1 目的	26
	3.2 製作	26
	3.3 形状評価	26
4.	結言	57
謝	辞	58
参	考文献	59

Contents

1.	Introduction	1
2.	Preliminary Manufacturing	5
	2.1 Purpose	5
	2.2 Fabrication	6
	2.2.1 SUS316L	6
	2.2.2 T91 steel	7
	2.3 Geometry Measurement	7
	2.4 Discussion	8
	2.4.1 Geometry Measuring Methods	8
	2.4.2 Machinability of T91 steel	9
	2.4.3 Geometry of the Products	9
	2.5 Prospect for Manufacturing	9
3.	Manufacturing	26
	3.1 Purpose	26
	3.2 Fabrication	26
	3.3 Geometry Measurement	26
4.	Conclusion	$\cdot 57$
A	knowledgement	58
R	eferences	59

1. 緒言

現行の第5次エネルギー基本計画¹⁾では、再処理工程において排出される高レベル放射性廃 液について、そのままガラス固化して地層処分するものとしている。しかしながら、高レベル 放射性廃液は多様な核種を含有しており、その中には発熱量の大きいものや、長寿命のものも 含まれる。このため、そのような特性を持つ核種をひとまとめにしたガラス固化体を地層処分 する場合、過度な温度上昇を避けるために広く分散させて処分しなければならず、かつ、その 有害度が安全といえる水準を下回るまでには百万年以上の長い時間を要する。そこで、分離変 換技術開発ディビジョンでは、高レベル放射性廃液を分離変換処理するための技術に関する研 究開発を行っている。この分離変換技術が確立されれば、処分場に課せられる負担をさらに軽 減できる効果が期待できる。

分離変換技術とは、高レベル放射性廃液に含まれる核種をそれらの特性別に分別(群分離) する分離技術²⁾と、その中でも特に有害度の高いマイナーアクチノイド(MA)を処理するため の核変換技術に大別される。放射性毒性が強く、半減期が数百万年以上の核種を含む MA は、 核変換技術によって短寿命核種、あるいは安定核種に変えられる。

核変換システム開発グループでは、MA 核変換のための装置である加速器駆動型核変換シス テム (ADS)の研究開発および設計に取り組んでいる³⁾。ADS では、高エネルギーの陽子ビー ムをターゲットである液体鉛ビスマス共晶合金 (LBE) に照射することで核破砕反応を起こし、 その時に生成される大量の高速中性子を利用して MA の核変換を行う。このため、MA を含む 燃料を装荷した未臨界体系の炉心に、外部の加速器から陽子ビームを継続的に供給する仕組み となっている。Fig.1.1 に ADS 未臨界炉の概念図を示す。直径 11.8m、高さ 15.5m 原子炉容器 内に未臨界炉心と主循環ポンプ、蒸気発生器をもつプール型の炉であり、核破砕ターゲットで ある LBE を同時に冷却材としても利用している。LBE によって炉心から蒸気発生器に熱が輸 送され、ADS 運転に必要な電力以上の発電が可能である。

加速器から供給される陽子ビームは、真空の円筒(ビームダクト)の中を通って炉心までほ ぼ損失なく運ばれる。陽子ビームの経路である真空領域と、LBEが流動している炉心領域との 境界を成す構造物、すなわちビームダクトの先端部分をビーム窓と呼ぶ。一般的には、加速器 側の真空領域とターゲット側の非真空領域との間に位置する隔壁を呼称するものであり、世界 の大型陽子加速器施設で実際に運用されている。J-PARCの物質・生命科学実験施設 MLF の 例4を挙げると、MLFでは鉄鋼製容器内部を循環する水銀ターゲットに容器外部から陽子ビー ムを照射することで中性子を生成しているが、陽子ビームが入射する範囲の容器壁面をビーム 窓と呼び、直接照射のない他の壁面に比べて、特に、大強度陽子ビーム窓に起因する損傷に配 慮した設計製作が行われている。

一方 ADS ビーム窓は、円筒形状のビームダクトの先端になめらかに接続された半球殻形状 の鉄鋼製構造物であり、MLF のものとは逆で、その内側に真空領域を有する。ADS ビーム窓 は少なくとも定格出力運転日数である 300 日の間、以下に挙げる劣化や負荷に耐え、破損しな いことが求められる。

- (1) 陽子ビームや高速中性子の照射損傷
- (2) 高温環境におけるクリープ変形
- (3) 高温流動 LBE との接触による腐食
- (4) 陽子ビーム照射による発熱
- (5) 周囲を流動する LBE の圧力によるひずみ

また、ADS ビーム窓が位置しているのは LBE が流動する炉心中央であることから、破損や 劣化の検知も容易ではないと考えられる。したがって、ADS ビーム窓にはより慎重な設計検討 が必要であるといえる。以上のビーム窓としての特異性、加えて、他の炉型にはない炉内構造 物としての独自性から、ADS ビーム窓の設計検討は最優先事項の一つとして考えられている。

上記で挙げた劣化や負荷のうち、(1)から(3)は材料分野の側面が強いと考えられる。ADS ビーム窓に使用する材料は、改良型9%クロム1%モリブデン鋼(T91鋼)が最有力候補である が、これは(1)から(3)に対応した次の理由によるものである。(1)の照射損傷への耐性に ついて、T91鋼をはじめとしたフェライトマルテンサイト鋼は高温での耐照射性に優れ、中で もクロムの質量比が8%から9%の材料は照射によるDBTTシフトが最も小さいこと。(2)の 高温環境への耐性について、T91鋼の高温強さが高く評価されていること、また、(3)の腐食 への耐性について、LBE中の溶解度が高いNiがT91鋼の主成分に含まれていないことが理由 となっている。

一方で、ADS ビーム窓の設計、すなわち形状最適化における影響度が強いのは(4)と(5) であると考えられる。したがって、(4)の発熱分布を得るための核熱計算、LBE の熱輸送と(5) の圧力分布を得るための熱流動計算、ADS ビーム窓の変形量を得るための構造計算、以上3つ の計算について連成解析を行い、その結果を用いることで、ADS ビーム窓の設計検討をこれま でおこなってきた⁵⁾。

ビーム窓の壁厚は、厚いほど構造的な強度は高くなる一方で、陽子ビーム照射による発熱量 が大きくなる。このため、ビーム窓自身の温度が上昇し、熱応力の増加、材料強度の低下を招 く。逆にビーム窓の壁厚が薄くなると、発熱量が減少し、温度上昇にともなう熱応力増加と材 料強度低下は抑制できるが、構造強度が低下する。したがって、十分な構造強度と適切な温度 を同時に満たすような壁厚を設定しなければならない。過去の検討から Fig.1.2 に示す形状が このバランスをうまく保ち、高い強度を示すことが分かった。

しかしながら Fig.1.2 の設計は、環境条件を設定し連成解析を実施して得られた一つの結果 であり、製作実現性を考慮したものではない。T91 鋼製で半球殻形状のビーム窓は、EU を中 心とした MEGAPIE プロジェクト ©にて直径 180mm、壁厚 1.4mm から 1.7mm のものが製作 されたが、日本において同様の製作経験はないため、製作実現性の検討のためには新たに情報 収集を行う必要があった。そこで本件では、T91 鋼を用いて ADS ビーム窓の小型模型を試作 し、T91 鋼の加工に関して知見と経験を積むとともに、Fig.1.2 に示す形状の製作実現性につい て検討した。

第2章では、T91鋼の加工性確認のために実施した予備試作について述べる。具体的には、 材料(SUS316L あるいは T91鋼)、壁厚及び加工工程の異なる複数の試作結果を用いて、 SUS316L と比較した T91鋼の加工性と加工工程について検討する。また、各完成品に対して 2通りの形状測定を実施し、ADS ビーム窓の製作形状評価に適した測定手法の検討も行う。第 3章では、さらに壁厚を薄くした模型の製作内容について述べる。またこの製作には、第2章 で得られた知見を基に改良した加工工程と形状測定を用いている。第4章では、本研究の結論、 および今後の課題について述べる。



Fig.1.1 ADS 未臨界炉の概念図



Fig.1.2 ADS ビーム窓の設計形状

2. 予備試作

本章では、**T91**鋼の加工性確認と ADS ビーム窓の加工工程の検討のため実施した予備試作 について記載する。

2.1 目的

予備試作を実施する目的を以下に挙げる。

- (1) ADS ビーム窓に相似した形状が T91 鋼から製作可能であるかの検証
- (2) T91 鋼の加工性についての知見を得る
- (3) 試作品に対する形状評価とその測定手法の検討

(1) について、予備試作における設計形状を Fig.2.1、Fig.2.2 に示す。概形は実際のビーム 窓と同様、円筒型の胴部と半球殻型の窓部がなめらかに接続した形状である。Fig.2.1 の胴部の 寸法は外径 100mm、内径 80mm、高さ 15mm である。窓部の寸法も外径 100mm、内径 80mm であるが、頂点にかけて壁厚が薄くなるように、内径中心を頂点側に 8mm 移動させている。 これにより、窓部の壁厚は胴部との接続位置(窓部縁)の 10mm から連続的に薄くなり、頂点 位置で最小 2mm となっている。この頂点の壁厚は、実機 ADS ビーム窓の設計形状 (Fig.1.2) に倣ったものである。

一方で、実機 ADS ビーム窓の外径に対する頂点壁厚の比率を計算すると、約 4.3%である。 したがって、外径 100mm の小型模型の頂点壁厚をこの比率から合わせると、0.43mm の薄さ となる。そこで、頂点壁厚 2mm の小型模型とともに、同壁厚が 0.5mm のものも製作可能であ るかを確認した。この時の設計形状を Fig.2.2 に示す。Fig.2.2 の外径と内径は Fig.2.1 の形状 と同じくしているが、内径を 9.5mm 頂点側に移動させている。

(2) について、T91 鋼は高温高圧耐性に特化して開発された材料であるため、SUS304 や SUS316 などの汎用ステンレス材と比べて、その流通量は非常に少ない。そのため、T91 鋼の 加工性に関しては参照できる文献が乏しく、加工経験を持つ業者も非常に限られている。した がって、今後 T91 鋼を使用した工作物を製作する上で、ADS 設計を担う当グループがその加 工性に関する様々な知見を得ておくことは重要であると考える。

ADS ビーム窓は前章で挙げた通り、過酷な環境条件での運用が想定されるため、製作段階に おける残留応力等を可能な限り除去しておく必要がある。よって、塑性変形を伴うプレスや絞 加工等ではなく切削加工による製作を考えている。しかしながら、切削加工の場合においても 残留応力の発生を完全には避けられない。残留応力の解消には加工後の適切な熱処理が一般的 であるが、一方で、熱処理自体が対象物にひずみを生じさせる原因にもなりうる。そこで本章 では、熱処理後に切削加工を行う場合と、切削加工後に熱処理を行う場合の2通りの加工工程 で試作を行い、工程の比較検討を行う。この時、完成品の仕上がりのみでなく、切削加工時の 加工時間と工具の消耗量についても検討する。また、T91 鋼の加工と並行して熱処理済み SUS316Lの切削加工も実施し、検討の際の基準として利用する。

(3) について、実機 ADS ビーム窓に Fig.1.2 の形状を選定した解析では不整を考慮していない。そこで、不整に関する検討に資するため、予備試作の完成品を対象に形状評価を行う。

また、このとき重要となるのは適切な形状評価手法の選択である。したがって、形状評価と並 行して、形状測定手法についても比較検討を行う。

2.2 製作

予備試作の設計形状と使用材料について Table 2.1 に示す。3 種類の被削材材料(SUS316L 熱処理材、T91 鋼未熱処理材、T91 鋼熱処理材)と、2 種類の形状(頂点壁厚 2mm と 0.5mm) の組み合わせとなる。ただし、T91 鋼未熱処理材から頂点壁厚 2mm 形状の試作は行っていな い。なお、便宜上、設計形状について本項以降、頂点壁厚 2mm および 0.5mm 形状をそれぞれ 2mm 型および 0.5mm 型と呼ぶことにする。また、T91 鋼の加工工程について、熱処理材を切 削加工して仕上げた工程を HC(Heating-Cutting)工程、未熱処理材を切削加工し、その後に 熱処理したものを CH(Cutting-Heating)工程と呼ぶことにする。

2.2.1 SUS316L

被削材として使用した SUS316L ブロックは大同特殊鋼株式会社から入手した。SUS316L ブ ロックの化学成分について Table 2.2 に示す。SUS316L および T91 鋼の切削加工は富士測範 株式会社に依頼した。予備試作での切削加工にはマシニングセンタ(MC)を使用した。MC は フライス盤と同様に、回転する工具を固定した被削材に接触させて切削するフライス加工型の 装置である。フライス盤はすべての操作が手動であるが、数値制御(NC)フライス盤の登場に より、あらかじめ設置しておいた工具や被削材の移動操作が自動化された。そこからさらに工 具の交換も自動化されたものが MC である。

ただし MC を用いた場合でも、半球殻のような深さのある形状を一度に全自動で(ワンチャ ックで)仕上げることは不可能である。最低一回以上、被削材の姿勢を手動で変える必要があ るが、被削材を再設置する際に所定の位置からずれてしまうと、完成品の形状に影響が出る可 能性がある。また、被削材の固定方法に関しても、過剰な応力が被削材にかからないように配 慮しながらも、完全に固定する必要がある。

以上の点について考慮して検討した結果、予備試作では次の手順にて加工を行った。

①外側と位置合わせのための突起物(ボス)の削り出し

②内側の削り出しおよび仕上げ加工

③外側の仕上げ加工

①では、Fig.2.3 のように被削材の側面下部を固定する。外側の形状を削り出すが、その前後 左右に短冊型のボスを残しておく。ボスの上面には、位置合わせに使用する基準穴と被削材固 定に使用する引き込みボルト穴の加工を行う。外側の仕上げ面から切削しろ 0.5mm を残した 状態で、被削材を裏返す。

②では、Fig.2.4(左)のように基準穴に従って台座の上に被削材を設置する。設置した被削 材は引き込みボルトによって固定する。内側形状を仕上げ面まで削り出すのと同時に、縁の不 用な部分を削除する。この時、ボスは残しておく。残したボスの上面に基準穴と引き込みボル ト穴を加工した後、被削材を裏返す。

③では、Fig.2.4(右)に示す姿勢で②と同様に被削材を固定し、ボスの削除と外側を仕上げ

面まで削り出す。

以上までが MC での加工内容である。手順③が完了した状態の被削物から不要な足(縁部分) をワイヤーカッターで切り落として完成とした。

2.2.2 T91 鋼

T91 鋼ブロックは日鉄テクノロジー株式会社(旧日鉄住金テクノロジー株式会社)から入手 した。ブロックの溶製、鍛造、切り出し工程について以下に記す。まず、真空高周波誘導溶解 によって150kg分の材料を調整した。化学成分の目標値と、調整後に採取したサンプルの分析 結果についてTable 2.3 に示す。調整した材料を鋳型に流し込み、天面直径225mm、底面直径 185mm、高さ495mmの円錐台形状に約30kgの押湯部分が付随した鋳塊を得た。鋳塊の外観 をFig.2.5 に示す。

この鋳塊が厚さ 125mm、幅 125mm、有効長さ 880mm の直方体形状になるまで、ハンマー による自由鍛造を行った。鍛造温度は 900℃~1150℃である。継続して高温状態を保つために、 鍛造開始前には供試材を 1150℃で 4 時間加熱した他、鍛造中にも再加熱を行っている。得られ た鍛造材の外観を Fig.2.6 に示す。この鍛造材から、厚さ 125mm、幅 125mm、長さ 121mm のブロックを 6 つ切り出した。切断後の外観を Fig.2.7 に示す。

上記工程を経て得られたブロックから、HC加工による 2mm 型と 0.5mm 型、CH 加工によ る 0.5mm 型の計 3 点の試作を行った。HC 加工工程では、鍛造後に切り出したブロックに対 して、まず熱処理を行った。T91 鋼の熱処理は日新化熱工業株式会社に依頼した。HC 加工工 程における熱処理のヒートチャートを Fig.2.8 に示す。縦軸が炉内温度、横軸左向きに時間の 進行を示す。標準的な T91 鋼の熱処理工程 ^のでは、1040~1080℃の焼きならしまたは焼き入 れ、730℃~800℃の焼き戻しを行う。本件でもこれに従い、540℃×4 時間、800℃×4 時間、 1060℃×3.8 時間、炉冷約 1 時間、750℃×7.5 時間、炉冷、の順で熱処理を行った。焼きなら しまたは焼き入れ温度まで昇温する際に段階を踏んでいるのは、急熱による材料の割れ、変形、 残留応力の発生を防ぐためである。HC 加工工程では、T91 鋼の熱処理後に SUS316L と全く 同様にして切削加工を行った。

一方、CH 加工工程では、鍛造後に切り出したブロックをそのまま被削材として使用した。 SUS316L や HC 加工工程時とおおよそ同様にして切削加工を実施したが、未熱処理 T91 鋼の被 削性が非常に悪かったため、工具は硬材用のものに交換した。切削加工後に行った熱処理のヒー トチャートを Fig.2.9 に示す。標準の工程に倣って、1060℃×3.8 時間、炉冷約 1 時間、750 時 間×7.5 時間、炉冷の順で実施した。HC 加工工程では、T91 鋼が一辺約 12cm のブロックであ ったため、内部の温度差を抑制するために段階的な昇温を行っていた。しかし、すでに壁厚 10mm 以下の半球殻形状に削り出した状態の T91 鋼に対しては、昇温時に内部の温度差は生じにくい と考えられる。したがって、焼きならしまたは焼き入れ温度である 1060℃まで一気に昇温した。

2.3 形状測定

計5点の完成品外観をFig.2.10に示す。これらを対象に、接触式測定法と光学非接触式測定法による形状測定を行った。各測定手法の特徴について以下に記す。なお、各測定法について

は本章以降、それぞれ接触式、光学式と呼ぶことにする。完成品の形状測定は、いずれも株式 会社東京精密に依頼した。

接触式ではプローブが測定対象面を走査し、プローブ本体から露出している測定子が対象に 接触することで3次元空間における測定点を得る。一方、光学式では、測定対象の面に線状の レーザー光を走査させて、その拡散反射から位置情報を読み取る。光学式での測定の様子を Fig.2.11 に示す。

測定原理と効率の違いから、一般的に、接触式は長さや真円度などの線の計測、光学式は面 の計測に用いられる。なお、測定時間に制限を設けなければ、接触式による面の計測も可能で ある。接触式と比較して、光学式の測定効率は最大取得測定点数が毎秒 700,000 点と非常に高 い。しかし一方で、光学式では表面の拡散反射光から情報を読み取るため、測定対象の表面に 光沢や艶のある場合、測定値に大きな誤差が生じる恐れがある。また、光学式はヘッドが大き いため、回り込む必要がある形状の測定には不向きである。例えば、深さのある形状の内側側 面を測定したい場合、接触式のプローブは奥まで入り込んで走査が可能であるが、光学式では 難しい。

2.4 評価·検討

2.4.1 形状測定手法について

接触式を用いた測定では、SUS316L 製 2mm 型、SUS316L 製 0.5mm 型、T91 製 HC 加工 2mm 型の 3 体を対象に、胴部縁の直径と真円度、および窓部縁における輪郭の半径と真円度 を計測した。以上の測定結果を Table 2.4 に示す。括弧内には直径および半径の計測値と設計 値との偏差を記した。ここで真円度とは幾何公差の一つであり、対象の円形形体(C)を2つ の同心円で挟んだ時、その二円の半径差(f)がとり得る最小の値のことを指す。真円度につい ての概念図を Fig.2.12に示す。接触式では設計値との偏差を幅でしか評価できない。このため、 どのように凹凸が生じているか等、面の形状をイメージするのは不可能である。その一方で、 測定結果を数値で直接比較できるため、傾向の把握がしやすい。以上から、接触式は、ある単 一の測定対象について詳細な情報を得るための手法としては不向きであるが、複数の測定対象 を比較して傾向や差異を把握したい場合には有効であることが分かった。

光学式を用いた測定では、SUS316L 製 0.5mm 型、T91 製 HC 加工 0.5mm 型、T91 製 CH 加工 0.5mm 型の 3 点を対象に測定を行った。表面の測定データから曲面の STL データを生成 し、設計形状との偏差をコンター図で表示したものをそれぞれ Fig.2.13 から Fig.2.18 に示す。 コンター図の赤色は設計形状よりも壁厚が厚くなる方向に偏差が生じていることを示す。すな わち、内側表面を評価した Fig.2.13、Fig.2.15、Fig.2.17 では内側への偏差、外側表面を評価 した Fig.2.14、Fig.2.16、Fig.2.18 では外側への偏差を示している。青色はその逆である。光 学式では面の形状が一目で把握できるが、結果ごとの比較は難しい。さらに、鋼材は金属光沢 をもつため、第 2.3 節で述べた通り拡散反射光の量が少なく、測定値の信頼性は低いことが分 かった。以上から光学式は、ADS ビーム窓の形状評価には不適切であるといえる。

さらに、今回実施したいずれの測定においても、内側表面と外側表面の測定結果の間に相関 はなく、したがって、これらの結果をもって壁厚を評価するのは不可能である。これは、切削 加工の時と同様に、内側の測定、外側の測定で対象の姿勢を変えなければならないためである。

以上から、測定手法は接触式を採用したうえで、面の形状の把握と壁厚の評価も実施できる ような対策を講じなければならないことが分かった。これを満たす測定手法について、第 2.5 節で検討する。

2.4.2 T91 鋼の加工性について

加工性について検討するため、SUS316L、熱処理済み T91 鋼 (HC 加工工程)、未熱処理 T91 鋼 (CH 加工工程) それぞれの、フライスカッターによる加工時間と、その替え刃の交換頻度 に関して比較を行った。被削材の大きさと完成品の形状はほとんど変わらないため、上記 2 点 の差異は材料の被削性によるものであるといえる。加工時間は SUS316L が 10 時間、熱処理済 み T91 鋼が 16 時間、未熱処理 T91 鋼が 30 時間であった。また、SUS316L と熱処理済み T91 鋼はフライスカッターの使用中に一度も刃の交換を必要としなかった一方で、未熱処理 T91 鋼 では、数十回程度刃の交換を必要とした。なお、第 2.2.2 項で述べた通り、未熱処理 T91 鋼 の切削にはより硬い材料用の刃を使用していた。加工時間、刃の消費量の両方の点において、熱 処理済み T91 鋼は SUS316L よりも少し加工性が劣る程度であったが、未熱処理 T91 鋼は加 工性が良くないことが確認できた。さらに光学式から得られた結果を比較すると、CH 加工の 完成品について評価した Fig.2.17、Fig.2.18 にのみ頂点を中心とした円状のひずみが明確に確 認できる。このひずみは切削加工後の熱処理の間に生じたものと推測する。したがって、T91 鋼の切削加工は熱処理後の実施が適当であるといえる。

2.4.3 完成品の形状について

Fig.2.10 に示した通り、いずれの完成品も目視で確認できるほどのひずみ等はなく、ADS ビーム窓形状の製作は十分に見込めることが確認できた。

Table 2.4 を見ると、外側の径はほとんどがより外向きに、内側はより内向きに偏差が生じている。SUS316L 製 2mm 型の外側のみ、胴部縁の偏差は内向きであり、窓部縁では偏差0を示しているが、いずれの完成品も設計値から壁厚が厚くなっていることが分かる。

完成品ごとに比較すると、内側、外側の真円度はそれぞれ同程度である一方で、直径と半径 の偏差は SUS316L 製 2mm 型、SUS316L 製 0.5mm 型、T91 鋼製 2mm 型の順で大きくなっ ている。この順番に従うと、T91 鋼製 0.5mm 型の径の偏差はさらに大きくなっていると推測 される。

T91 鋼製 HC 加工 2mm 型に注目すると、外側と内側の径の差から推定される壁厚の増加は、 0.05mm 程度である。頂点位置でも同等の偏差が生じていると仮定すると、その割合は 0.05mm / 2mm = 2.5%程度である。T91 鋼製 0.5mm 型に生じる偏差はこれ以上であると考えると、壁 厚の増加は無視できない割合であるといえる。

2.5 本製作に向けての見通し

予備試作を通して、次の3点を確認した。

(1) 外径 10cm 程度のスケールであれば、T91 鋼を使用した ADS ビーム窓の形状は製作可

能であるといえる。また、今回の MC を用いた切削加工結果を踏まえて、旋盤による切削加工 も可能であるとの見通しが得られた。自身が回転する切削工具を3次元的に操作するフライス 加工とは異なり、旋盤加工では被削材を回転させて切削を行う。このため、加工形状の自由度 はフライス加工に劣るが、ビーム窓のような軸対象形状の成形は旋盤加工の方が適していると 考えられる。

(2) T91 鋼の切削加工は、SUS316L と同様に熱処理後に行うのが適当である。熱処理済み T91 鋼の加工性は SUS316L に比べてやや劣るものの、手順や体系、使用工具などを再検討し なければならないほどの違いはない。

(3) ADS ビーム窓の形状評価には接触式を採用するべきである。一方で、特定の計測値の みでは情報量が乏しく、面の測定も重要であると考える。また、今回評価出来なかった壁厚に 対する偏差は、陽子ビーム照射による発熱量に影響する重要な値であるため、今後必ず評価す るべきである。以上の条件を満たすために、予備試作と異なる接触式の測定機器を用いて、面 の測定および測定対象の姿勢を変えないワンチャック測定による壁厚の評価を行うことにする。

以上の検討内容を踏まえて、本製作は以下の通りに実施する。

- ・ 熱処理済み T91 鋼に対して旋盤加工を行う。
- ・ 要求する壁厚の薄さが実現可能であるか確認する。
- ・ 完成品の形状評価は接触式で、面全体を対象に行う。
- ・ 完成品をワンチャックで測定し、壁厚の評価を行う。

		SUS316L	T91 鋼	T91 鋼
		熱処理後に切削 熱処理後に切削 熱処		熱処理前に切削
) 10-2mm 10-0.5mm	SUS316L 製	T91 鋼製 HC 加工	
壁厚		2mm 型	2mm 型	
(最大-最小)		SUS316L 製	T91 鋼製 HC 加工	T91 鋼製 CH 加工
		0.5mm 型	0.5mm 型	0.5mm 型

Table 2.1 予備試作品

Table 2.2 SUS316L 被削材ブロックの化学成分(mass%)

成分	С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Mo
坦枚	MAX	MAX	MAX	MAX	MAX	12.00	16.00	2.00
况俗	0.03	1.00	2.00	0.045	0.030	-15.00	-18.00	-3.00
成績	0.007	0.22	1.64	0.035	0.017	12.05	16.83	2.02

Table 2.3 T91 鋼被削材ブロックの化学成分 (mass%)

	С	Cr	Mo	V	Nb
指定目標値	0.1 ± 0.02	8.5 ± 0.3	1.0 ± 0.1	$0.2\!\pm\!0.02$	$0.08 {\pm} 0.02$
分析結果	0.096	8.60	1.03	0.20	0.08

				胴部縁		窓部縁									
材質	工程	程 型	し 表面	直径	百口庄	半径	古口中								
				(偏差)	具口皮	(偏差)	具口皮								
			从加	99.9914	0.0041	50	0.0059								
		9.000.000	クト回	(-0.0086)	0.0041	(0.0000)	0.0052								
		2mm	内侧	79.9769	0.0109	39.9873	0.0175								
CUC91CI			PJ顶	(-0.0231)	0.0168	(-0.0127)	0.0175								
SUS316L		0.5mm	外側	100.0141	0.0034	50.0081	0.005								
				(0.0141)		(0.0081)									
			中间	79.9693	0.0110	39.9852	0.0191								
												四间	(-0.0307)	0.0119	(-0.0148)
		外側	从加	100.0452	0.0022	50.0234	0.0004								
开01 纽			クト(則	(0.0452)	0.0033	(0.0234)	0.0094								
エジエ 辺門	ne	2111111	2mm 内側	79.9549	0.0195	39.9749	0.0990								
				(-0.0451)	0.0120	(-0.0251)	0.0229								

Table 2.4 接触式測定法による各完成品の測定結果(mm)



Fig.2.1 予備試作設計形状(窓部頂点壁厚 2mm)



Fig.2.2 予備試作設計形状(窓部頂点壁厚 0.5mm)







Fig.2.4 切削加工工程②(左)、工程③(右)



Fig.2.5 T91 鋼鋳塊外観







Fig.2.7 T91 鋼鍛造材切断後外観



Fig.2.8 予備試作切削加工前 T91 鋼熱処理のヒートチャート



Fig.2.9 予備試作切削加工後 T91 鋼のヒートチャート











Fig.2.10 予備試作完成品外観



Fig.2.11 光学非接触式測定法による測定の様子



Fig.2.12 真円度の定義



Fig.2.13 SUS316L 製 0.5mm 型内側表面偏差



Fig.2.14 SUS316L 製 0.5mm 型外側表面偏差



Fig.2.15 T91 鋼製 HC 加工 0.5mm 型内側表面偏差

JAEA-Technology 2020-026



Fig.2.16 T91 鋼製 HC 加工 0.5mm 型外側表面偏差



Fig.2.17 T91 鋼製 CH 加工 0.5mm 型内側表面偏差



Fig.2.18 T91 鋼製 CH 加工 0.5mm 型外側表面偏差

3. 本製作

本章では、前章の検討結果を反映した ADS ビーム窓小型模型の製作および完成品の形状評価について述べる。

3.1 目的

第2.5節で設定した方針に基づき、ADS ビーム窓の小型模型を製作した。本製作の設計形状を Fig.3.1 に示す。本製作では胴部を含む全ての壁厚が実際の ADS ビーム窓 (Fig.1.2) に対しておおよそ 1/4 になるように設定した。したがって、胴部は外径 100mm、内径 95mm、高さ15mm、窓部は外径 100mm、内径 95mm である。また、頂点の壁厚が 0.5mm になるように内径中心を頂点方向に 2mm 移動させている。以降、この形状を 1/4 型と呼ぶ。

3.2 製作

旋盤加工による 1/4 型の製作工程について述べる。被削材には第 2.2 節で提示した SUS316L および T91 鋼ブロックを使用した。T91 鋼については前章の HC 加工工程と同様に、熱処理 (焼きならしまたは焼き入れ:540℃×4 時間、800℃×4 時間、1060℃×3.8 時間、焼き戻し: 750℃×7.5 時間)を行った後、旋盤加工に供した。熱処理のヒートチャートを Fig.3.2 に示す。

旋盤加工も MC と同様、半球殻形状をワンチャックで完成させるのは不可能であり、被削材 の姿勢変更を必要とする。ただし、3 次元的に位置決めを行う必要があった MC とは異なり、 旋盤加工では被削材の回転軸を一致させていれば良いため、作業の簡素化のみでなく、製作精 度の向上も見込める。一方、第 2.2 節ではボスを利用することで、被削材に対して応力がかか らないように固定できたが、旋盤加工では被削材の外側からクランプの爪を締めて固定するた め、少なからず内向きに応力がかかる。過剰な応力負荷によって被削材にひずみの生じること がないよう、配慮する必要がある。

この点について検討した結果、次の手順で加工を行った。

①内側の加工

②外側の加工

①では、Fig.3.3(左)のように頂点側をクランプで固定し、内側表面の削り出しから仕上げ 加工までを一度に行う。②で被削材を固定するための段差を外側に設けた後、被削材の向きを 反転させる。

②では、Fig.3.3(右)のように胴側をクランプで固定し、外側表面の削り出しから仕上げ加 工までを一度に行う。また、受け治具を①で削り出した内側にはめ込んだ状態で加工を行うこ とで、被削材の変形と振動の発生を防止する。

手順②が完了した状態の被削物から、不要な足を切除して完成とした。

3.3 形状評価

各完成品の外観を Fig.3.4 に示す。この 2 体を対象に接触式による形状測定を行った。測定 対象の胴部を治具で挟み込むことで空中に固定し、姿勢変更なく窓部全表面の測定を可能とし た。これにより、測定値から壁厚を正確に評価できる。

各完成品の測定データを用いて行った評価内容について以下に述べる。設計形状(Fig.3.1) と比較した表面の偏差量について Fig.3.5 から Fig.3.8 に示す。なお、以降に示すコンター図で は、設計形状よりも壁厚が厚くなる方向への偏差を正方向として示す。すなわち、内側表面に 対してはより内側へ、外側表面に対してはより外側への偏差をより濃い赤で示している。負方 向はその逆である。Fig.3.5 から Fig.3.8 のいずれも、完成品の窓部は内外表面とも一部を除き 負の偏差が生じていることを示している。さらに、偏差の大きさは頂点に近づくほど大きくな っていて、指標の下限値である・0.06mm を下回る範囲も確認できる。以上から、完成品の壁厚 は設計形状と比べて、一部を除き全体的に薄くなっていること、特に頂点周辺はさらに薄くな っていることが確認できる。また、指標の各色がほぼ同心円状に一定の間隔で分布しているこ とから、表面の平滑性や、軸対象性については良好と評価できる。胴部付近は比較的に軸対称 性が低くなっているが、これは測定対象を保持固定する治具から受けた応力によるものと推測 する。また、外側の頂点とそのごく周辺のみわずかに凸となっているが、これは旋盤加工品の 特徴である「へそ」である。旋盤加工の特性上へその発生は避けられないため、一般的には、 旋盤加工後に削り落とす等の処置を施す。本製作では不確定要素をできるだけ排除する目的で、 へそをあえて残したままにしていた。

鉛直に切った断面(Fig.3.9下図)における輪郭の偏差量について Fig.3.10 から Fig.3.13 に 示す。これらの図からも、偏差が壁厚の薄くなる方向に生じていることが確認できる。評価結 果から直接確認できた偏差の最大量は、SUS316L 製の外側と内側がそれぞれ-0.0631mm と -0.0593mm、T91 鋼製の外側と内側が、-0.701mm と-0.688mm であった。

同じ鉛直断面において、壁厚を評価した結果を Fig.3.14 から Fig.3.17 に示す。これらの図か らも、同様の傾向が確認できる。頂点の壁厚は、SUS316L 製が約 0.4065mm (YZ 断面)、T91 鋼製が約 0.4347mm (ZX 断面)であり、設計値に対する偏差の割合はそれぞれ、19%、13%と なった。

水平に切った断面(Fig.3.9 上図)における輪郭の真円度をFig.3.18 から Fig.3.29 に示す。 黒色の実線が製作品の測定値から再現した輪郭、緑色の点線が設計形状の輪郭を示している。 これらの図からは、頂点近傍(080)を除く窓部が内外表面ともほぼ真円であることが確認で きる。また、胴部の真円度が比較的大きいのは、測定時の治具の影響によるものであると考え られる。080 位置の真円度を示した Fig.3.23 では、設計形状に対して製作品の外側表面の輪 郭が大きく、内側表面の輪郭が小さくなっている。これは、外側表面はより扁平に、内側表面 はその逆の傾向の偏差が生じているため、080 位置においてほぼ Z 軸に平行な壁厚の大きさ は減少する一方で、XY 断面で見た内外表面の輪郭の幅は逆に大きくなっていることを示して いる。また、同位置における真円度が比較的大きい点についても、へその発生と同様、頂点付 近における成形の難しさによるものと推測する。

過去に実施した、ビーム窓設計における初期不整の影響評価⁸から、頂点壁厚の不整量が設計値に対して10%程度であれば、ビーム窓の強度はほぼ変わらないことが分かっている。しかしながら、本製作で得られた完成品における頂点壁厚の設計値との偏差量は、SUS316L製、 T91鋼製のどちらにおいても、設計形状の0.5mmに対して10%を超えるものであった。 一方、旋盤加工において頂点壁厚のように回転軸方向に発生する不整量(加工誤差)は、加 工位置の設定による影響が大きいため、加工形状の大小によらずおおよそ一定の量が生じると されている。したがって、実機スケールの ADS ビーム窓製作において、頂点の壁厚に生ずる加 工誤差は小型模型製作時と同様におおよそ 0.1mm であり、設計値の 2mm に対する割合は 5% 程度になると推測できる。加えて、同じ材料および同様の形状の加工を複数回行うことで、製 作品に対する調整の最適化がなされるため、一層の加工誤差抑制が可能であると考えられる。 以上から、ADS ビーム窓の製作実現性は十分にあると考えられ、その加工誤差も許容できる範 囲であることが確認できた。



Fig.3.1 本製作設計形状



Fig.3.2 本製作 T91 鋼熱処理のヒートチャート



Fig.3.3 旋盤加工工程





Fig.3.4 本製作品外観



Fig.3.5 SUS316L 製 1/4 型外側表面偏差





Fig.3.6 T91 鋼製 1/4 型内側表面偏差



Fig.3.7 T91 鋼製 1/4 型外側表面偏差





Fig.3.8 T91 鋼製 1/4 型内側表面偏差



Fig.3.9 Fig.3.10 から Fig.3.29 における評価断面位置

JAEA-Technology 2020-026



Fig.3.10 SUS316L 製 1/4 型 ZX 断面輪郭偏差



Fig.3.11 SUS316L 製 1/4 型 YZ 断面輪郭偏差

JAEA-Technology 2020-026



Fig.3.12 T91 鋼製 1/4 型 ZX 断面輪郭偏差



Fig.3.13 T91 鋼製 1/4 型 YZ 断面輪郭偏差



Fig.3.14 SUS316L 製 1/4 型 ZX 断面壁厚



Fig.3.15 SUS316L 製 1/4 型 YZ 断面壁厚



Fig.3.16 T91 鋼製 1/4 型 ZX 断面壁厚



Fig.3.17 T91 鋼製 1/4 型 YZ 断面壁厚



SUS316L 1/4型 窓部縁から+3mm

Fig.3.18 SUS316L 製 1/4 型+3mm 位置真円度



Fig.3.19 SUS316L 製 1/4 型-3mm 位置真円度



Fig.3.20 SUS316L 製 1/4 型 θ 20 位置真円度



SUS316L 1/4型 0 40

Fig.3.21 SUS316L 製 1/4 型 θ 40 位置真円度



Fig.3.22 SUS316L 製 1/4 型θ60位置真円度



SUS316L 1/4型 0 80

Fig.3.23 SUS316L 製 1/4 型 θ 80 位置真円度



T91 1/4型 窓部縁から-3mm

Fig.3.24 T91 鋼製 1/4 型-3mm 位置真円度



Fig.3.25 T91 鋼製 1/4 型+3mm 位置真円度



Fig.3.26 T91 鋼製 1/4 型 θ 20 位置真円度



T91 1/4型 θ 40

Fig.3.27 T91 鋼製 1/4 型θ40 位置真円度



T91 1/4型 *θ* 60

Fig.3.28 T91 鋼製 1/4 型 θ 60 位置真円度



T91 1/4型 θ 80

Fig.3.29 T91 鋼製 1/4 型 θ 80 位置真円度

4. 結言

ADS 特有の構成要素であるビーム窓について、T91 鋼を使用した小型模型の製作を実施し、 製作工程および形状偏差について評価、検討を行った。

まずは予備試作を通して、T91 鋼から ADS ビーム窓の形状が製作可能であるかを確認した。 これと同時に、T91 鋼の加工性の評価と ADS ビーム窓の形状評価方法についての検討を行っ た。検討の結果、ADS ビーム窓の製作には旋盤加工が適切であることがわかった。また、被削 材には熱処理済みの T91 鋼を使用すべきであること、形状評価の測定には接触式測定法が適し ていることを確認した。

続けて実施した本製作では、予備試作で得られた知見を基に、実機の 1/4 サイズの模型を製作した。製作の結果、頂点の壁厚は設計形状から最大で 0.1mm 程度小さくなっていた。これは実機 ADS ビーム窓の設計値に対して 5%程度の加工誤差であり、過去の検討結果に基づくとビーム窓の構造強度に与える影響は小さいと考えられる。

次の検討事項としては、本件で製作した模型の材料特性が、熱処理の結果、T91 鋼に期待する水準を満たしているか確認する必要がある。本製作と同様の工程を経たT91 鋼の余材を使用 して、材料強度試験を行う予定である。

謝辞

T91 ブロックの製作に関しましては日鉄テクノロジー株式会社(旧日鉄住金テクノロジー株 式会社)にご尽力いただきました。また ADS ビーム窓の小型模型製作における加工工程の計 画およびその実施に関しまして、理工科学株式会社、および富士測範株式会社にご尽力いただ きました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 経済産業省資源エネルギー庁,第5次エネルギー基本計画, https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf (参照日: 2021.02.01),2018.
- 2) 「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会,分離変換技術総論,日本原子力学会,2016, 306p.
- T. Sugawara, H Takei, K. Tsujimoto, Investigations of accelerator reliability and decay heat removal for accelerator-driven system, Annals of Nuclear Energy, vol. 125, 2019, pp.242-248.
- 4)二川正敏, 神永雅紀, 前川藤夫ほか, J-PARC パルス中性子源開発の現状と将来, 日本中性子 科学会誌「波紋」, vol. 18, 2008, pp.22-25.
- 5) T. Sugawara, Y. Eguchi, H. Obayashi, et al., Conceptual design study of beam window for accelerator-driven system with subcriticality adjustment rod, Nuclear Engineering and Design, vol. 331, 2018, pp.11-23.
- 6) C. Fazio, F. Groschel, W. Wagner, et al., The MEGAPIE-TEST project: Supporting research and lessons learned in first-of-a-kind spallation target technology, Nuclear Engineering and Design, vol. 238, 2008, pp.1471-1495.
- 7) 日本機械学会,発電用原子力設備規格 設計・建設規格 第2編 高速炉規格,日本機械学会, 2017, JSME-S-NC2-2016.
- 8) 菅原隆徳, 鈴木一彦, 西原健司ほか, 加速器駆動未臨界システムのビーム窓構造の設計検討 -簡易的な包括検討及び座屈に関する詳細検討-, JAEA-Research 2008-026, 2008, 91p.

This is a blank page.

_

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本単位			
本平里	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	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
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					
AI 立長 SI 組立単位					
名称	記号				
面 積 平方メートル	m ²				
体 積 立方メートル	m ³				
速 さ , 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 ⁸				
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³				
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²				
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	1				
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では	(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

	SI 旭立単位				
組立量	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	
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2	
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹	
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²	
E 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	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$	
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	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	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	
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$	
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告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

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$	
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A	
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A	
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A	
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A	
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$	
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$	

表 5. SI 接頭語					
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	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

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=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa	
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa	
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m	
海 里	Μ	1 M=1852m	
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$	
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s	
ネーパ	Np	ci単位しの粉結的な間接け	
ベル	В	対数量の定義に依存。	
デシベル	dB -		

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T		
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例							
名称				記号	SI 単位で表される数値		
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq	
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy	
$\scriptstyle u$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv	
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$	
フ	T.		N	11		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m	
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg	
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J	
15	Ц		9		car	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)	
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$	