

J-PARC 3GeVシンクロトロン真空システム機器 の耐放射線試験

Radiation Resistance of Vacuum Equipment in J-PARC RCS

三尾 圭吾 荻原 徳男 丸下 元治 荒井 秀幸
後藤 敬一

Keigo MIO, Norio OGIWARA, Motoharu MARUSHITA, Hideyuki ARAI
and Keiichi GOTOU

J-PARCセンター
加速器ディビジョン

Accelerator Division
J-PARC Center

March 2010

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, 2010

J-PARC 3GeV シンクロトロン真空システム機器の耐放射線試験

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター

加速器ディビジョン

三尾 圭吾^{*1}、荻原 徳男、丸下 元治^{*1}、荒井 秀幸^{*1}、後藤 敬一^{*1}

(2009年12月7日受理)

J-PARC 3GeV シンクロトロン (RCS) 主トンネル内は、大強度陽子加速に伴う高放射線環境となる。真空システムの構築に当たっては、主トンネル設置機器の耐放射線性目標値を 10MGy 以上とした。

本システムで用いる機器を選定するため、ガンマ線照射施設を用いて照射試験を実施した。

試験の結果、冷却ファン、スパッタリングイオンポンプ用高压導入端子、ベーキングヒーター、配管シール材について照射線量 10MGy の耐放射線性を確認した。

ドライスクロールポンプについては、サブトンネルにおける目標である 1MGy の耐放射線性を確認した。

J-PARC センター：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

^{*1} 出向職員 (株式会社 IHI)

^{*1} 株式会社 IHI

Radiation Resistance of Vacuum Equipment in J-PARC RCS

Keigo MIO^{※1}, Norio OGIWARA, Motoharu MARUSHITA^{*1}, Hideyuki ARAI^{*1} and Keiichi GOTOU^{*1}

Accelerator Division
J-PARC Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 7, 2009)

Intense of radiation fields will be expected since large intensity proton beam current of J-PARC 3GeV RCS(Rapid-Cycling Synchrotron). Gamma-Ray irradiation tests of vacuum system equipment were carried out to evaluate radiation resistance for RCS. Requirement of Radiation resistance of vacuum equipment is assumed as 10MGy at main tunnel. Gamma-Ray irradiation examination has been done to select the vacuum equipemnt.

As a result, cooling fan, feed-through-connector, baking heater, piping Sealants have been shown to have radiation resistance as 10MGy.

Dry scroll vacuum pump was evaluated as 1MGy radiation resistance that is enough for use at sun tunnel.

Keywords: Vacuum Equipment, J-PARC, RCS, Radiation Resistance, Irradiation Test, Cooling Fan, Feed-through Connector, Baking Heater, Piping Sealants, Dry Scroll Vacuum Pump

※1 Research Staff on loan (IHI Corporation)

*1 IHI Corporation

目次

1	はじめに	1
2	試験条件	1
2.1	試験対象	1
2.2	照射試験施設	1
2.3	冷却ファン	1
2.3.1	冷却ファン仕様	1
2.3.2	照射線量	2
2.3.3	試験項目	2
2.3.4	照射試験機器	2
2.4	SIP用高圧導入端子	2
2.4.1	照射線量	2
2.4.2	試験項目	2
2.5	ベーキングヒーター（マントルヒーター）	3
2.5.1	照射線量	3
2.5.2	試験項目	3
2.6	配管シール材	3
2.6.1	試験体	3
2.6.2	試験項目	3
2.7	ドライスクロールポンプ(DSP)	4
2.7.1	DSP仕様	4
2.7.2	照射線量	4
2.7.3	試験項目	4
3	試験結果	5
3.1	冷却ファン	5
3.1.1	外観	5
3.1.2	ファン電流	5
3.1.3	回転数	5
3.1.4	フレーム温度	5
3.1.5	巻線抵抗	5
3.1.6	試験結果まとめ	5
3.2	SIP用高圧導入端子	6
3.2.1	外観検査	6
3.2.2	真空リーク試験	6

3.2.3	高電圧印加試験	6
3.2.4	動作試験	6
3.2.5	試験結果まとめ	6
3.3	ベーキングヒーター（マントルヒーター）	6
3.3.1	外観検査	6
3.3.2	電氣的試験・動作試験	6
3.3.3	試験結果まとめ	7
3.4	配管シール材	7
3.4.1	気密試験	7
3.4.2	テフロンシールテープ引張り試験	7
3.4.3	試験結果まとめ	7
3.5	ドライスクロールポンプ(DSP)	7
3.5.1	照射線量率・線量	7
3.5.2	DSP 動作試験	7
3.5.3	DSP 部品確認	7
3.5.4	試験結果まとめ	8
4	考察	9
4.1	材料物性値の変化と機器性能	9
5	まとめ	9
	謝辞	10
	参考文献	10

Contents

1. Introduction	1
2. Procedure of examination	1
2.1 Examination object	1
2.2 Irradiation facility	1
2.3 Cooling fan	1
2.3.1 Specification of the Cooling fan	1
2.3.2 Dose level	2
2.3.3 Examination item	2
2.3.4 Examination set up	2
2.4 High voltage feedtrough for SIP	2
2.4.1 Dose level	2
2.4.2 Examination item	2
2.5 Baking heater	3
2.5.1 Dose level	3
2.5.2 Examination item	3
2.6 Sealant for piping	3
2.6.1 Examination object	3
2.6.2 Examination item	3
2.7 Dry scroll vacuum pump (DSP)	4
2.7.1 Specification of normal DSP	4
2.7.2 Dose level	4
2.7.3 Examination item	4
3. Examination result	5
3.1 Cooling fan	5
3.1.1 Appearance	5
3.1.2 Electric current	5
3.1.3 Rotation rate	5
3.1.4 Temperature of fan frame	5
3.1.5 Electric resistance of fan coil	5
3.1.6 Summary of the examination	5
3.2 High voltage feedtrough for SIP	6
3.2.1 Appearance	6

3.2.2 Leak rate	6
3.2.3 High voltage proof test	6
3.2.4 Operating test	6
3.2.5 Summary of the examination	6
3.3 Baking heater	6
3.3.1 Appearance	6
3.3.2 Electric and operation test	6
3.3.3 Summary of the examination	7
3.4 Sealant for piping	7
3.4.1 Gas leak test	7
3.4.2 Elongation examination of sealing tape	7
3.4.3 Summary of the examination	7
3.5 Dry scroll vacuum pump (DSP)	7
3.5.1 Dose level	7
3.5.2 Operating test of DSP	7
3.5.3 Parts inspection of DSP	7
3.5.4 Summary of the examination	8
4. Consideration	9
4.1 Material degradation and operating performance	9
5. Summary	9
Acknowledgements	10
References	10

1. はじめに

J-PARC 3GeV シンクロトロン (RCS) 主トンネル内は、大強度陽子加速に伴う高放射線環境となる。真空システムの構築に当たっては、機器の耐放射線性を 10MGy 以上、サブトンネル設置機器については 1MGy 以上とした。

本システムで用いる機器を選定するため、ガンマ線照射施設を用いて照射試験を実施した。

2. 試験条件

2.1 試験対象

主トンネルで使用する真空機器の内、耐放射線性の試験が必要な機器は、金属以外の樹脂及び電子部品が使われた機器であるとして選定した。抽出された試験対象のうち、ここでは冷却ファン、SIP 用高圧導入端子、ベーキングヒーター (マントルヒーター)、配管シール材およびドライスクロールポンプ(DSP)について報告する。

なお、ケーブル、ターボ分子ポンプ(TMP)についても耐放射線性を評価する必要があるが、これらは別に報告されている。

2.2 照射試験施設

照射はコバルト 60 によるガンマ線照射とし、JAEA 高崎量子応用研究所、第 1 照射棟にて行った。照射線量はアラニン線量計を使用して線量率を測定し、積算照射時間との積として算出した。

2.3 冷却ファン

冷却ファンは TMP などの冷却に使用するが、DC モーターは半導体などが使用されているので耐放射線性は期待できない。そこで半導体などを使用していない AC モーターを選定し、ベアリング部分に耐放射線性のグリスを充填したファンを開発し、改良前のファンと共にガンマ線照射場で回転させ、それぞれの耐放射線性を調査することとした。

2.3.1 冷却ファン仕様

耐放射線試験に用いる冷却ファンは、金属筐体の AC ファンとして、機器組込送風用ファン「TLS450C (ローヤル電機)」を選定した。従来の知見から、放射線照射による、ベアリングの固着が予想されたので、ベアリング部のグリスを改良したものを試作した。また、樹脂の劣化が想定されるので、樹脂製のコネクタは取り外した。

照射試験に供したファンは、メーカー出荷状態のファンに対して、引き出し電線を PEEK 絶縁電線に置き換えただけの「標準仕様ファン」、ベアリングのグリスを耐放射線性の物に交換した「耐

放射線仕様ファン」の2種類である。

構造を図 1 に示す。また、材料に関する仕様を表 1 に、性能を表 2 に示す。

2.3.2 照射線量

冷却ファン試験の照射はファンが異常を起こすまでとし、照射線量の目標は 10MGy である。

照射線量率は、線源側と、線源反対側の冷却ファン中心部にて測定した線量の平均値とした。測定箇所と測定値例を図 5 に示す。測定結果より耐放射線仕様ファン照射線量率は 6.74kGy/h 等、標準仕様ファン照射線量は 8.19kGy/h 等とした。

2.3.3 試験項目

照射試験において、試験した項目を表 3 に示す。特に、回転数はセル内でのファンを常時測定することとした。

2.3.4 照射試験機器

照射試験機器の系統を図 2 に示す。ファンを照射中に、照射室外から温度、電流、回転数をモニターできるようにした。照射室内にファンを設置した状況を図 3 に示す。回転数を検知するピックアップコイルは新たに開発した。形状と出力波形例を図 4 に示す。

2.4 SIP 用高圧導入端子

スパッタリングイオンポンプ(SIP)はリングの排気のために用いられる。SIP 本体は耐放射線性は十分あると考えられる。しかし、高電圧が印加される、高圧導入端子(feed trough)はいくつかの形式があり、耐放射線性の実績が不明であったので、照射試験を行い、耐放射線性を確認することとした。SIP と、高圧導入端子の外形を図 8 および図 9 に示す。

2.4.1 照射線量

照射線量は 10MGy とした。

2.4.2 試験項目

(1)真空リーク試験

照射後の高圧導入端子を真空チェンバーに取付け、ヘリウムリークディテクタを用いてリークテストを実施し、リークがないことを確認する。

(2)高電圧印加試験

大気中において、高圧導入端子に高電圧 (7kV) を印加させ、絶縁不良を起こしていないことを確認する。

(3)イオンポンプに取り付けての動作確認試験

イオンポンプに高圧導入端子を取り付けて高圧を印加し、長時間安定して動作することを確認する。

2.5 ベーキングヒーター（マントルヒーター）

マントルヒーター形式のベーキングヒーターを RCS 真空システムのコールドカソードゲージ (CCG) とスパッタイオンポンプ(SIP)のベーキングのために用いる。実機と同様の材料を使用したマントルヒータサンプルを用意し、ガンマ線を照射し、対放射線性を確認する。

2.5.1 照射線量

照射線量は 10MGy とした。

2.5.2 試験項目

以下の確認を実施することとした。

(1)外観

ヒーターの変色、硬化等の有無を目視および触診検査により確認する

(2)電気的特性

絶縁抵抗、耐電圧(1000v)、ヒーターの抵抗値を計測する。

(3)空焚き

ヒーターに通電し、問題ないことを確認する。

2.6 配管シール材

圧空作動式ゲートバルブなどの圧空配管は、原則として溶接構造としているが、保守などで取り外す可能性のある電磁バルブ等には、ねじ込み継ぎ手を使用している。これら継ぎ手に使用するシール材の耐放射線性を調査した。シール材で接続した継ぎ手（15A ねじ込みキャップ）にガンマ線を照射し、照射後に気密漏洩試験を実施した。

2.6.1 試験体

試験に供したシール材と使用箇所を表 11 に示す。主トンネルにおいて、実機に使用したシール材は、表の第 1 項に示したロックタイト 5 6 7 である。第 4 項～第 7 項のシール材については、固着して外せないおそれ等があるので、実機には適用しなかった。

サブトンネルの圧空配管継手には、テフロン製のシールテープおよび、スリーボンド 1 1 9 4 を使用している。

2.6.2 試験項目

シール材の試験方法は気密漏洩試験とし、窒素で加圧(0.7MPa)し、圧力計および発泡液にて漏洩なきことを確認する。保持時間は 5 分とした。試験状況を図 13 に示す。

なお、テフロンは放射線に弱く、1kGy 程度で強度が期待できなくなると言われている。テフロンシールテープについては、引っ張り強度試験もあわせて行った。試験方法は「JIS K7127 プラスチックー引張特性の試験方法 第3部：フィルムおよびシート」の試験条件に準拠し、シールテープをバネはかりで引っ張って、切断時の加重を測定した。

2.7 ドライスクロールポンプ(DSP)

DSP は TMP のフォアラインポンプとして使用するが、耐放射線性のデータは得られていなかったため、照射試験を行い耐放射線性を評価することとした。

2.7.1 DSP 仕様

試験対象とした DSP は ISP-250B (アネスト岩田製) で、排気速度 250 l/min、到達圧力 1.6 Pa の性能である。DSP 仕様を表 14 に示す。

2.7.2 照射線量

DSP は放射線に弱いテフロンをポンプのシール材に使用しているため、主トンネルに設置する他機器と同様の照射線量 10MGy レベルの耐放射線性は期待できない。一方、DSP は設置場所の自由度があるので、必ずしも RCS 主トンネルビームライン近くの高線量率の場所に据付ける必要が無く、サブトンネルにも設置可能である。目標とする耐放射線性は照射線量 1MGy とした。

2.7.3 試験項目

試験項目は動作試験と照射後の部品確認とした。動作試験では照射前後のポンプの特性を比較することで照射による影響を確認する。動作試験項目を表 15 に示す。

3. 試験結果

3.1 冷却ファン

標準仕様ファン停止まで、および耐放射線仕様ファン停止までの累積照射線量を表 4 に示す。標準仕様ファンは約 15MGy、耐放射線仕様ファンは約 60MGy まで正常回転した。

3.1.1 外観

目視による検査結果を表 5 に示す。照射線量 15MGy 到達時には、耐放射線仕様ファン絶縁チューブ（シリコンチューブ製）に割れの発生が確認されたので、カプトンテープによりケーブルを保護した。図 6 に各ファンの引き出し線の絶縁確保の様子を示す。

標準仕様ファンについては、事前にケーブルの絶縁材を PEEK に置き換えたこともあり、15MGy 照射後、変色以外の異常は認められなかったが、内部のベアリングが固着しファンが停止した。

3.1.2 ファン電流

測定結果を表 6 に示す。いずれのファンも停止まで電流値に大きな変化は確認されなかった。

3.1.3 回転数

ファン回転数測定結果を図 7 に示す。耐放射線仕様ファン（グリス交換ファン）、標準仕様ファン共に、停止まで有意な回転数変化は観測されなかった。

3.1.4 フレーム温度

測定結果を表 7 に示す。両仕様のファン共にフレームの温度上昇は確認されなかった。

3.1.5 巻線抵抗

測定結果を表 8 に示す。積算線量が約 15MGy の時点では、両仕様のファン共に巻線抵抗の変化は確認されなかった。約 60MGy 照射後の耐放射線仕様ファンは巻線の腐食が発生しており、抵抗が大幅に増加している。コイルの導通が失われたことによってファンが停止したと考えられる。

3.1.6 試験結果まとめ

標準仕様ファンは約 15MGy、耐放射線ファンは約 60MGy まで正常回転した。従って、標準仕様ファン、耐放射線ファンどちらを選定しても、少なくとも 10MGy の耐放射線性を有することを確認した。

実機では、標準仕様ファンを使用し、引き出しリード線及びコネクタを PEEK 絶縁としたものを用いることとした。

3.2 SIP 用高圧導入端子

10MGy 照射後の試験結果を以下に示す。

3.2.1 外観検査

照射前・照射後の比較を図 10 に示す。照射により安全回路の絶縁材①と高圧印加部分②の部品の変色が確認された。

3.2.2 真空リーク試験

10MGy 照射後の SIP 用高圧導入端子を真空チェンバーに取付け、ヘリウムリークディテクタを用いてリークテストを実施し、高圧導入端子に有意なリークがないことを確認した。

3.2.3 高電圧印加試験

大気中において、SIP 用高圧導入端子に高電圧 7kV を印加し、絶縁計が 20MΩ のレンジにてレンジオーバーであることを確認した。

3.2.4 動作試験

200L/s の容量のイオンポンプ (Gamma Vacuum 社製 Low Profile 200L) に SIP 用高圧導入端子を取付けて運転し、イオンポンプが長時間 (一週間) 安定して動作するか調査した。試験結果を図 11 に示す。試験中の圧力は $6.7 \times 10^{-7} \sim 1.1 \times 10^{-6}$ Pa、放電電流は 10~20 μA で安定していた。

3.2.5 試験結果まとめ

10MGy 照射後の SIP 用高圧導入端子は、絶縁体の変色したが、使用上の問題は生じなかった。本結果から、SIP 用高圧導入端子は 10MGy 以上の耐放射線性があると判断した。

3.3 ベーキングヒーター (マントルヒーター)

15.5MGy 照射後の試験結果を以下に示す

3.3.1 外観検査

照射後のマントルヒーター外観を図 12 に示す。リード線が黄色く変色したが、硬化等問題のないレベルであった。

3.3.2 電氣的試験・動作試験

電気抵抗測定、絶縁抵抗(100MΩ 以上)、耐電圧(1000V 一分間)について、試験結果はすべて正常であった。空炊き試験に関しても正常であった。

電気抵抗測定結果を表 9 に示す。その他の試験結果を表 10 に示す。

3.3.3 試験結果まとめ

照射線量 15.5MGy においてマントルヒーターは、試験および使用上において問題は生じなかった。本マントルヒーターは 10MGy 以上の耐放射線性があると判断される。

3.4 配管シール材

3.4.1 気密試験

試験結果を表 12 および、表 13 に示す。すべての試験体で漏洩はみられなかった。

3.4.2 テフロンシールテープ引張り試験

テフロンシールテープのガンマ線照射後のシール性能の健全性は気密試験で確認したが、シール材そのものの強度劣化を調べるため、引っ張り試験を行った。結果を図 14 に示す。照射線量 20kGy において切断加重は 1 / 4 以下となった。

3.4.3 試験結果まとめ

主トンネル用シール材は 10MGy、サブトンネル用シール材は 0.1MGy の耐放射線性を有すると結論した。サブトンネルの予想される線量率は出射部において最大 280mGy/h²程度と考えられるが、加速器の運転時間を年間 5500 時間とすれば、0.1MGy 到達まで約 60 年経過することとなる。したがって、サブトンネルシール材についても耐放射線性の問題はないと考えられる。

3.5 ドライスクロールポンプ(DSP)

3.5.1 照射線量率・線量

照射セル内での照射線量率は、ポンプ本体及びモータ部に対してそれぞれ 6.08 kGy/h、5.35 kGy/h であった。約 200 時間照射を行うことで照射線量 1MGy ととした。

3.5.2 DSP 動作試験

照射前後における動作試験の結果を表 16 に示す。到達圧力及び真空リーク率が照射前より若干悪化しているが、その他の数値にはほとんど変化が見られなかった。

3.5.3 DSP 部品確認

DSP の照射後、変化した部品を表 17 に示す。到達圧力及び真空リーク率が悪化した原因は、摺動部のチップシール及びケーシングのシール材である O リングの劣化によるものと推定される。原因を特定するために、チップシール及び O リングを新品に交換し、到達圧力と真空リーク率を測定した。測定結果を表 18 に示す。部品交換後、到達圧力は照射前の性能に復旧したが、真空リーク率は復旧しなかった。このことから到達圧力悪化の原因はチップシール及び O リングの劣化にあることが分かった。なお、真空リーク率の増大原因は、交換しなかった軸シール部からの

リークと推定される。

3.5.4 試験結果まとめ

DSP は照射線量 1MGy 後においても、到達圧力は実用の範囲内であった。したがって、DSP は 1MGy の耐放射線性があると判断できる。一方、照射後の部品確認においては、チップシールが硬化し、もろくなる劣化が観測された。従って DSP に対しては、定期的な検査・保守を行っていく必要があるとかがえられる。この結果を受けて、保守などの容易さを考慮して、DSP をサブトンネルに設置することとした。

4. 考察

4.1 材料物性値の変化と機器性能

本報告において、真空システムに用いる機器の耐放射線性を確認した。確認は、照射前後の機器性能の比較あるいは照射中に性能が維持されるかという観点で行った。したがって、機器としての性能が保たれているが、機器を構成する素材の劣化は進んでいる場合もあるが、機器性能が発揮されている間は問題ないとした。

例として、テフロンシールテープについては、気密試験とは別に素材の引張強度試験も行ったが、引張試験の結果、テフロンシールテープの強度は1/4程度に劣化していた。この状態でも気密試験では漏れは観測されなかった。シールテープは単体で照射し、気密試験用サンプルは継手にねじ込んだ状態で照射した。本ケースは照射形態の違いによって、シールテープの劣化度合いが異なっている可能性もあるが、本例のように、機器性能が保たれている場合でも、素材の劣化は進んでいる場合があるので点検等においては留意が必要と考えられる。

DSP に関しても上と同様に、照射後の試験においては大きな性能劣化は観測されなかったが、部品レベルではシール材がもろくなるなどの劣化が見られた。DSP に関しても定期的な保守を計画すべきと考えられる。

5. まとめ

J-PARC 3GeV RCS 真空システム機器の中で、耐放射線性を確認する必要がある冷却ファン、スパッタリングイオンポンプ(SIP)用高圧導入端子、ベーキングヒーター、配管シール材、ドライスクロールポンプ(DSP)を対象として、コバルト 60 によるガンマ線照射試験を行った。それぞれ機器に応じて、照射前と照射後の試験項目を設定し、耐放射線性を評価した。

冷却ファンについては、標準仕様ファン、耐放射線グリスを使用した耐放射線仕様ファンともに、照射線量 10MGy の耐放射線性が確認された。

SIP 用高圧導入端子、ベーキングヒーターについても、照射線量 10MGy の耐放射線性が確認された。

シール材については、主トンネル用のシール材について照射線量 10MGy において気密の漏洩がないことを確認した。サブトンネルのシール材であるテフロンシールテープは、照射線量 0.1MGy において気密の漏洩がないことを確認した。また、サブトンネルの線量評価結果から算出したところ、テフロンシールテープの耐放射線性は少なくとも66年間となり、問題ないとした。

DSP に関しては、照射線量 1MGy の耐放射線性を確認した。ただし、チップシールの劣化が見られたので定期的な保守が必要と考えられる。DSP はサブトンネルに設置することとした。

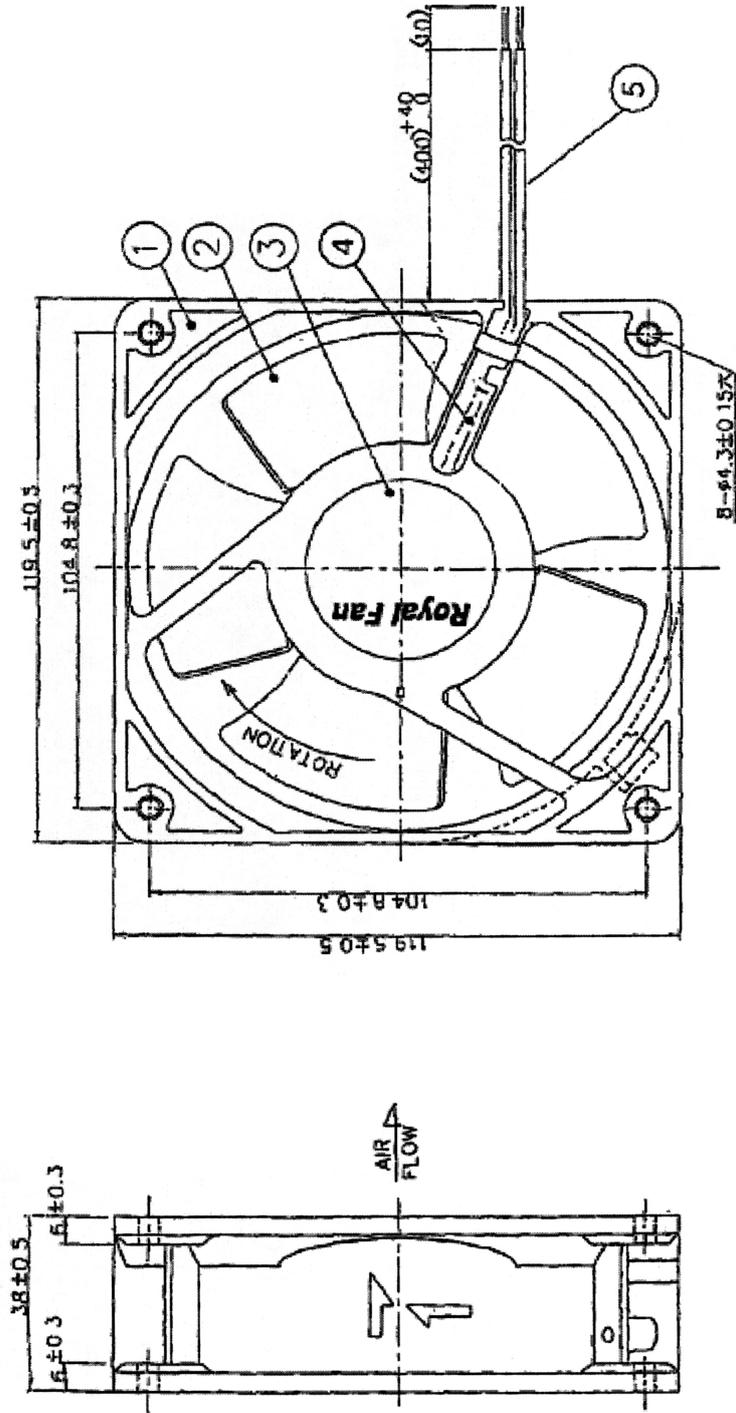
上記の耐放射線性評価結果を反映し実機を建設した。現在、これら機器は安定に稼働している。

謝辞

アネスト岩田株式会社の方々に DSP の改良チップシールを試作いただいた。株式会社東京技術研究所の方々にベーキングヒーターサンプルを製作いただいた。ガンマ線照射試験では、J-PARC センター、草野譲一氏、金正倫計氏、竹田修氏に照射計画について、高崎量子応用研究所、森下憲雄氏に照射時の配置など詳細をご指導いただいた。深く感謝する。

参考文献

- 1) K.Wada, T.Inohara, M.Yoshida, Y.Yamato, T.Nakayasu, M.Iguchi, Y.Hikichi, M.Kinsho, N.Ogiwara, and K.Mio : “Development of the Radiation-hardened Magnetically Suspended Compound Molecular Pump”, 4th Vacuum And Surface Sciences Conference of Asia and Australia, Matsue, Japan, (2008).
- 2) N.Nakao, N.Mokhov, K.Yamamoto, et al. : “MARS14 Shielding Calculations for the J-PARC 3GeV RCS” , KEK Report 2004-1 (2004).



品番	部品名	備考
1	アルミフレーム	アルミ合金、黒色塗装
2	羽根A s s y	鉄、黒色塗装
3	銘板	ポリエスチレンフィルム
4	リード線	PEEK 絶縁ケーブル

図 1. 冷却ファン外形図 (標準FAN (2))

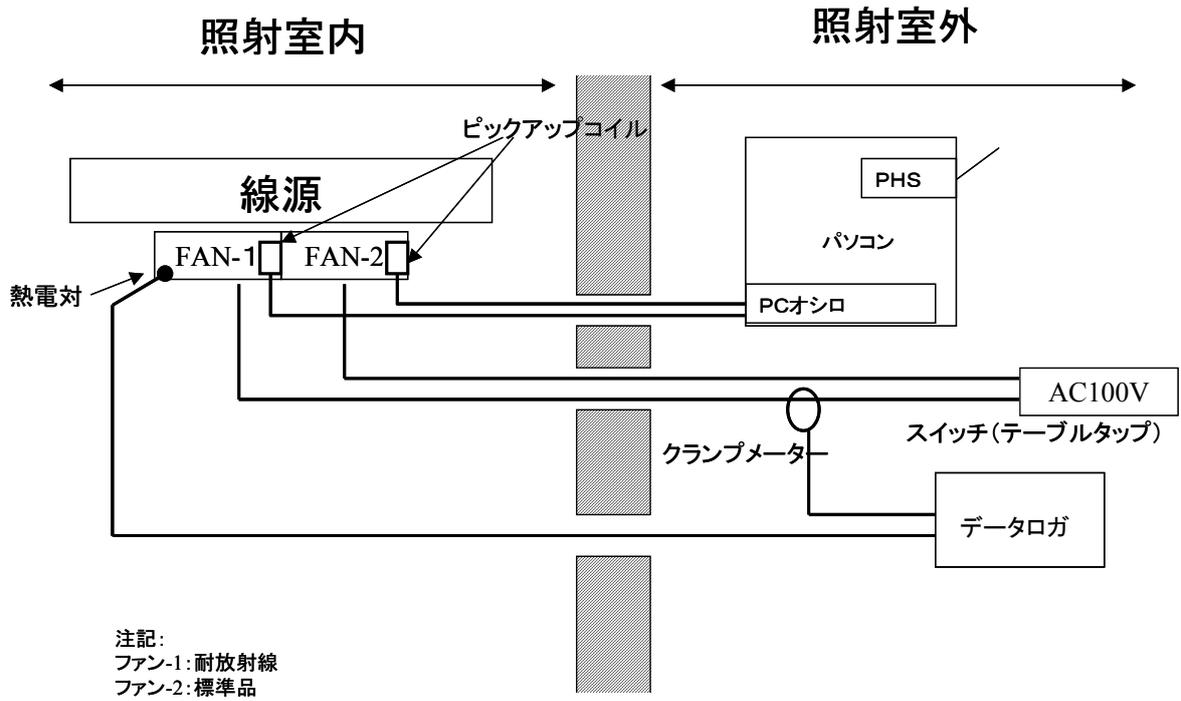


図 2. 照射試験機器系統図

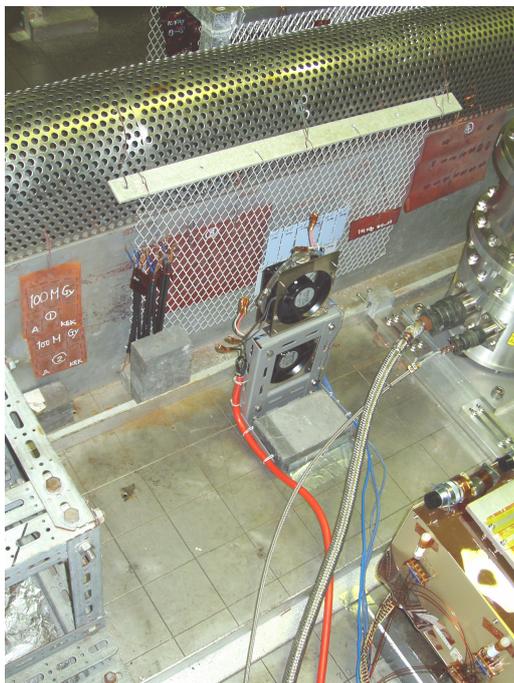


図 3. 照射セル内状況

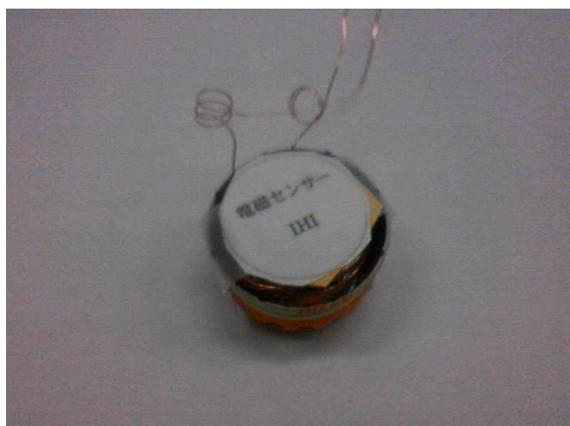
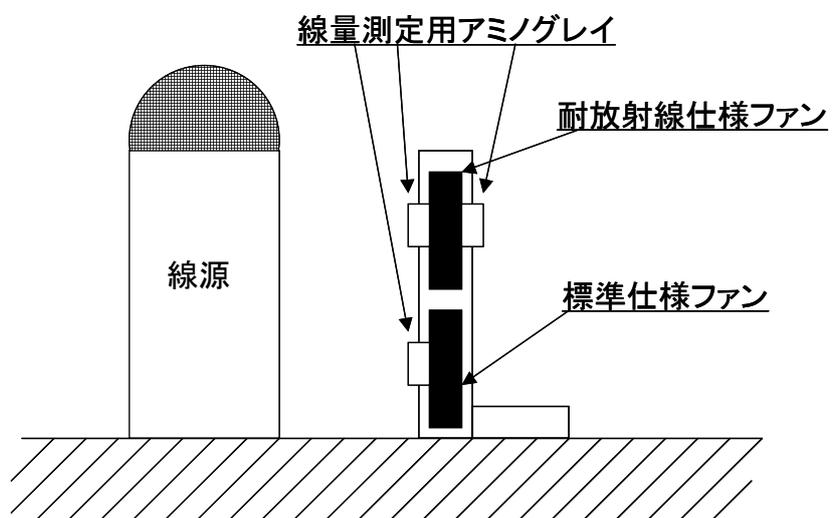


図 4. 回転数を検知するピックアップコイルと出力波形例 (1ms、20mV/div)



番号	測定箇所	線量率
1	線源側の冷却ファン中心部（耐放射線性仕様ファン）	8.56kGy/h
2	線源反対側の冷却ファン中心部（耐放射線性仕様ファン）	4.91kGy/h

図 5. 冷却ファン照射線量率の測定例



図 6. 耐放射線仕様ファンの絶縁確保の様子(左) 標準仕様ファンの PEEK ケーブル接続状態(右)

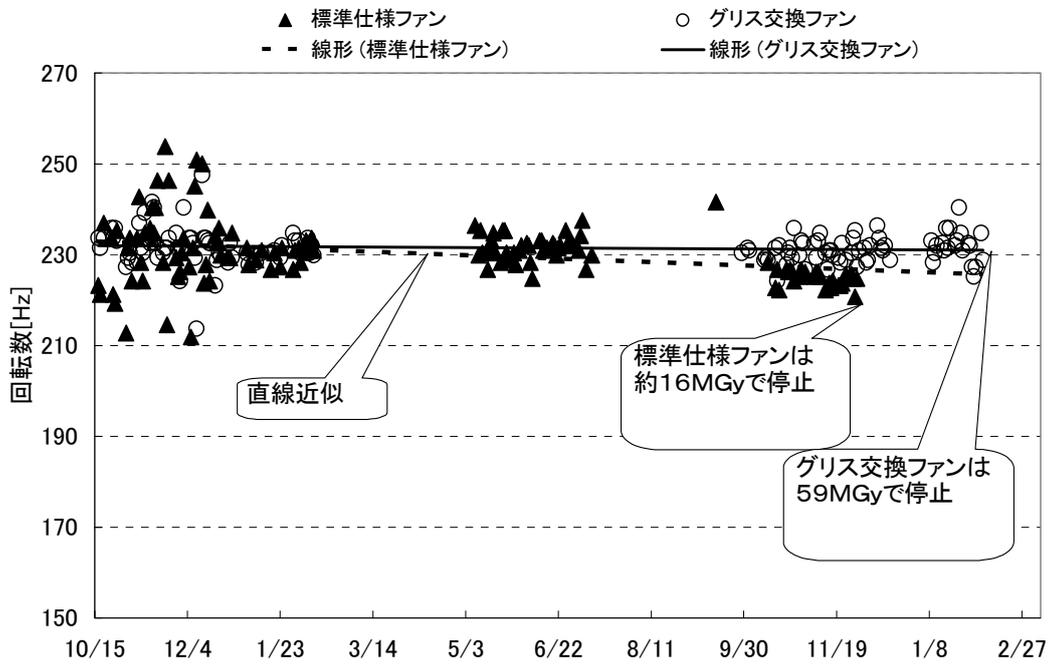
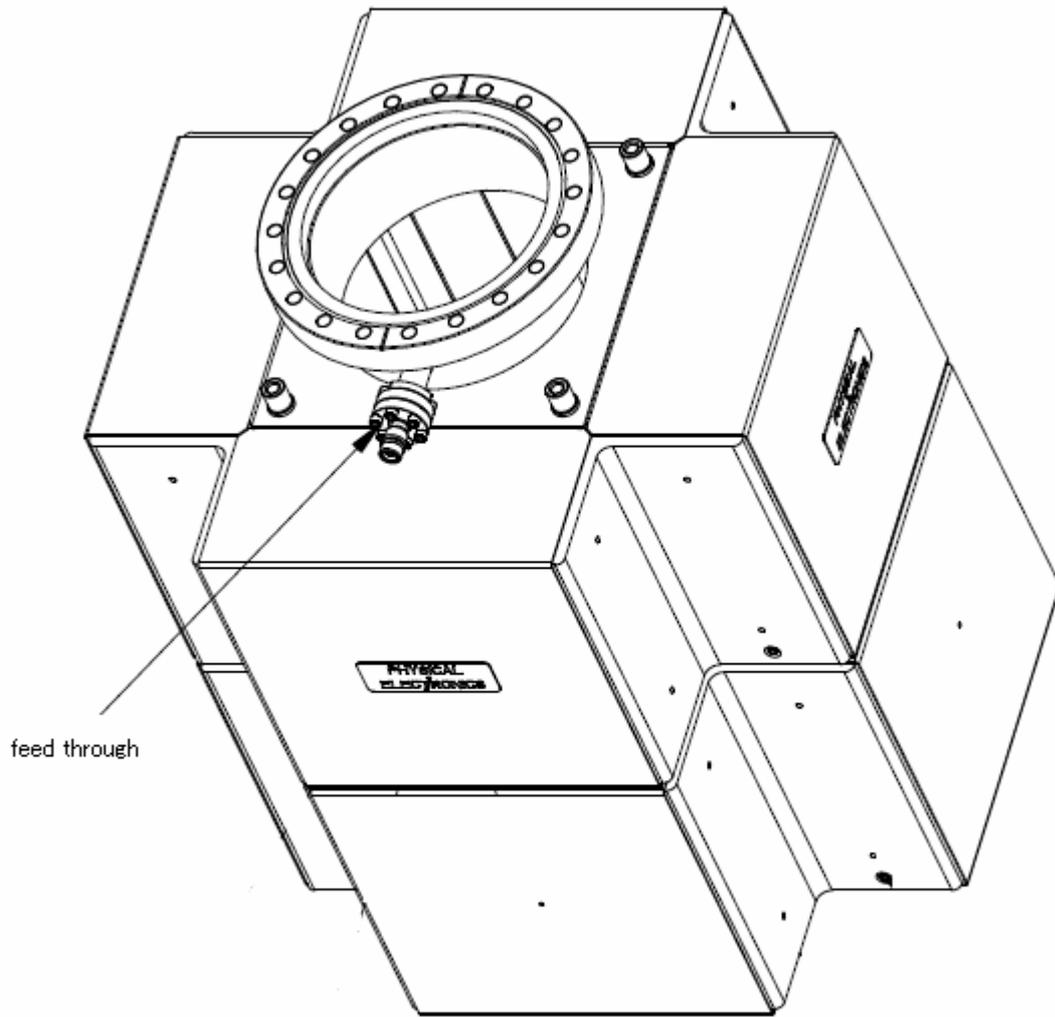
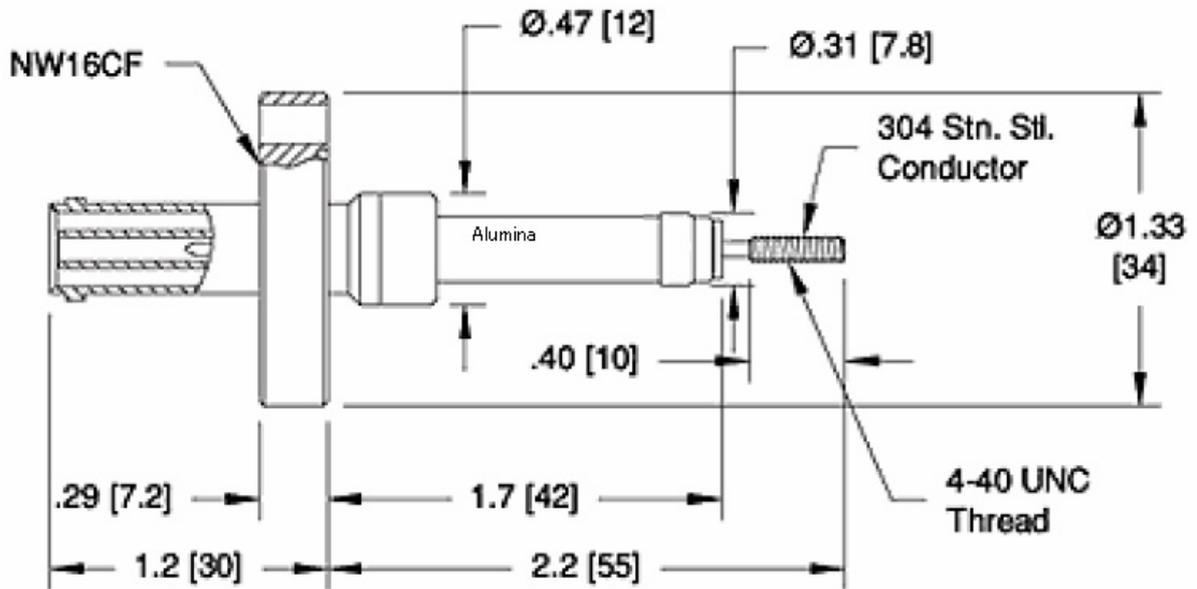


図 7. ファン回転数測定結果



feed through : 高圧導入端子

図 8. スパタリングイオンポンプ (SIP) 外観 (L X 8 0 0)

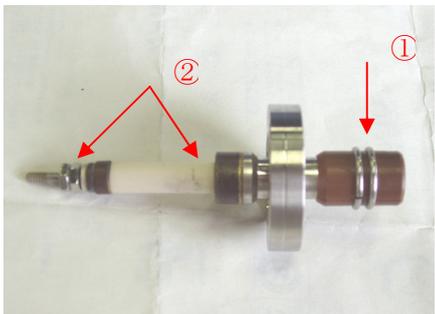


絶縁体：アルミナ
単位：インチ(mm)

図 9. 高圧導入端子(feed trough)



照射前高圧導入端子



照射後高圧導入端子

図 10. 照射前後の外観（高圧導入端子）

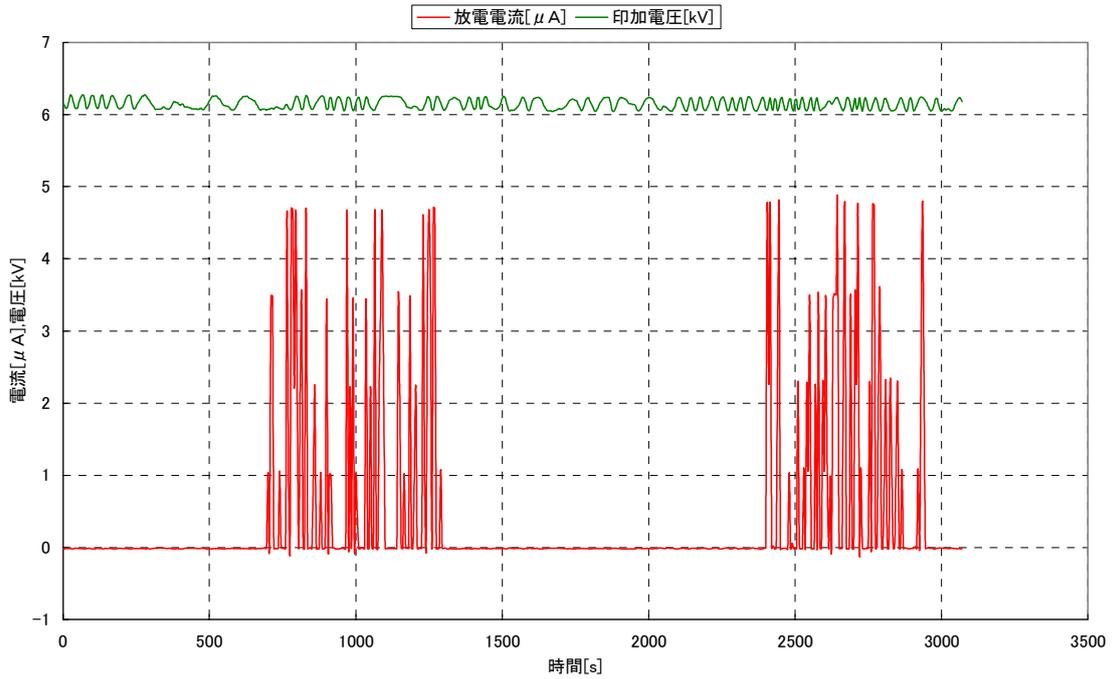


図 11 (1/3). S I P 高圧導入端子動作試験

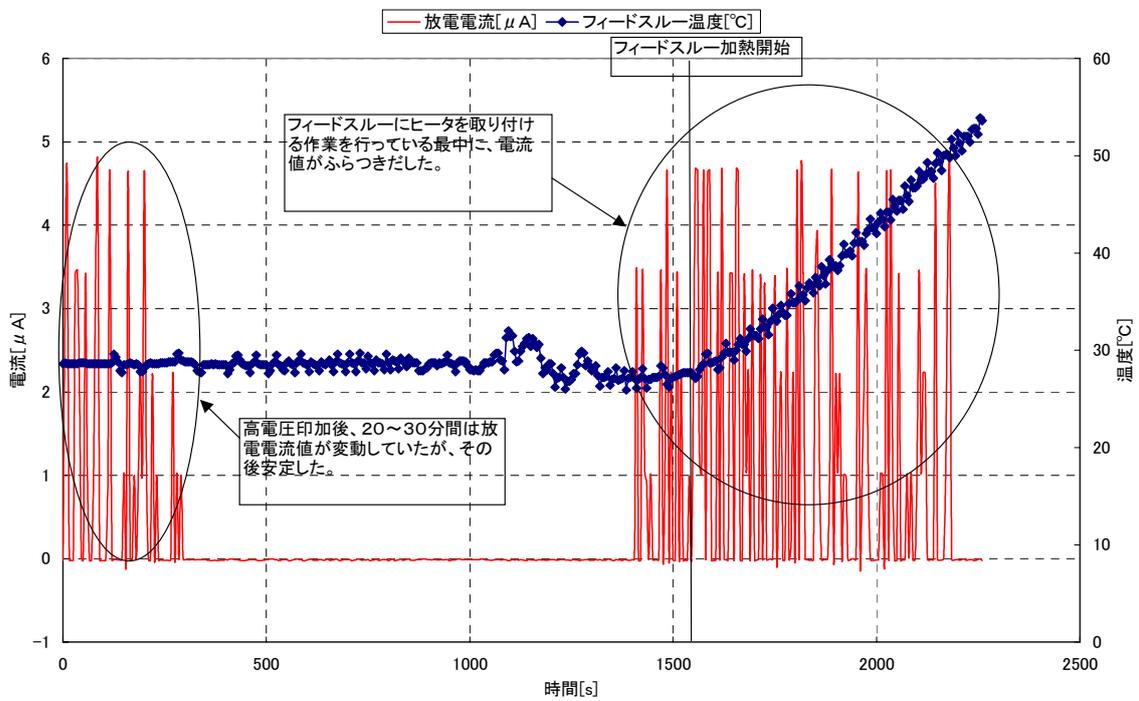


図 11 (2/3). S I P 高圧導入端子動作試験

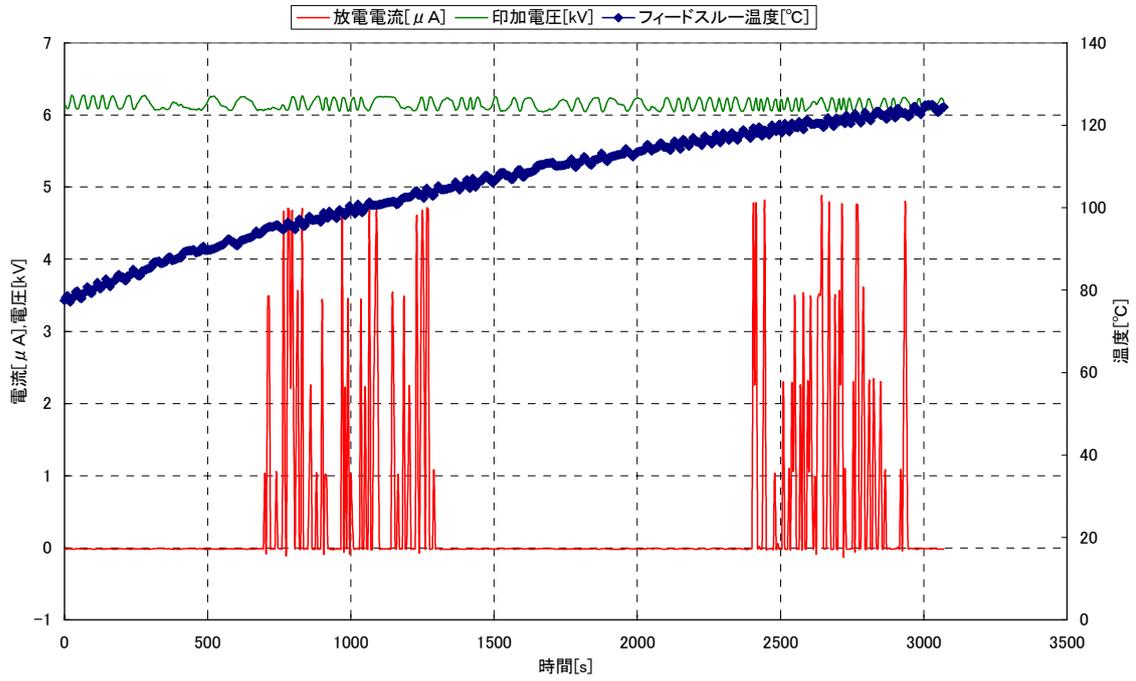


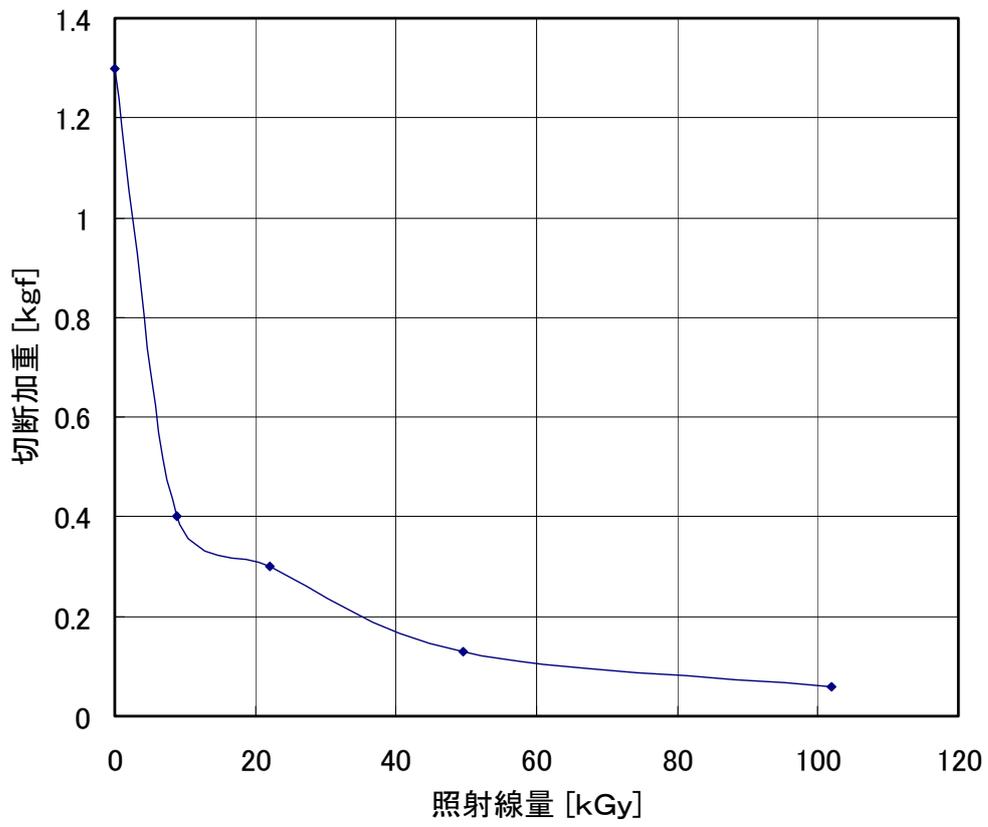
図 11 (3/3). S I P 高圧導入端子動作試験



図 12. 照射後のマントルヒーター



図 13. シール材気密漏えい試験



試験片寸法・回数：幅 15 mm 長さ 100 mm ・ N=3

図 14. テフロンシールテープ切断加重と照射線量



图 15. DSP 照射状况

表 1. 照射試験に供した冷却ファンの主要材料

項目	標準仕様ファン	耐放射線仕様ファン
製造者記号	TLS450C	
フレーム	aluminum alloy	
羽根	cold rolled carbon steel	
コイル	annealed copper wire	
シャフト	rolled steel for general structure	
コネクタ	無し *1	
絶縁チューブ	PEEK 絶縁電線	シリコンゴム電線 AWG22 *2
ベアリング	high carbon chromium bearing steel 694ZZ	
グリス	LY-17	株式会社松村石油研究所製 モレスコハイラッド RG-42-1

*1 10Mgy 以上の耐放射線性を有するコネクタ（材質を PEEK に変更）取り付ける予定であるが、今回の試験では使用しなかった。

*2 シリコンゴム電線は、今回の試験のみで使用。

表 2. 冷却FANの性能

項目	仕様	単位
定格電圧	単相 200	V
周波数	50	Hz
定格入力	18±10%	W
定格電流	0.130±10%	A
拘束電流	0.160	A (参考値)
定格回転速度	2700±10%	rpm
起動電圧	140.0	V(以下)
最大風量	2.40	m ³ /min
全開静圧	62±10%	Pa
絶縁抵抗	100	MΩ(500V メガー)
絶縁耐力	DC1500V 1 分間	

表 3. 照射試験における測定項目（冷却ファン）

測定項目	照射前	遠隔測定	照射後
外観検査	○	-	○
電流値（ファン単体）	○	-	○
ファン回転数	○	○	○
フレーム温度	-	-	-
巻線抵抗	○	-	○

表 4. 各仕様ファンの累積照射線量

試験対象 (照射期間)	線量率 (kGy/h)	平均線量 率 (kGy/h)	累積時間 (hr)	累積線量 (MGy)	累積合計 (MGy)
標準仕様ファン 2006/9/8～2006/10/13	10.53	8.19	821	6.73	15.44
	5.85				
標準仕様ファン 2006/10/16～2006/11/30	10.31	8.29	1051	8.71	
	6.26				
耐放射線仕様ファン 2005/10/14～2006/2/10	8.56	6.74	2435	16.40	
	4.91				
耐放射線仕様ファン 2006/4/28～2006/7/10	13.49	10.40	1642	17.09	59.39
	7.31				
耐放射線仕様ファン 2006/9/8～2006/10/13	10.53	8.19	821	6.73	
	5.85				
耐放射線仕様ファン 2006/10/16～2007/2/6	10.31	8.29	2313	19.17	
	6.26				

表 5. 外観検査結果

積算線量	検査結果				備考
	0 MGy	7.4MGy	約 15MGy	59.4MGy	
標準仕様ファン	異常なし	—	ベアリングが固着、絶縁材が若干変色	—	
耐放射線仕様ファン	異常なし	絶縁チューブが硬化	絶縁チューブに割れ発生	同左	割れ発生後、カプトンテープで絶縁確保

表 6. ファンの電流値

積算線量	電流値計測結果 (A)					
	0MGy	→	7.4MGy	→	約 15MGy	59.4MGy
耐放射線仕様ファン	0.26	0.25 ~0.26	0.25	0.24 ~0.25	0.24	未測定
標準仕様ファン	0.24	—	0.23	—	0.23	—

表 7. ファンフレーム温度計測結果

項目	温度計測結果 (°C) / 積算線量						
	0MGy	→	7.4MGy	→	約15MGy	→	59.4MGy
標準仕様ファン	25	照射室内温度に応じて変動	22	照射室内温度に応じて変動	18	—	—
耐放射線仕様ファン	23	照射室内温度に応じて変動	18	照射室内温度に応じて変動	16	—	14

表 8. 巻線抵抗測定結果

ファン種類	巻線抵抗 (Ω) / 積算線量			
	0 MGy	7.4 MGy	15 MGy	59.4 MGy
標準仕様ファン	110.1	109.7	110.2	
耐放射線仕様ファン	110.2	110.5	112.3	2MΩ程度

表 9. マントルヒーター電気抵抗測定値

照射線量 (MGy)	マントルヒータ抵抗値 (Ω)	測定日 (測定場所)
照射前	43.9	平成 19 年 9/8 (高崎研)
9.5	43.8~44.1	平成 19 年 10/13 (高崎研)
15.5	44.3	平成 19 年 11/7 (高崎研)
	44.5	平成 19 年 11/21 (東京技術研究所)

表 10 マントルヒーター照射後試験結果

試験項目	試験結果		
	0 MGy (照射前)	10 MGy	15 MGy
外観	—	リード線黄変 硬化等なし	同左
寸法	—	変化なし	変化なし
絶縁抵抗	100M Ω 以上	—	100M Ω 以上
抵抗値	43.9 Ω	43.8~44.1 Ω	44.3~44.5 Ω
耐電圧	1kV1分間	—	1kV1分間
空焚き	—	—	実施し異常なし

表 11. 圧空配管継ぎ手シール材と使用箇所

番号	シール材名称	用途	使用場所
1	ロックタイト567 (配管用液体シール材)	ゲートバルブ用ソレノイドバルブ	主トンネル床 近く
2	スリーボンド1194 (配管用液体シール材)	圧空タンク接続部 同フィルタ接続部 フォアライン用圧空配管 系統接続部	サブトンネル
3	テフロンシールテープ	圧空タンク点検口 圧空タンク	サブトンネル
4	エポキシ系接着剤 (水中エポキシ、セメダイン(株))	J-PARC 工事では使用しなかった。	
5	エキメタル (ベロメタルジャパン(株))		
6	LOCTITE243 (PART NO. 23962、ヘンケルジャパン(株))		
7	LOCTITE262 (PART NO. 23400、ヘンケルジャパン(株))		

表 12(1/2). 主トンネルシール材試験結果

照射線量(MGy)	シール材気密試験結果
	ロックタイト567
0.10	漏洩なし
0.22	漏洩なし
0.42	漏洩なし
1.14	漏洩なし
2.06	漏洩なし
4.37	漏洩なし
9.37	漏洩なし

n = 2 とした。

表 12(2/2). 主トンネルシール材試験結果

	シール材種類	照射線量 2007/3/14 ~ 2007/4/27	試験結果
1	エポキシ系接着剤 (水中エポキシ、セメダイン(株))	13.15MG y	漏洩なし
2	エキメタル (ベロメタルジャパン(株))		漏洩なし
3	LOCTITE2 (PART NO. 23962、ヘンケルジャパン(株))		漏洩なし
4	LOCTITE2 (PART NO. 23400、ヘンケルジャパン(株))		漏洩なし

表 13. サブトンネルシール材試験結果

照射線量 (実績) (MG y)	シール材気密試験結果	
	スリーボンド1194	テフロンシールテープ
0.0088	漏洩なし	漏洩なし
0.022	漏洩なし	漏洩なし
0.050	漏洩なし	漏洩なし
0.102	漏洩なし	漏洩なし

n = 2 とした。

表 14. DSP 仕様

型式	ISP-250B
電動機仕様	三相
設計排気速度	250 L/min (50Hz)
到達圧力	$\leq 1.6 \text{ Pa}$
電動機出力	0.4 kW
電圧	三相三線 200V
騒音量	58 dB (at 1m)
リーク量	$\leq 1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$
吸気口径	NW25
排気口径	NW16
冷却方式	空冷
外径寸法	252×370×336
周囲温度	5 ~ 40°C (平均 25°C)
質量	23 kg

表 15. DSP 動作試験要領

項目	要領
到達圧力	吸気口にピラニゲージを取り付け、1 時間後の到達圧力を測定
振動	到達圧力状態における吸気口部の振動を測定
騒音	到達圧力状態における騒音を無響音室にて測定
リーク	ヘリウムリークディテクタを吸気口に接続（排気口は閉止）し、ポンプ全体にヘリウムを吹き付け測定
絶縁耐力	モータのフレームーロータ間及び電極ーアース間に 1200 V 印加し漏れ電流を測定
電流値	運転時の平均電流値を測定
温度上昇	モータ部、ポンプ部の表面温度を熱電対にて測定し、停止時の温度からの上昇値を確認する

表 16. 照射線量 1MGy 照射前後の動作試験結果 (DSP)

項目	規格値	照射前	照射後	備考
到達圧力	≤ 1.6 [Pa]	1.3	2.4	50 [Hz]※
振動	≤ 1.5 [mm/s]	1.4	1.3	60 [Hz]※
騒音	≤ 61 [dB(A)]	60	62	60 [Hz]※
真空リーク率	$\leq 1.0 \times 10^{-2}$ [Pa·m ³ /s]	1.5×10^{-3}	1.3×10^{-1}	停止時
絶縁耐力	≤ 10 [mA]	≤ 10	≤ 10	漏れ電流
電流値	≤ 1.8 [A]	1.2	1.2	60Hz
温度上昇	モータ部 :	≤ 14 [K]	≤ 15 [K]	規格なし
	ポンプ部 :	≤ 12.5 [K]	≤ 19 [K]	

※ モータの電源として、到達圧力測定時は回転数の低い 50Hz、振動、騒音測定時は回転数の高い 60Hz を使用した。

表 17. 照射による部品の変化 (DSP)

部品	材質	照射による変化
チップシール	摺動部：テフロン+ガラス繊維 バックアップ部：テフロン	硬化しており、もろくなっていた。 バックアップ材が薄くなっていた。
吐出弁	Fe+Crメッキ	弁が固着。Crの酸化物が発生
Oリング	バイトン	硬化
グリース	フッ素系グリース	茶色に変色。
カップリングゴム	ニトリルゴム	硬化
フィルター	本体：SUS, フィルター：スチールウール	フィルターに黒色粉末が付着。
軸シール	バイトン	硬化
モータ内リード線	架橋ポリエチレン (被覆材)	異常なし

表 18. 照射前後及び部品交換後における到達圧力及びリーク量の試験結果 (DSP)

項目	規格値	照射前	照射後	部品交換後
到達圧力	≤ 1.6 [Pa]	1.3	2.4	1.1
真空リーク率	$\leq 1.0 \times 10^{-2}$ [Pa \cdot m ³ /s]	1.5×10^{-3}	1.3×10^{-1}	3.5×10^{-1}

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
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 ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		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 ^(e)	cd
放射線量	レントゲン	R	lm/m ²	m ⁻² cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
放射線量	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

(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み、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
粘り度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	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	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 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	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射線輝度	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	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨクタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	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	1h=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	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=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	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=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=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻¹² 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、 対数量の定義に依存。
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 =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe≐ (10 ³ /4π)A m ⁻¹

(c) 3元素の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=1cGy=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フェルミ=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	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ) 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

