

スクリー式ペレット生成器を用いた ペレット入射装置の開発

—高周波数長時間連続ペレットのためのペレット生成機構の改良と試験結果—

Development of Pellet Injector Using Screw Type Pellet Extruder
-Improvement of Pellet Extruder for High Frequency and Long Duration,
and its Test Results-

市毛 尚志 本田 正男 佐々木 駿一 竹永 秀信
松沢 行洋 芳賀 三郎 石毛 洋一

Hisashi ICHIGE, Masao HONDA, Shunichi SASAKI, Hidenobu TAKENAGA
Yukihiro MATSUZAWA, Saburou HAGA and Youichi ISHIGE

核融合研究開発部門
トカマク本体機器システム開発グループ

Tokamak Device Group
Fusion Research and Development Directorate

July 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

スクリー式ペレット生成器を用いたペレット入射装置の開発
—高周波数長時間連続ペレットのためのペレット生成機構の改良と試験結果—

日本原子力研究開発機構

核融合研究開発部門トカマクシステム技術開発ユニット

市毛 尚志・本田 正男・佐々木 駿一・竹永 秀信⁺

松沢 行洋^{*}・芳賀 三郎^{*}・石毛 洋一^{*}

(2007年4月2日受理)

臨界プラズマ試験装置 (JT-60U) では、密度制御性の向上及び 2003 年度から開始した長時間放電 (≤ 65 秒) への対応のため、ペレット入射装置の高周波数化・長時間化を進めた。従来の装置では、ピストン式ペレット生成器のペレット押し出し速度と容量により、それぞれ入射周波数と入射時間が制限されていた。そこで、高速でのペレットの連続生成が可能なスクリー式ペレット生成器を取り付けることとした。改造にあたっては、ペレット入射装置本体の一部を JT-60 本体室から移設した後、生成器をピストン式からスクリー式へ交換しペレット棒の連続生成試験を実施した。燃料に重水素ガスを使用した試験の結果、JT-60U で使用するのに十分なスクリー式ペレット生成器の連続生成機能 (330 秒以上) を確認した。

那珂核融合研究所 (駐在) : 〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

+核融合研究開発部門先進プラズマ研究開発ユニット

※業務協力員

Development of Pellet Injector Using Screw Type Pellet Extruder
- Improvement of Pellet Extruder for High Frequency and Long Duration, and its Test Results -

Hisashi ICHIGE, Masao HONDA, Shunichi SASAKI, Hidenobu TAKENAGA⁺
Yukihiro MATSUZAWA,*Saburo HAGA*and Youichi ISHIGE**

Division of Tokamak System Technology
Fusion Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi, Ibaraki-ken

(Received April 2, 2007)

In JT-60U, pellet injector has been developed for improvement of density controllability and long operation duration consistent with a long pulse discharge (≤ 65 s) started from FY2003. The injection frequency and operation duration were limited by extrusion speed and volume of the piston type pellet extruder, respectively, in the previous system. The screw type pellet extruder was newly installed in the system, which can continuously extrude the pellet at high speed. After parts of the pellet injector system moved from JT-60 torus hall, the previous piston type pellet extruder was changed to the new screw type pellet extruder and the tests for continuous pellet extrusion were performed. In the extrusion test using deuterium gas as a working gas, continuous pellet extrusion up to 330 s was achieved, which is sufficient performance for applying it to JT-60U experiments.

Keywords: Pellet Injector, JT-60U, Piston Type Pellet Extruder, Screw Type Pellet Extruder

⁺Division of Advanced Plasma Research, Fusion Research and Development Directorate

**Cooperative Staff

目 次

1. 緒言	1
2. 従来のペレット入射装置の概要	1
2.1 構造と機能	1
2.2 主な装置性能	2
3. スクリュー式ペレット生成器	2
3.1 構造	2
3.1.1 押し出し器	2
3.1.2 スクリュードライバ	2
3.1.3 ヘリウムフローレギュレータ	2
3.1.4 温度調節器（ヒータ、温度センサ）	3
3.1.5 制御装置	3
3.2 動作原理	3
3.3 性能	3
4. スクリュー式ペレット生成器の単体試験	3
4.1 準備	3
4.2 生成手順	4
4.3 試験結果	4
4.3.1 冷却試験	4
4.3.2 燃料ガス供給流量	5
4.3.3 ノズル温度	5
4.3.4 ペレット棒生成開始時期	5
4.3.5 ペレット棒押出速度	5
4.3.6 連続生成時間	6
4.4 まとめ	7
5. 考察	7
6. 結言	8
謝辞	8
参考文献	8
図表リスト	9

Contents

1. Introduction	1
2. System Description of the Previous Pellet Injection System	1
2.1 Structure and Function	1
2.2 Specification	2
3. Screw Extruder Set	2
3.1 Structure	2
3.1.1 Extruder	2
3.1.2 Screw Drive	2
3.1.3 He Flow Regulator	2
3.1.4 Temperature Controller (Heater, Temperature sensor)	3
3.1.5 Controller	3
3.2 Principle	3
3.3 Specification	3
4. Individual pellet extrusion test of Screw Extruder Set	3
4.1 Preparation	3
4.2 Operation Procedure	4
4.3 Results	4
4.3.1 Cooling Test	4
4.3.2 Fuel Flow	5
4.3.3 Nozzle Temperature	5
4.3.4 Extrusion Start Time	5
4.3.5 Extrusion Speed	5
4.3.6 Production duration	6
4.4 Concluding Remarks	7
5. Discussion	7
6. Summary	8
Acknowledgement	8
References	8
List of Tables and Figures	9

1. 緒言

日本原子力研究開発機構（原子力機構）の臨界プラズマ試験装置（JT-60U）では、燃料供給法の一つとして氷状の燃料（ペレット）を高速でプラズマに入射するペレット入射装置を使用している。現状では、ペレット入射周波数はピストン式ペレット生成器のペレット押し出し速度により 10Hz 以下に制限されている。また、連続入射時間はピストン式ペレット生成器の容量によって、入射周波数 10Hz の場合 5 秒程度に制限されている。密度制御性の向上及び 2003 年度に伸長した放電時間（ ≤ 65 秒）に対応するためには、高速での長時間の連続ペレット生成が必要である。そこで、ペレット生成器を改造することにした。現在のピストン式ペレット生成器を改造して長時間入射できるようにするには、ペレット生成部の容積を増大する必要がある。しかし、装置の設置場所の空間的制約から不可能であった。連続ペレット生成器については、ロシアで開発され、500 秒の連続入射の実績をもち、高速でペレット生成が可能なスクリー式ペレット生成器がある。現在のピストン式生成器と同程度の大きさであり、押し出し部については互換性があるので、最小限の改造で取り付け可能である。そこで、スクリー式ペレット生成器を採用することにした。ペレット入射装置の改造は、電気設備、ガス供給系、排気系等の周辺機器の整備を行いながらピストン式ペレット生成器の取り外しとスクリー式ペレット生成器の取り付けを行い、その後ペレット棒の連続生成試験を実施した。本報告書では、第 2 章で従来のペレット入射装置の概要、第 3 章でスクリー式ペレット生成器の概要、第 4 章でスクリー式ペレット生成器の単体試験結果を報告する。

2. 従来のペレット入射装置の概要

ペレット入射装置の本体に関する事項について以下に記述する。

2.1 構造と機能

ペレット入射装置の本体は、JT-60U 真空容器の水平ポートに設置されている（図 1）。装置本体は、図 2 に示すように 2 つの真空容器（生成槽及び加速槽）で構成される。生成槽は、ピストン式ペレット生成器（液化器、冷却器、ピストン駆動ユニット）、装填装置などを内蔵する。加速槽は、加速ローターなどを内蔵する。

液化器は、液体ヘリウムによって冷却されており燃料ガスを冷却して液状にする。冷却器は、液体ヘリウムによって極低温（10～40K）に冷却されており液状の燃料を氷状のペレットにする。

冷却器の内部は、円筒状の空間（ $\phi 5\text{mm}$ ）があり、この空間にペレットが生成される。ペレットは、冷却器上部から内部に挿入される棒状ピストン（ $\phi 5\text{mm}$ ）により最大 110mm 押し出され、生成器下部のペレット棒出口で成形（ $2.1 \times 2.1\text{mm}$ ）し棒状のペレットとして押し出される。押し出された角棒状のペレットは、全長～235mm の銅製ペレット供給管（J 管）を通過して装填装置まで導かれる。ペレット棒は、装填装置のカッターで連続的に切断（ペレット形状は $2.1 \times 2.1 \times 2.1\text{mm}$ の立方体）され、ペレットを加速するための加速ローター中心部に供給される。ペレ

トは、高速回転（25～250Hz）している直線型加速ローター（全長 900mm）の遠心力で加速され JT-60U へ射出される[1]。

2.2 主な装置性能

ペレット入射装置及びピストン式ペレット生成器の主な性能を以下に示す。

ペレット加速方式	遠心加速方式
ペレットサイズ	2.1×2.1×2.1 mm（立方体）
燃料ガス	水素、重水素、ネオン
射出周期	1～10 Hz
射出速度	100～1000 m/s
ペレット棒サイズ	2.1×2.1mm（正方形）
押し出速度	22mm/s
押し出時間	>5 s

3. スクリュー式ペレット生成器

図 2 に示した生成槽内ピストン式ペレット生成器（冷却器、液化器、ピストン駆動ユニット）を取り外し、スクリー式ペレット生成器を設置する。本生成器の構造と動作原理、性能を以下に述べる。

3.1 構造

図 3 にペレット生成器主要部の構造を示す。本装置は、押し出し器、スクリードライバ、ヘリウムフローレギュレータ、温度調整器及び制御装置等で構成される。

3.1.1 押し出し器

燃料ガスを固化してペレットを生成し、棒状のペレットを押し出す機器である。内部にスクリーを内蔵している。図 4 に外観写真を示す。

3.1.2 スクリュードライバ

生成器内のスクリーを駆動するための機器で、回転センサを備えている。図 5 に外観写真を示す。

3.1.3 ヘリウムフローレギュレータ

押し出し器を冷却する為の液体ヘリウム流量を調整する機器で、流量は PLC からの信号で自動的に調整される。

3.1.4 温度調節器（ヒータ、温度センサ）

ヒータは、液化器用ヒータ、アディショナルヒータ及びノズル用ヒータで構成され、温度センサは液化器部とノズル部に取り付けられている。押し出し器の温度を計測し、PLCからの信号でヒータ出力を調整する。

3.1.5 制御装置

パソコン（PC）と PLC 等を使用して機器の制御（自動、手動）を行う。

3.2 動作原理

押し出し器内部にネジ溝構造のスクリーが設置されており、ここにペレットを生成する。スクリー上部の液化器から液体水素（重水素）が注入され、スクリー中部から下部を通る間に氷状のペレットを生成する。生成したペレットはスクリーの回転によって押し出され、押し出し器下部のペレット棒出口で成形（ $2.1 \times 2.1\text{mm}$ ）し生成する[2]。

3.3 性能

スクリー式ペレット生成器の主な性能を以下に示す。

ペレット棒サイズ	2.1×2.1mm（正方形）
押 出 速 度	重水素；40 mm/s、水素；35 mm/s
押 出 時 間	>600 s

4. スクリュー式ペレット生成器の単体試験

4.1 準備

(1) 周辺機器の整備

ペレット入射装置が設置されている JT-60 本体室は、実験運転時の入室制限等があるため改造等の作業をする場合に時間的な制約がある。従って、効率よく改造及び調整試験を実施するためにはペレット入射装置の一部を移設することが必要である。そこで、ペレット入射装置（生成槽及び加速槽等）を JT-60 本体室から取り外し、試験環境の整った場所へ移設した。また、移設場所には試験に必要な装置（ガス供給系、排気系、計測系、ガス漏洩検知器等）の整備を実施した。

(2) ペレット生成器単体試験

スクリー式ペレット生成器とピストン式ペレット生成器では、機器構造及びペレット生成方法等の点で違いがあるため、スクリー式ペレット生成器をペレット入射装置に接続する前に、ペレット生成器単体の基本的な性能を確認することが重要である。また、ペレット生成器単体の健全性を確認することも必要である。そこで、スクリー式ペレット生成器単体の特性・性能を確認する試験を実施した。

最初の試験として、各機器の健全性確認の為にスクリー式生成器及び各構成機器の真空リ

ークテストを行い、真空リークが無いことを確認した。

次に、ペレット生成器の性能を確認する為に重要な項目である冷却性能の確認試験を行った。試験時は、押し出し器とJ管を接続し、装填装置も含めた正規のペレット生成・射出時機器構成で実施した。温度センサは、液化器、ノズル、装填装置、J管上部及びJ管下部の5カ所に設置した。温度測定場所を図6に示す。

ペレット棒の生成試験は、ペレット入射装置の生成槽にスクリー式ペレット生成器を固定(図7)し、押し出し器のノズルはJ管を接続しない(ペレット生成器と装填装置を切り離れた)状態で実施した。図8にペレット生成試験系統図を示す。つまり、押し出し器のノズルから出てくるペレット棒は、専用の排気配管に導くことによりペレット生成器周囲の雰囲気(生成槽内)の真空度が変化しないようにした。また、液体ヘリウム配管とペレット棒排気配管を熱アンカで接続し、ペレット棒が急激に昇華しないように冷却した(図9)。尚、本試験において燃料ガスには重水素を使用した。

4.2 生成手順

基本的なペレットの生成フローを以下に示す。

(1) 冷却

液体ヘリウムを押し出し器に供給し、各機器を極低温まで冷却する(～4時間)。

(2) 燃料ガス供給

最初は、押し出し器内部のノズル付近にペレットを生成し押し出し器の先端を閉塞させる必要がある。そこで、少量の燃料ガスを生成器に供給し燃料供給圧力が上昇(閉塞完了)してから燃料ガスの流量を増やす必要がある。そして、燃料ガス流量が減少し殆ど流れない状態になると押し出し器内でのペレット生成が完了になる。

(3) スクリュー回転

押し出し器のノズル温度を3K程度上昇させてペレットを少し柔らかくしてからスクリーウの回転を開始する。

(4) ペレット棒生成

スクリーウが回転開始して暫くするとスクリーウによって押出され成型されたペレット棒がノズル部から出てくる。

4.3 試験結果

結果としては、連続生成の確認ができた。以下に、ペレット生成手法の確立の鍵となる特性を調べまとめた。

4.3.1 冷却試験

押し出し器のノズル温度がペレット生成に必要な温度まで冷却できることを確認した。表1に試験結果を示す。

表 1 冷却時の到達温度

温度測定場所	温度 (K)
液化器	21.1
ノズル	7.5
J 管上部	27.1
J 管下部	25.6
装填装置	30.6

4.3.2 燃料ガス供給流量

初期状態の押し出し器内は空の状態である。従って、最初に燃料ガスを供給する場合は押し出し器のノズル付近でガスを固化させ押し出し器内（ノズル部）を閉塞状態にする必要がある。従って、燃料ガスの流量は初期の段階（～2 分間）では少量とする必要があることを確認した。

4.3.3 ノズル温度

スクリューを回転させてペレット棒を押し出す場合、押し出し器のノズル温度は、ペレット生成時の温度に比べて 3K 程度高くする必要があることを確認した。生成時温度のままスクリューを回転させた場合、ペレットが硬すぎるためペレット棒を成型しながら押出すことが出来ずにスクリューの回転が停止してしまうことから、この操作が必ず必要である。

4.3.4 ペレット棒生成開始時期

スクリューが回転開始してからペレット棒が押し出し器のノズル先端から出現するまでの時間を調査した。スクリュー回転速度 6rpm の時の結果を表 2 に示す。回転開始後 30 秒程度経過してからペレット棒が出てくることが判明した。ノズル温度によってペレット棒が出てくる時期に違いがあり、実際に JT-60U の実験で使用する場合は、これらのデータの蓄積と CCD カメラ等でのペレット棒モニターが必要である。

表 2 ペレット棒生成開始時期

ノズル温度 (K)	ペレット棒生成開始時期 (スクリュー回転開始～棒の生成開始) (s)	スクリュー回転速度 (rpm)
17.5	29	6
18.0	46	6
18.5	31	6

4.3.5 ペレット棒押出速度

ノズル温度を一定 (17.5K) にした場合の「スクリュー回転速度」と「ペレット棒押出速度」の関係を調査した。6rpm と 8.3 rpm の場合の結果を表 3 に示す。また、スクリューの回転速度

を一定 (6rpm) にした場合の「ノズル温度」と「ペレット棒押出速度」の関係を調査した。結果を表 4 に示す。棒の押出速度の計測は CCD カメラの映像から分析した。ペレット棒速度は、ノズル温度が低いほどが速くなる傾向にあることが確認できた。理由としては、固化したペレットをスクリーが押し固めながら棒状に生成するために、温度が低く硬いペレットほど効率良く生成されているからと考えられる。また、0.5K 程度の温度の違いでもペレット棒押出速度に影響するので安定した温度制御が重要であることが判明した。

表 3 スクリュー回転速度とペレット棒押出速度

スクリー回転速度 (rpm)	ペレット棒 押出速度 (mm/s)	ノズル温度 (K)
6	14.1	17.5
8.3	21.7	17.5

表 4 ノズル温度とペレット棒押出速度

ノズル温度 (K)	ペレット棒 押出速度 (mm/s)	スクリー回転速度 (rpm)
17.5	14.1	6
18.0	12.3	6
18.5	8.6	6

4.3.6 連続生成時間

重水素ペレットの連続生成 (押し出し) 試験を行い、330 秒以上連続生成できることを確認した (図 10)。この時の試験条件を表 5 に示す。JT-60U の放電時間は最大 65 秒であるので十分に使用できる性能であることを確認した。また、ペレット棒のサイズは、生成槽内に仮設した CCD カメラによる映像記録から 2.3~2.8mm 程度のサイズであることが確認できた (カメラは、ペレット棒の平面に対して若干斜め方向から撮影)。ペレット棒の仕様上のサイズは、対辺 2.1mm (対角 2.97mm) であることから、サイズについても仕様をほぼ満足するものであることを確認した。

表 5 生成条件

ノズル温度 (K)	液化器温度 (K)	燃料ガス 供給圧力 (MPa)	燃料ガス 供給流量 (Nl/min)
生成開始時 15.0 (ペレット棒押出時 17.5)	34.0	0.05	5.9

4.4 まとめ

スクリー式ペレット生成器単体での重水素ペレットの連続生成試験を行い、330秒以上連続生成できることを確認した。JT-60Uの放電時間は最大65秒であるので、スクリー式ペレット生成器は十分使用できる性能であると言える。また、ペレット棒のサイズ(断面形状)についても仕様上のサイズ(対辺2.1mm)をほぼ満足することを確認した。ペレット生成手順に関しては、スクリー式ペレット生成器特有の生成方法及び生成特性等について確認できた。高速でのペレット押出試験、及び軽水素ガスでの試験や重水素・軽水素混合ガスでの試験を今後行う予定である。

5. 考察

試験結果から考えられる今後の組合せ試験における課題と対策を以下に述べる。

(1) 生成試験と組合せ試験

スクリー式ペレット生成器を使用する場合、ピストン式ペレット生成器には無い特徴がある。例えば、押し出し器の温度調整、燃料供給流量の調整、スクリー回転速度とペレット棒の押出速度の関係、ペレット棒の生成開始時期等である。これらの特性はスクリー式ペレット生成器単体では概ね確認できたが、装填装置等を組合せた場合に熱伝導及び真空環境が変わるため、これらを考慮した設計を十分に行う必要がある。特に、既設のペレット入射装置構成機器を最大限有効に使用しつつ、スクリー式ペレット生成器のノズル付近の環境(温度、真空度等)への影響を最小限にすることが重要である。

(2) 真空性能に関する検討

ピストン式ペレット生成器の場合は、切断されなかったペレット棒は加速槽に入り加速槽の真空排気系から排気していた。加速槽内には加速ローターが高速回転しているので、加速槽内真空度の低下は加速ローターに影響を与えるが、ピストン式はスクリー式に比べてペレットの量が少ないため、大きな支障はなかった。また、加速槽は生成槽と真空中に仕切られているが、構造上の理由から若干のリークがあった。これについても、ペレット棒押出時間が短いためペレット生成に支障はなかった。スクリー式ペレット生成器を設置する場合は、これら2つの課題を解決する必要がある。そこで、新たにペレット棒の専用排気配管を設けることにより、加速槽真空度に影響を与えないようにする必要があると考えられる。

(3) 断熱性能に関する検討

従来は、ピストン式ペレット生成器から装填装置にペレット棒を導くために、ペレット供給管(銅製配管)を使用していた。ピストン式ペレット生成器の場合、作り貯めておいたペレットを短時間に押しきって使用していたので特に問題はなかったが、スクリー式の場合はペレットの固化とペレット棒成型押出を同時に長時間行うので外部からの入熱に注意する必要がある。さらに、今回の生成試験結果から、ペレット棒の生成可能な温度幅は1K程度であり、0.5Kの温度の違いで棒の押出速度等に有意な影響があることがわかっている。そこで、銅製の

ペレット供給管の代わりに断熱性能の高い材料（テフロン等）を使用する必要がある。また、この内部には広い空間を設け、かつ内部を真空排気することにより、装填装置から押し出し器のノズル部への入熱を最小限に抑えるなどの工夫が必要と考えられる。

6. 結言

ペレット入射装置の高周波数化・長時間化のため、従来のピストン式ペレット生成器から高速で長時間連続ペレット生成が可能なスクリー式ペレット生成器へ変更した。変更後の動作試験（重水素ペレット棒の生成）において、JT-60Uに使用するのに十分なスクリー式ペレット生成器の連続生成機能（330秒以上）を確認した。今後は、真空及び断熱等に関する十分な設計検討を行い、ペレットの切断及び射出のために必要な改造と性能確認を実施し、JT-60Uのプラズマにペレットを入射する予定である。

謝辞

本報告書をまとめるにあたり、有意義なコメント及び御指導をいただいた逆井章トカマク本体機器システム開発グループリーダー及び細金延幸トカマクシステム技術開発ユニット長、山本巧研究主席に深く感謝します。また、ペレット入射装置の改造を進めるに当たっては、科学研究費補助金 基盤研究（A）16206093の補助を受けました。

参考文献

- [1] 平塚一、木津要他「JT-60Uにおける遠心加速方式ペレット入射装置の開発」*Journal of Plasma and Fusion Research* 76(11), pp.1189-1197(2000).
- [2] 市毛尚志、平塚一他「スクリー式生成方式を用いたペレット入射装置の改造」*技術研究会報告*・17, pp.276-279 (2006).

図表リスト

表リスト

- 表 1 冷却時の到達温度
- 表 2 ペレット棒生成開始時期
- 表 3 スクリュー回転速度とペレット棒押出速度
- 表 4 ノズル温度とペレット棒押出速度
- 表 5 生成条件

図リスト

- 図 1 ペレット入射装置設置図
- 図 2 従来のペレット入射装置の構造
- 図 3 スクリュー式ペレット生成器の構造
- 図 4 スクリュー式ペレット生成器の外観
- 図 5 ドライバの外観
- 図 6 温度センサ設置図
- 図 7 スクリュー式ペレット生成器の設置状態外観
- 図 8 ペレット生成試験系統図
- 図 9 ペレット生成試験機器の外観
- 図 10 ペレット棒の写真

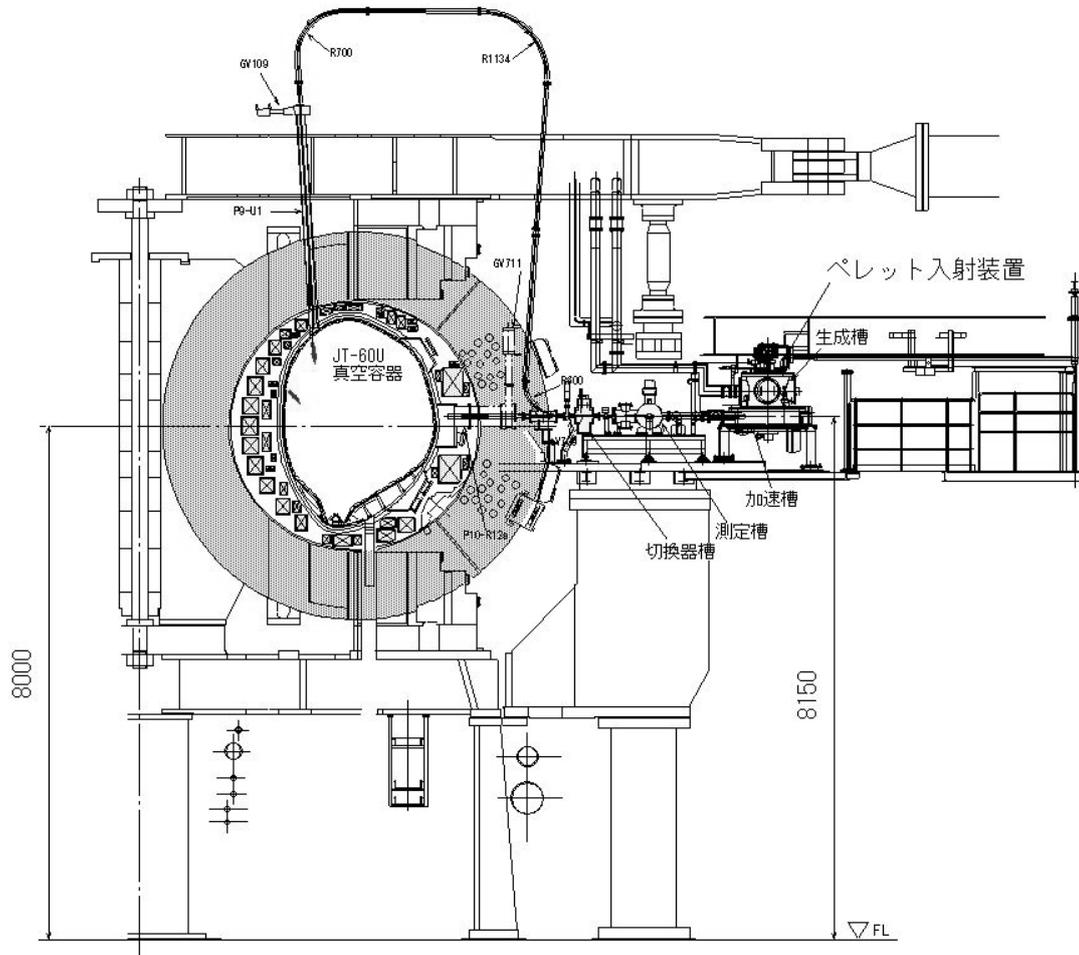


図1 ペレット入射装置設置図

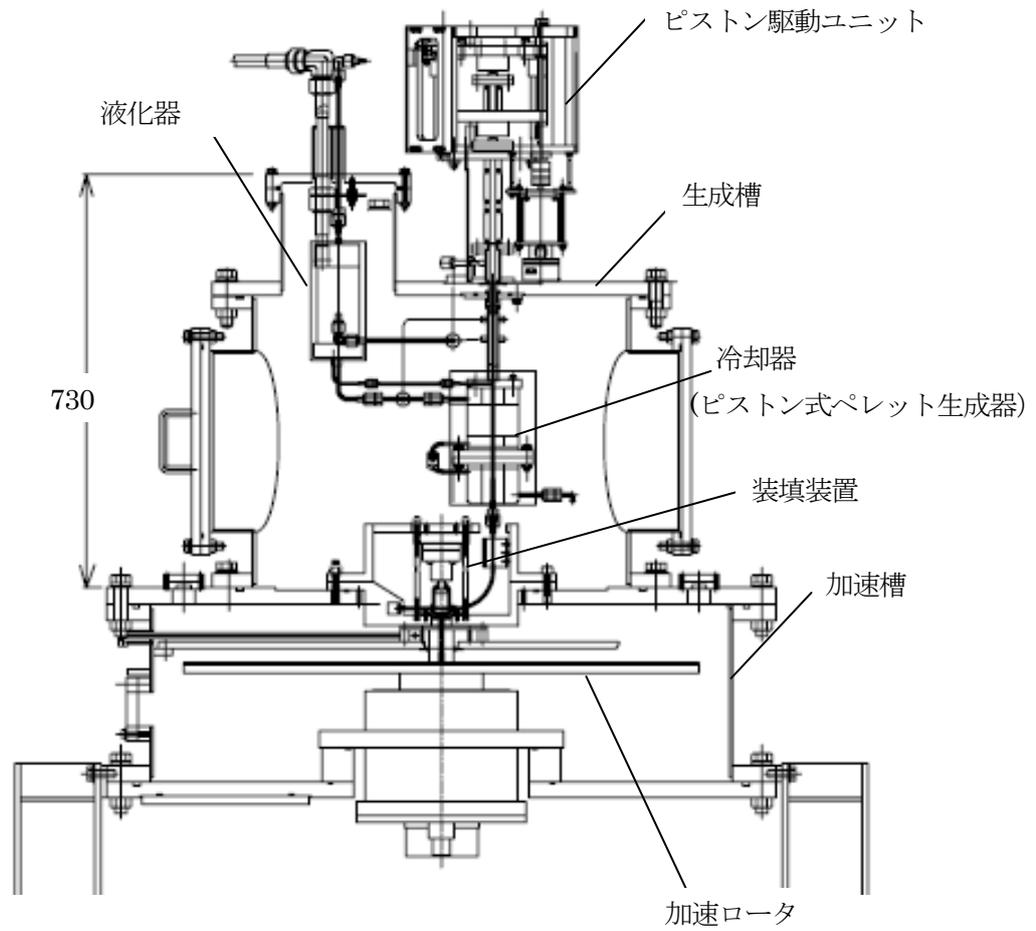


図2 従来のペレット入射装置の構造

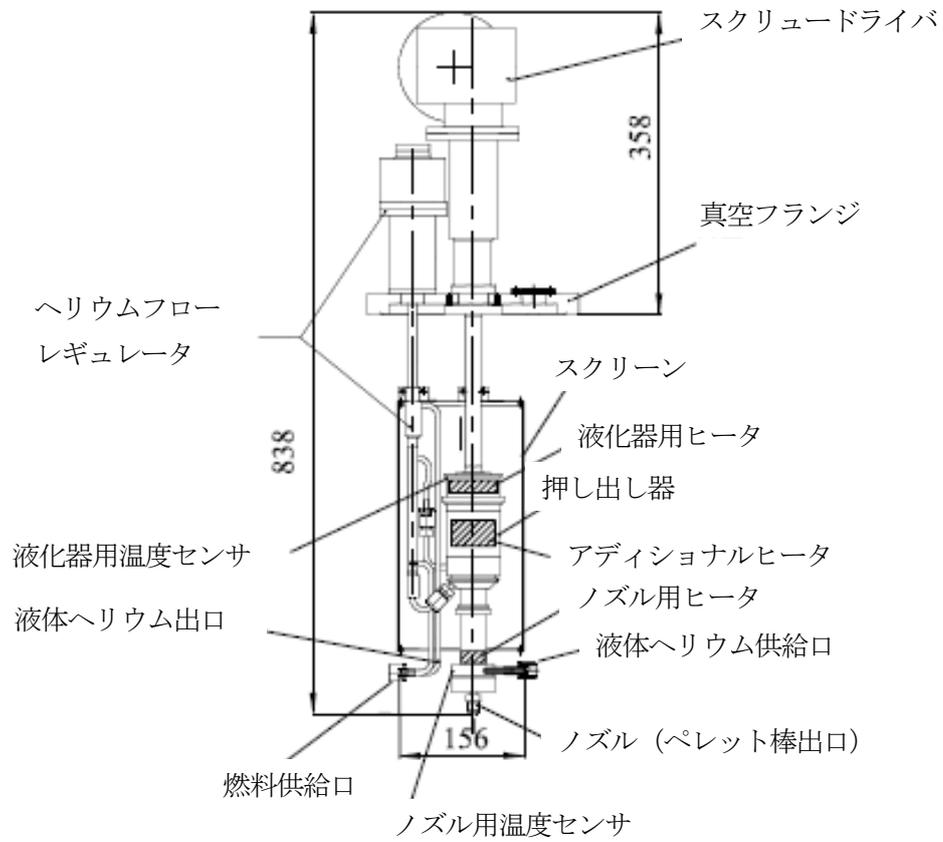


図3 スクリュー式ペレット生成器の構造



図4 スクリュー式ペレット生成器の外観

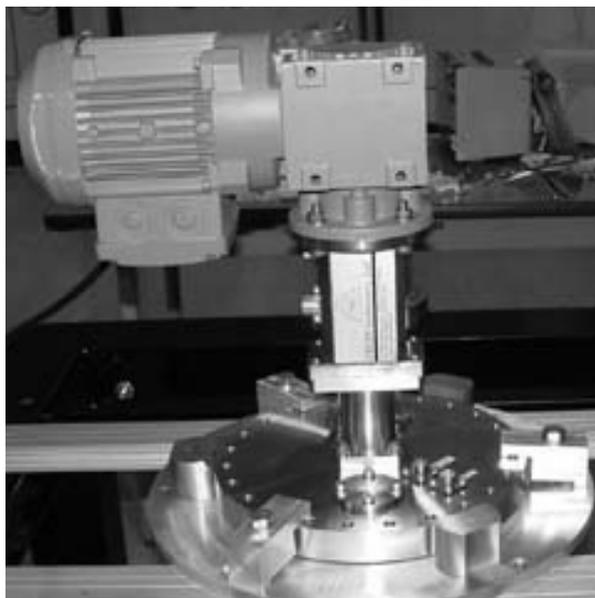


図5 ドライバの外観

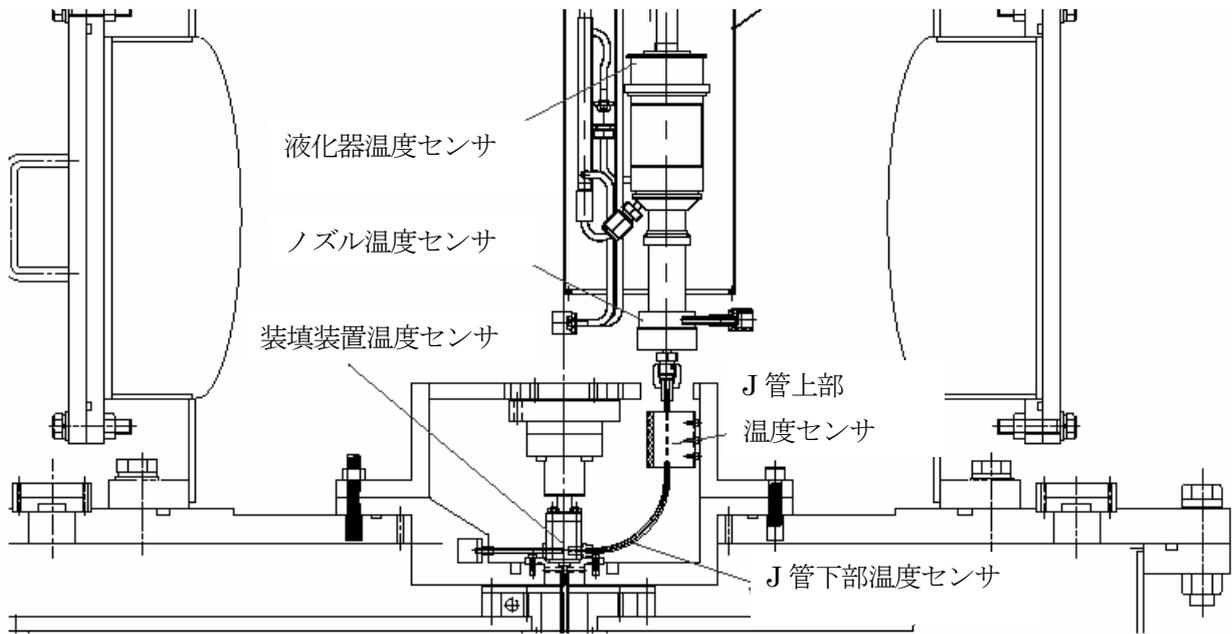


図6 温度センサ設置図

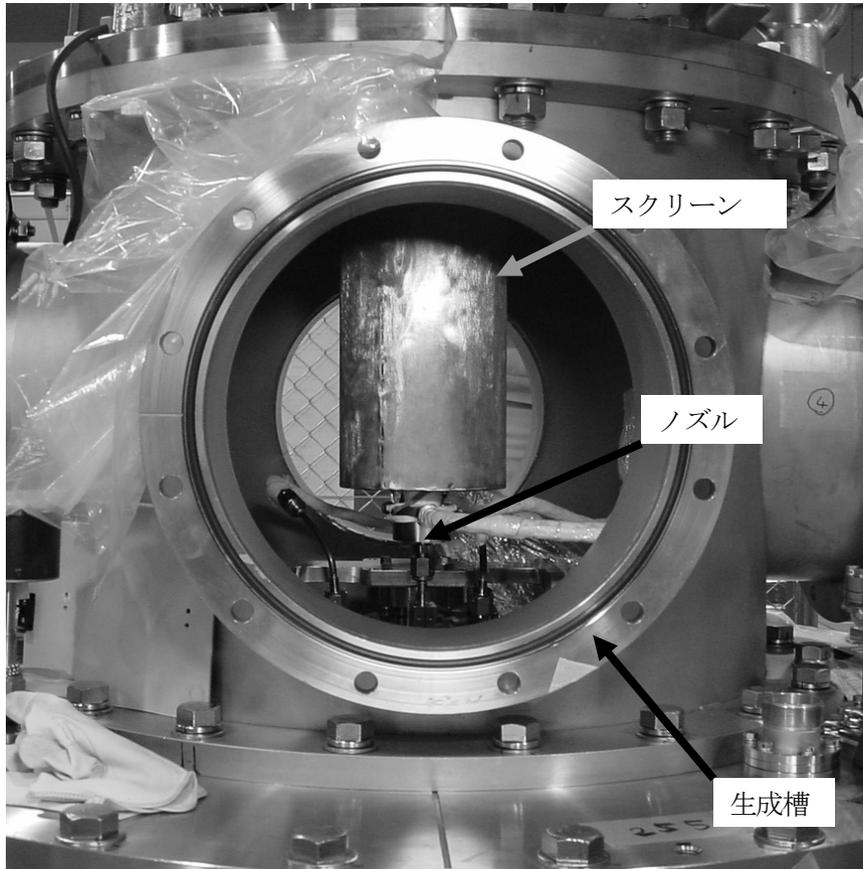


図7 スクリュー式ペレット生成器の設置状態外観

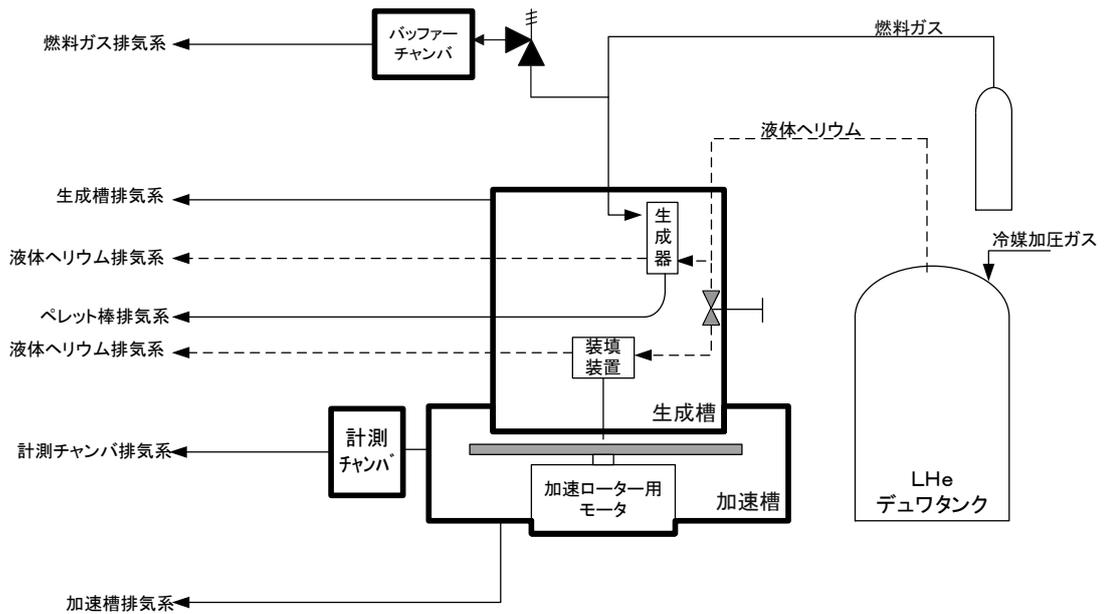


図8 ペレット生成試験系統図

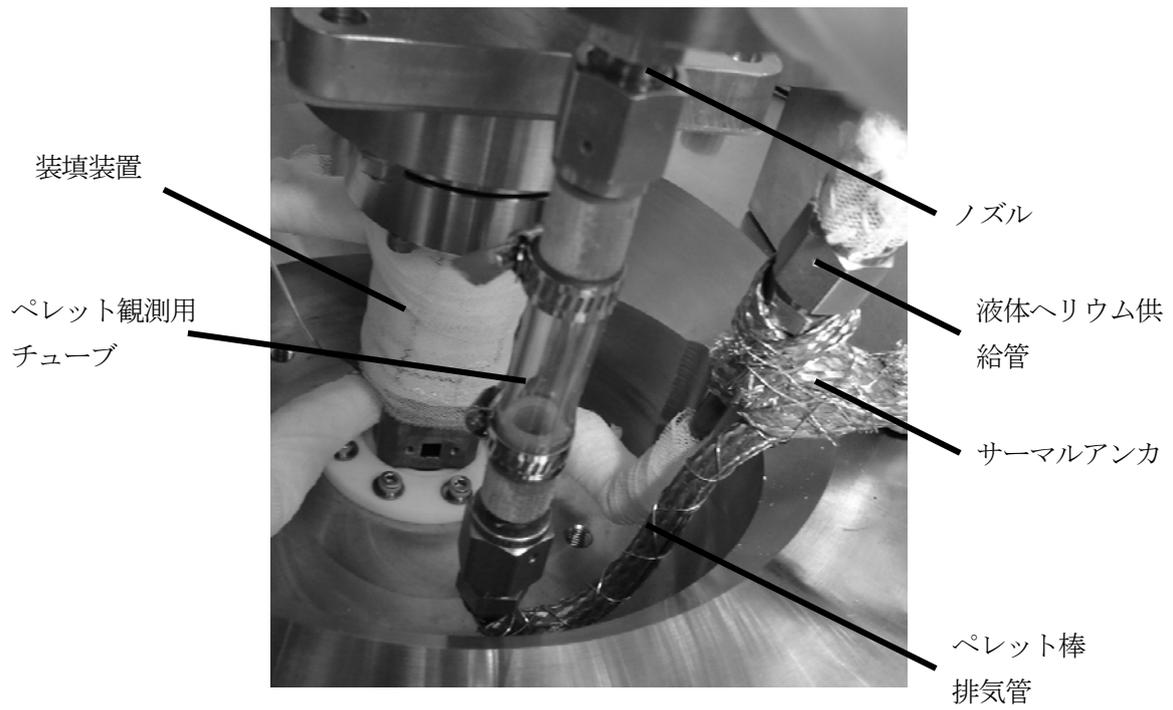


図9 ペレット生成試験機器の外観

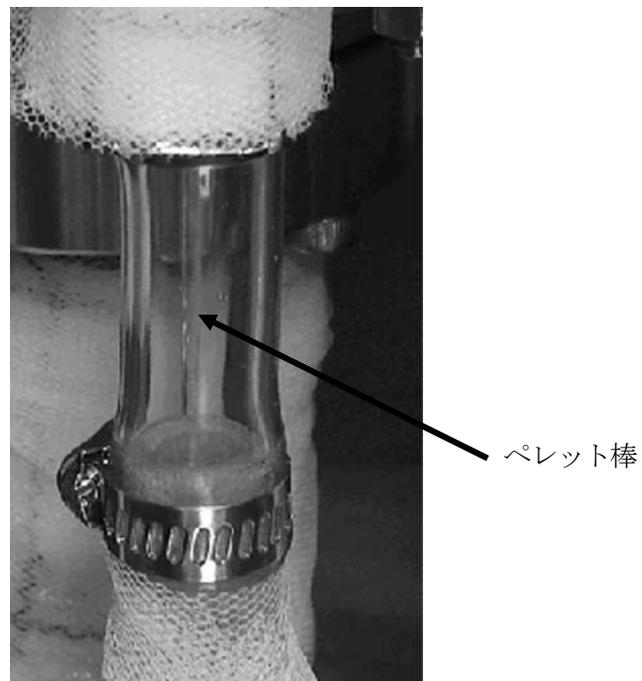


図10 ペレット棒の写真

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
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	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 ¹ ・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 ¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ¹ ・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 ¹ ・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
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束	テスラ	T	Wb/m ²	kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射	ルーメン	lm	cd・sr ^(e)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の) 放射能	ルクス	Lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻² ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
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	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。組立単位を形成するときのいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 実際には、使用する時は記号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	ニュートンメートル	N・m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ¹ ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ¹ ・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 ¹ ・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 ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
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毎ケルビン	J/(kg・K)	m 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 ¹ ・kg ¹ ・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 ¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ¹ ・kg ¹ ・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 ¹ ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・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 ¹ ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ¹ ・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 ¹ ・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グレイ	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A
吸収線量	グレイ	Gy	m ² ・s ⁻²
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ¹ ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =m ⁻¹ ・kg ¹ ・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 ¹ ・s ⁻³ =kg ¹ ・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
スチルブ	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=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ hm
ジャンマ	y	1 y=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	fm	1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat = 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	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

