

タンデム加速器高圧ガス製造施設の運転管理

ー点検整備と経年劣化の評価及び六フッ化硫黄排出抑制対策ー

Operation and Management of the High-pressure Gas Facility for the Tandem Accelerator -Maintenance, Evaluation of the Aging Deterioration and Action of Reducing SF₆ Gas Emission-

田山 豪一 仲野谷 孝充 乙川 義憲 月橋 芳廣 関 信夫 小野寺 輝夫 仁杉 光

Hidekazu TAYAMA, Takamitsu NAKANOYA, Yoshinori OTOKAWA, Yoshihiro TSUKIHASHI Nobuo SEKI, Teruo ONODERA and Hikaru NISUGI

東海研究開発センター 原子力科学研究所 研究炉加速器管理部

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator Nuclear Science Research Institute Tokai Research and Development Center

September 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構



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

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

 $\ \ \, \bigcirc$ Japan Atomic Energy Agency, 2010

タンデム加速器高圧ガス製造施設の運転管理 - 点検整備と経年劣化の評価及び六フッ化硫黄排出抑制対策 -

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 原子力科学研究所 研究炉加速器管理部 田山 豪一・仲野谷 孝充・乙川 義憲・月橋 芳廣 関 信夫*・小野寺 輝夫*・仁杉 光*

(2010年4月6日受理)

原子力科学研究所のタンデム加速器高圧ガス製造施設は、六フッ化硫黄(以下、「 SF_6 」という)ガスを回収、充填するための施設である。 SF_6 ガスは、加速器タンク内に設置される加速器の高い電気絶縁の確保のために使用される。 SF_6 を取り扱う研究機関では、国内最大級の高圧ガス製造施設である。当施設は現在まで 31 年間運転してきており、施設の点検整備を実施するとともに経年劣化への対策も進めてきている。 SF_6 ガスは、地球温暖化対策の推進に関する法律で温室効果ガスとして指定され、排出量の削減を厳しく求められている。原子力科学研究所では環境配慮促進の一環として SF_6 排出抑制対策を重要な課題としている。我々においては、当施設の SF_6 ガス排出抑制対策を継続して実施してきた。

本報告書は、長年にわたる運転管理における点検整備の経緯、経年劣化の評価、SF6 排出抑制 対策について取りまとめたものである。 Operation and Management of the High-pressure Gas Facility

for the Tandem Accelerator

-Maintenance, Evaluation of the Aging Deterioration and Action of Reducing $SF_6\,Gas$

Emission-

Hidekazu TAYAMA, Takamitsu NAKANOYA, Yoshinori OTOKAWA, Yoshihiro TSUKIHASHI

Nobuo SEKI*, Teruo ONODERA* and Hikaru NISUGI*

Department of Research Reactor and Tandem Accelerator

Nuclear Science Research Institute

Tokai Research and Development Center

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 6,2010)

The high-pressure gas facility for the tandem accelerator at Nuclear Science Research

Institute is the facility to transfer SF₆ gas between the accelerator and gas storage tanks. The

SF₆ gas is used to keep high voltage insulation of the tandem accelerator. This facility is one

of the largest SF₆ gas handling facilities in research laboratories. This facility has been

operated for 31 years. In addition to regular maintenance, we have evaluated the

deterioration due to aging. SF6 gas is regarded as a kind of green house gases that causes

global warming and it is strongly required to reduce such gas emission into the atmosphere in

recent years. In JAEA, the reduction of gas emission is also an important problem. We have

been continuously taking action for reducing the emission of SF₆ gas.

In this article, we report the records of maintenance, evaluation of aging, and activity of

reducing SF₆ gas emission.

.

Keywords: Tandem Accelerator, SF₆ Gas Facility, High-pressure Gas, Greenhouse Gas

JAEA-Technology 2010-023

目 次

1. はじめに	1
2. SF ₆ の特性	1
2.1 特長	1
2.2 物理的性質	2
2.3 電気的性質	2
2.4 化学的性質	2
3. 施設の運転形態	3
3.1 ガス循環工程	4
3.2 ガス回収工程	4
3.3 ガス充填工程	4
4. 設備の性能	6
4.1 コンプレッサー	6
4.2 アフタークーラー	6
4.3 貯槽	6
4.4 ベーパライザー	7
4.5 キニーポンプ	7
4.6 ガスドライヤー	7
4.7 ターボコンプレッサー	7
4.8 ガスクーラー	8
4.9 冷却水設備	8
5. 経年劣化の評価	13
5.1 施設の使用状況	13
5.2 経年劣化の評価方法	13
5.3 経年劣化の評価結果	14
6. 点検整備	24
6.1 機器	24
6.2 計器	24
6.3 安全装置	25
6.4 操作弁	25
6.5 配管	25
6.6 附帯設備	26

JAEA-Technology 2010-023

7. SF ₆ ガスの管理	35
7.1 SF ₆ ガスの補充	33
7.2 取扱上の注意	33
8. SF ₆ ガス排出管理	34
8.1 温室効果ガス	34
8.2 SF ₆ 排出状況	34
8.3 SF ₆ 損失原因の推定	35
8.4 リーク検査の結果と SF ₆ ガス排出抑制対策	35
9. おわりに	39
謝辞	39
参考文献	39
付録 1: 地球温暖化係数	40
付録 2:機器の写真	41

Contents

1.	Introduction	- 1
2.	Characteristics of SF_6	- 1
	2.1 Features	- 1
	2.2 Physical properties	- 2
	2.3 Electric properties	- 2
	2.4 Chemical properties	- 2
3.	Operating condition of the facility	- 3
	3.1 Circulation process of SF ₆ gas	- 4
	3.2 Collecting process of SF ₆ gas ······	- 4
	$3.3~{ m Refilling~process~of~SF_6~gas}$	- 4
4.	Performance of the equipment	- 6
	4.1 Compressors	- 6
	4.2 After cooler	- 6
	4.3 Storage tank	- 6
	4.4 Vaporizer	- 7
	4.5 Kenny pomp	- 7
	4.6 Gas dryer	- 7
	4.7 Turbo compressor	- 7
	4.8 Gas cooler	- 8
	4.9 Cooling facility	- 8
5.	Evaluation of the deterioration with aging	13
	5.1 Use situation of the facility	13
	5.2 Evaluation of the aging	13
	5.3 About evaluation result of the aging	14
6.	Maintenance	24
	6.1 High-pressure gas facilities	24
	6.2 Instrument device	24
	6.3 Safety device	25
	6.4 Valves	25
	6.5 Pipes	25
	6.6 Equipment	26

JAEA-Technology 2010-023

7. Management of SF ₆ gas	33
7.1 Supplementary SF ₆ gas supply	33
7.2 Caution for handling	33
8. Emission management of SF_6 gas	34
8.1 About greenhouse gas ·····	34
8.2 History of SF ₆ gas emission	34
8.3 Estimation of the causes of losing SF ₆ gas	35
8.4 Result of leak inspection and action for reducing the emission of SF_6 gas	35
9. Conclusion	39
Acknowledgements	39
References ·····	39
Appendix 1 Global warming coefficient of greenhouse gas	40
Appendix 2 Photos	41

1. はじめに

タンデム加速器高圧ガス製造施設(以下「施設」という。)は、1978 年にタンデム加速器建家に設置され、現在まで31年間、約1,700時間を安定に運転してきた。使用するガスの種類はSF₆ガスであり、常時約45t保有している。高圧ガス設備の一日の処理能力は229,794m³で貯蔵能力は100,550kgであり、SF₆を取り扱う研究機関では国内最大級の高圧ガス製造施設である。

タンデム加速器(以下「加速器」という。)は、加速器タンク内に設置され、最大で20MVの高電圧が印加される。このため、高い電気絶縁性能を有するSF₆ガスを絶縁ガスとして使用している。当施設は、加速器タンクのSF₆ガスを循環、回収、充填するために使用される。

このように SF_6 ガスは、高電圧を絶縁する装置では不可欠なものとして使用される。一方で、大気寿命が 3200 年と長いために二酸化炭素に対する地球温暖化係数(GWP_{100})が 23,900 と設定され、地球温暖化対 策の推進に関する法律により温室効果ガスに指定され、排出量の削減対策を厳しく求められている。当 施設では、設置当初より SF_6 ガスを高い収率 (1 回あたり約 99.5%)で回収してきたが、排出量のさらなる削減のために対策を講じている。

本報告書は、当施設の運転管理おいて実施してきた点検整備の経緯、経年劣化の評価、SF₆ ガスの管理と排出抑制対策についてまとめたものである。

2. SF₆の特性

2.1 特長

SF₆ は、無色、無臭、無毒、不燃性の重い物質で、化学的に極めて安定な化合物である。特に高電圧下における電気絶縁性に優れている。以下に主な特長を示す。

- (1) 絶縁耐力が大きい。
- (2) 広い温度領域で実用性がある。
- (3) 総括熱伝達が大きく、冷却効果が大きい。
- (4) 化学的安定性が高く、無色、無臭、無毒、不燃性である。
- (5) 絶縁破壊の強さは大気圧で空気の2倍以上である。
- (6) 常温、約 2MPa 以上で液化する。液化させることで大容量の SF。を管理できる。
- (7) 大気寿命が長い。

2.2 物理的性質

 SF_6 の基礎特性を表 2.1 に示す。 SF_6 は、分子量 146.06、化学式は SF_6 で 21.95%の硫黄(S)と 78.05%のフッ素(F)からなっている。その分子構造は、6 個の F 原子のすべてが S 原子を中心とする正八面体の頂点に配置されるようになっている。 SF_6 の密度は気体で 6.139 g/l (20°C、1atm)、比重は空気の約 5 倍である。 SF_6 は、約 2MPa 以上の常温において、容易に液化することができる性質をもっている。臨界点(臨界温度:45.5°C、臨界圧力:3.78MPa)以上の領域では、液相状態を保つことはできない。

表 2.1 SF₆の基礎特性 ¹⁾

化学式	SF ₆
分子量	146.06
外観	無色、無臭
ガス比重	5.107(空気=1)
液体密度	1.88 g/cm³ (20°C)
融点	−50.8 °C
昇華点	-63.8 ℃
蒸気圧	2.14 MPa (20°C)
臨界温度	4.55 °C
臨界圧力	3.78 MPa
燃焼範囲	不燃性

2.3 電気的性質

SF₆の絶縁耐力は、1 気圧において空気、二酸化炭素あるいは窒素の2~3 倍の値を示し、2~3 気圧では絶縁油と同程度の能力がある。また、アークなどにより一時的に破壊が起こった場合でも、その原因が取り除かれると、自然に絶縁性が回復し、絶縁油のように電気性の炭素沈着物を生じることがない。また、絶縁油と比較すると、不燃性、機器の軽量化、保守および補修の容易さの点で極めて有利である。

2.4 化学的性質

 SF_6 は、連続した電気アークの存在下では徐々に分解する。絶縁破壊により生じた物質の内容の大部分は硫黄の低級弗化物である。したがって、少量の酸素、水分が存在する場合は、 SF_4 、 SOF_2 、 SO_2F_2 、 OF_2 及び HF のような生成物が生成されることが予想される $^{2)}$ 。 SF_6 は、最も不活性な物質の一つであり、500 の高温度の下でも熱分解を受けないが、銅、ステンレス、アルミニウム、真ちゅう等の金属と水分が存在する条件では、200 C以上の温度で徐々に分解しはじめる。

当施設では、発生した分解生成物の除去は、ソーダライムとアルミナを 50 対 50 の混合物に吸収させる ことによって除去している。

3. 施設の運転形態

当施設は、加速器タンク(容積 1213.9 m³)の SF₆ガスを循環、回収、充填する運転を行う。施設の運転工程には、ガス循環工程、ガス回収工程、ガス充填工程がある。図 3.1 に施設の運転工程を示す。

ガス循環工程は、加速器の運転期間中、加速器タンクの SF₆ ガスを循環するために運転する。ガス回収工程及びガス充填工程は、加速器の整備等を行う場合、加速器タンクの SF₆ ガスを回収、充填するために運転する。加速器の定期整備は1年に2回行い、この他に、突発的な加速器の故障が発生した際は、随時、加速器タンクを開放して整備等を行っている。

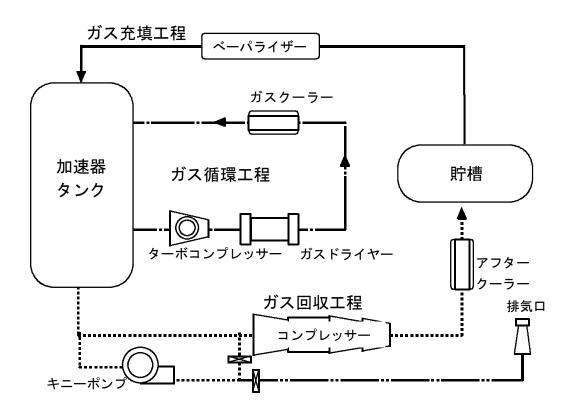


図 3.1 施設の運転工程

3.1 ガス循環工程

ガス循環工程とは、加速器タンクに充填された SF₆ガスを、加速器の運転中に循環するための工程である。加速器タンクに充填された SF₆ガスは、加速器の運転によって温度上昇するためガスクーラーでガス 温度を下げるとともに、ガスドライヤーで水分を除去し、加速器タンクへ戻すように循環系を形成している。

3.2 ガス回収工程

ガス回収工程とは、加速器の整備等のために加速器タンクを開放する場合行う工程である。加速器タンクを開放する場合、加速器タンクに充填されている SF_6 ガスを貯槽へ移送する。ガス回収時間と加速器タンク圧力の関係を図 3.2 に示す。ガス回収工程を行う場合は、通常 2 日間(約 11 時間)かけて 0.93kPa まで SF_6 ガスを回収する。

1 日目は、加速器タンク→コンプレッサー→アフタークーラー(凝縮器)→貯槽 の移送ラインを使用し、加速器タンクを大気圧まで約6時間かけてSF6ガスを回収する。

2日目は、加速器タンク→キニーポンプ(真空ポンプ)→コンプレッサー→アフタークーラー→貯槽 の移送ラインを使用し、加速器タンクを0.93kPaまで SF_6 ガスを回収する。ガス回収終了後、すべての設備を停止し、加速器タンクへ約2時間かけて大気圧まで空気を導入する。

3.3 ガス充填工程

ガス充填工程とは、加速器タンクに SF_6 ガスを充填する工程である。加速器整備終了後、ガス充填を開始する前に、加速器タンクをキニーポンプにより約 17 時間かけて 0.33kPa まで真空引きする。ガス充填工程は、貯槽の液化 SF_6 を膨張弁(V-35)のノズルを通して気化させ、低温となった SF_6 ガスをベーパライザーにより 20 Cにして、約 6 時間かけて加速器タンクへ 0.44MPa まで充填する。ガス充填時間と加速器タンク圧力の関係を図 3.3 に示す。充填中は、 SF_6 ガス検知機(Automatic Halogen Leak Detector TIF5050/TIF Instruments 製を使用)により、加速器タンク周辺のリーク検査を行う。

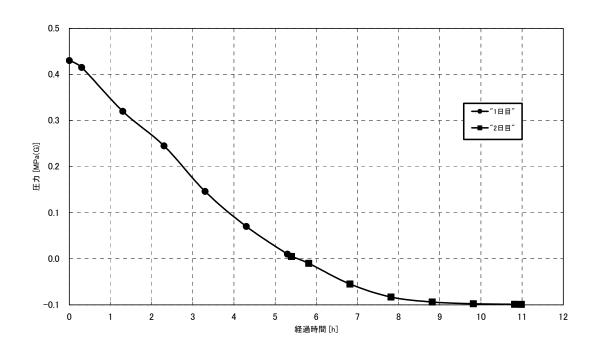


図 3.2 ガス回収時間と加速器タンク圧力

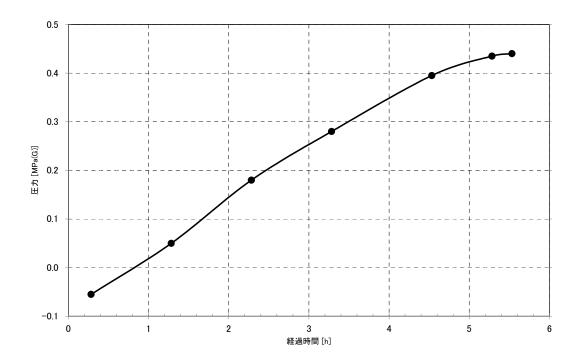


図 3.3 ガス充填時間と加速器タンク圧力

4. 設備の性能

当施設は、使用する SF₆ の圧力により、高圧ガス設備の高圧部と、その附帯設備である低圧部に区分され、各機器が設置されている。図 4.1 に高圧ガス製造施設系統図を示す。

4.1 コンプレッサー

コンプレッサーは、 SF_6 ガスを大気圧の約 30 倍までまで圧縮する大型の圧縮機である。米国 COOPER INDUSTRIES,INC.製で、全長約 5.5m、圧縮段数が 3 段のものが 2 基設置されている。 SF_6 ガスの圧縮によって発生した熱を除去するため、各段の間にはインタークーラー(冷却式熱交換器)が設置されている。コンプレッサーは 2 基同時運転を行い、171,700 $m^3/日の処理能力を有する。図 <math>4.2$ にコンプレッサー運転時の表面温度の測定点を、表 4.1 にその測定結果を示す。吸入弁(測定点 a,b)の表面温度は 30 $^{\circ}$ 、吐出弁(測定店 c,d)の 1 段の表面目は 50 $^{\circ}$ 、2 段は 55 $^{\circ}$ 、3 段は 70 $^{\circ}$ が目安になり、それ以上に温度が上昇する場合は、弁に異常があると判断する。なお、現在この規模の処理能力を有する大型のコンプレッサーは、日本のメーカーでは製品化されていない。

4.2 アフタークーラー

アフタークーラーは、コンプレッサーからの圧縮、発熱した SF_6 ガスを冷却水により常温に冷却し液化させる機器である。全長 2.55m の水冷式熱交換器である。各コンプレッサー下流に1 基ずつ設置され、2 基合計で 29,544 m³/日の処理能力を有する。アフタークーラーの運転時の冷却水の温度は、入口は10 $^{\circ}$ 、出口で 25 $^{\circ}$ である。 SF_6 は常温において圧力が約 2.0 MPa 以上で気相から液相状態となる。使用している SF_6 ガス中には、この領域で液相状態となる物質が他に無いため、液化 SF_6 は純度が保たれる。ただし、アフタークーラーの冷却水の温度が常温以上に上昇し、 SF_6 ガスが冷却されないと、圧力が約 2.0 MPa 以上でも液化されない場合がある。液化されずに気体のまま貯槽に移送されると、貯槽内の圧力が上昇して安全弁が作動することになる。このため、アフタークーラーの冷却水の温度の管理は重要である。

4.3 貯槽

貯槽は、 SF_6 ガスを貯蔵するための機器である。全長 7.155m、外径 2.518m、容積 30.5 m^3 の貯槽が 3 基設置され 100,550kg の貯蔵能力を有する。 貯槽では常時約 45tの SF_6 を液相状態で管理している。 SF_6 は液化することが容易であり、容積を気相の約 1/288 にすることができるため、大量のガスを保有できる特長をもっている。 貯槽の SF_6 ガスの充填量は、液面計により確認する。 図 4.3 に貯槽 (1 基当たり)の SF_6 ガス充填量を示す。 貯蔵能力は 1 基で 33.5t であるが、通常は貯蔵能力の 90%以下で管理している。

4.4 ベーパライザー

ベーパライザーは、低温のガスを常温に加熱する蒸発器である。全長 1.27m のジャケット、 $11.5mm \phi$ の チューブからなり、 $16,912 m^3/h$ の能力を有する。ジャケット側には 150 の水蒸気、チューブ側には膨張 弁 (V-35) を通して気化することで低温となった SF_6 ガスを、ベーパライザーで加熱し出口で 20 にして加速器タンクへ移送する。

4.5 キニーポンプ

キニーポンプは、加速器タンクのSF₆ガスを真空領域まで回収する操作と、SF₆ガス充填前に加速器タンクを真空状態にすることで、純度の高い SF₆ガス雰囲気を作るために使用される真空ポンプである。米国 KINNEY VACUUM Comp.製で、排気量 836 m³/h のポンプが2基並列に設置されている。真空ポンプ油は1基当たり45 リットル使用する。キニーポンプを使用したSF₆ガス回収時は、SF₆ガスと一緒に霧状になった真空ポンプ油がキニーポンプ排気側に排出される。この真空ポンプ油は、排気側の直後に設置されたオイルエリミネータ、さらに配管のドレイン口からポンプ本体へリターンされる。キニーポンプを使用して加速器タンクを真空引きする時は、排気は排気口へ送られ大気へ放出される。この時も排気と一緒に真空ポンプ油がキニーポンプの排気側に排出されるため、排気口にはオイルフィルターを設置し、大気への油放出を抑えている。排気口のオイルフィルターは、1年に1回交換している。

4.6 ガスドライヤー

ガスドライヤーは、加速器タンクの SF_6 ガス中に含まれる水分を除去する機器である。加速器タンクのガス循環系に 2 基並列に設置されている。活性アルミナ(住友 NKHD-46)を 1 基当たり 195kg 充填している。加速器の整備に合わせて年間約 2 回、ガスドライヤー内部をヒーターで 200 でまで昇温させ、約 10 時間かけてアルミナの活性化を実施する。活性化が終了したドライヤーからは、1 基当たり約 2 リットル、pH が 2 一3 の酸性の水が回収される。この活性化作業により、 SF_6 ガスの露点は、ガスドライヤー入口で約-50 で、出口で約-70 でに保たれている。

4.7 ターボコンプレッサー

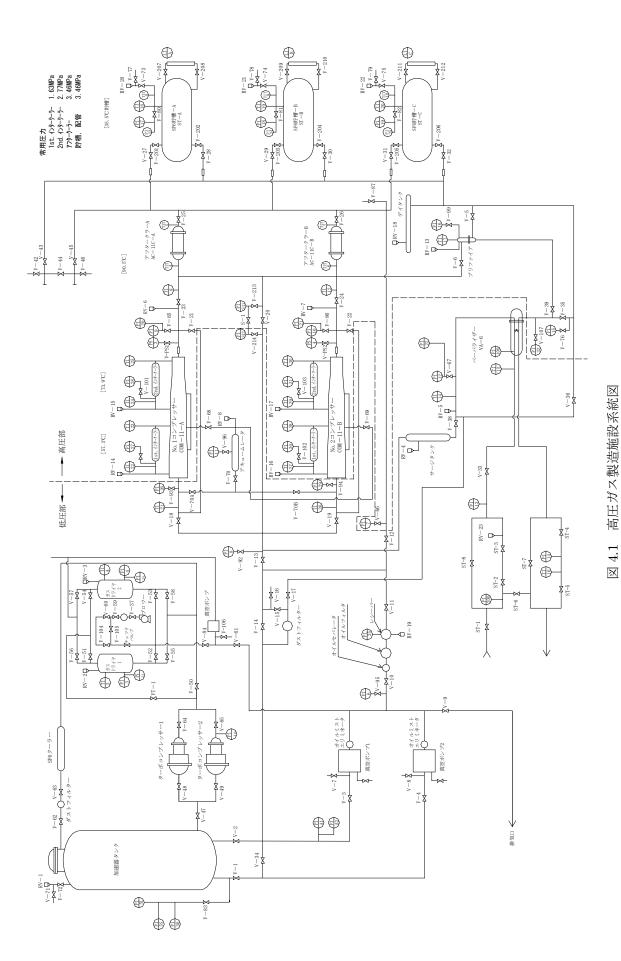
ターボコンプレッサーは、加速器の運転中に加速器タンク内の SF_6 ガスを循環するためのポンプである。 Spencer Turbine Comp.製でガス循環系に 2 基設置され、1 基当たり風量 $595 \text{m}^3/\text{h}$ の能力を有する。加速器の運転中は 2 基同時運転を行っている。

4.8 ガスクーラー

ガスクーラーは、加速器タンク内の SF_6 ガスを冷却する設備である。全長 3m のジャケット、 $10mm \phi$ のチューブからなる水冷式熱交換器である。ジャケット側には 10° Cの冷却水を流し、チューブ側には加速器の運転により発熱した約 20° Cの SF_6 ガスが送り込まれ、約 12° Cまで冷却され加速器タンクへ戻される。

4.9 冷却水設備

図 4.4 に冷却水系統図を示す。当施設には、 10° (冷水)と 25° (冷却水)に温度と水質が管理された 冷却水系がある。 25° Cの冷却水は、加速器タンクのガス循環系であるガスクーラーに供給される。 10° Cの 冷水は、コンプレッサー、アフタークーラー、キニーポンプの運転時に供給される。 10° Cの冷水は、これら の機器の運転時のみ供給し、停止時には 25° Cの冷却水に切り替えて、配管等の結露防止を図っている。



-9-

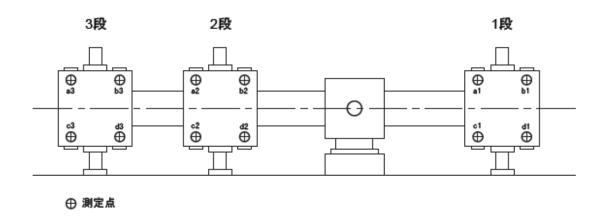


図 4.2 コンプレッサー運転時の表面温度の測定点

表 4.1 コンプレッサー運転時の表面温度の測定結果

		3段目	3 段	·[°C]	2 段	·[°C]	1段	:[°C]
設備名	冷却水温	吐出ガス	a3	b3	a2	b2	a1	b1
以加力	[°C]	温度 [℃]	с3	d3	c2	d2	c1	d1
コンプレッサー	12.5	76	28	29	28	28	28	28
No.1	12.0	70	68	69	54	53	49	50
コンプレッサー	12.5	72	29	29	28	28	28	28
No.2	12.5	12	66	66	53	53	51	51

吸入弁:a,b 吐出弁:c,d

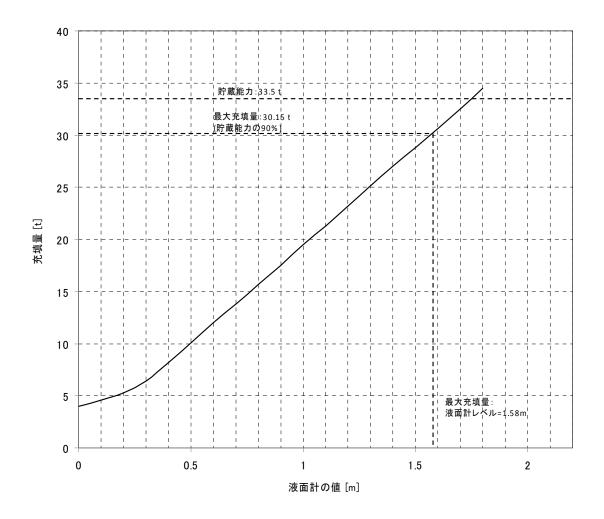
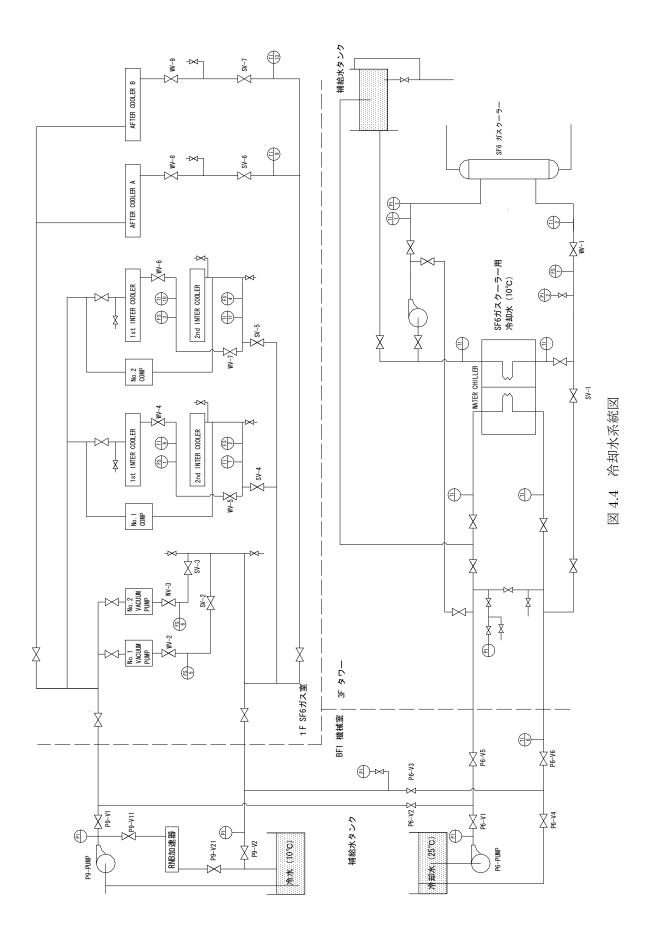


図 4.3 貯槽の SF₆ガス充填量



5. 経年劣化の評価

5.1 施設の使用状況

当施設は、1978年に設置してから31年が経過している。ただし、ガス回収工程(圧縮、液化)は、加速器の整備1回あたり約11時間と限られる。このため、施設の運転時間は加速器の整備回数によるが、年間約50時間と少ない。使用しているSF6ガスは、化学的に安定であり、ガスドライヤーにより水分を十分に除去している。また、各機器は屋内に設置された比較的よい環境下にある。これらの使用状況から、機器等の劣化は比較的少ないと推定されるが、安全を確認するために経年劣化の評価を行った。

5.2 経年劣化の評価方法

評価の方法は、1998年に茨城県から発行されている高圧ガス設備経年化対策マニュアル³⁾に基づいて行った。評価の対象機器は、常に SF₆の高い圧力(0.2MPa \sim 3MPa)が加わり、使用環境において最も経年劣化が大きいと推定できる貯槽(材質:ASTM-A-516-70(JIS G3118 SVG49)、内部流体:SF₆ガス、流体温度 20°C)の鏡面(貯槽の両端の壁)に対して行った。

腐食が全面腐食で進行する場合には、定点測定による経年的な減肉傾向により寿命評価がなされる。 表 5.1 は、現在まで過去 20 年間の定期自主検査で行ってきた超音波肉厚測定器による測定データである。 貯槽の鏡面の測定データの肉厚の時間変化をプロットしたものが図 5.1~5.3 である。 図から経年的な減肉傾向が小さいと分かる。

経年劣化の評価の一つの方法として、貯槽の肉厚の測定データに対して最小二乗法により直線近似値を算出する。算出した直線近似値を表 $5.2\sim5.4$ に示す。まず、貯槽 C(表 5.2)について算出する。一次方程式の近似を式(5.1)から導き y=50.09-0.0145x となる。よって、直線近似された直線の傾きである減肉速度 V_{cr} は 0.0145[mm/y]となる。また、式(5.2)より誤差の分布の推定値 S_{yx} は 0.0975mm となる。さらに、データのばらつきを考慮して、式(5.3)、(5.4)より標準偏差: $\sigma=0.074$ を求める。 $\pm3\,\sigma$ のバンドで表すと図 5.3 の点線ようになり、肉厚の測定データはすべて点線の範囲に含まれる。このことから、 $3\,\sigma$ 下限界での評価を用いて式(5.5)により使用年数 31 年間での肉厚 B_{31y} は 50.32mm となる。一方、設計肉厚 B_{req} : 41.9mm を適用すれば式(5.6)により、貯槽 C の現在を起点とする寿命 C_{rem} は C_{rem} を適用すれば式 C_{rem} は C_{rem} と C_{rem} は C_{rem} は C_{rem} は C_{rem} は C_{rem} は C_{rem} は C_{rem} と C_{rem} は C_{rem} と C_{rem} は C_{rem} は C_{rem} は C_{rem} を C_{rem} と C_{rem} は C_{rem} と C_{rem} は C_{rem} を C_{rem} は C_{rem} を C_{rem} と C_{rem} を C_{rem} に C_{rem} に C_{rem} を C_{rem} を C_{rem} に C_{rem} を C_{rem} を C_{rem} に C_{rem} を C_{rem} に C_{rem} を C_{rem} を C_{rem} を C_{rem} に C_{rem} に C_{rem} を C_{rem} を C_{rem} に C_{rem} を C_{rem} を C_{rem} を C_{rem} に C_{rem} を C_{rem} を C

5.3 経年劣化の評価結果

前述(5.2)の計算の結果、貯槽の今後の寿命は非常に長い値が得られた。これは、肉厚の経年的減少が少なく腐食速度が小さいためである。このことから、貯槽の鏡面において経年劣化は小さいと評価した。使用環境において、最も経年劣化が大きいと推定する貯槽の評価結果から、他の機器においても表 5.1 の肉厚測定経年表に大きな減肉がみられないことから、ほぼ同様の評価が得られると考える。なお、今回の評価は、表 5.1 にある当施設の主要機器の経年劣化に限定しており、整備、交換のできる機器は対象から除外している。

以上の結果から、当施設は設置してから 31 年が経過しているが、運転時間が少ないこと、使用する SF₆ガスが化学的に安定で水分を十分に除去していることが経年劣化を小さくしている要因と考える。よって、当施設の主要機器においては、経年劣化対策は特に必要はないもとと考える。

(単位:mm)	1999	49.3	44.8	50.0	45.0	49.7	44.7	8. 4	8. 1	8. 4	8. 1	6.0	6.5	6.0	9.9	5.9	6.4	2.8	6.3	6.2	6.6	8. 4	10.4	4.0	4.3	4.9	5.3	7.1
(単位	1998	49.3	44.9	50.0	45.1	49.8	45.0	8.5	8. 2	8. 2	8. 2	5.9	6.4	5.9	9.9	2. 2	6. 2	2. 2	6.2	6.2	6.6	8.5	10.5	4.2	4.4	5.0	5.3	7.3
	1997	49. 1	44.8	50.0	45.1	49.8	44.8	8. 4	8. 1	8.3	8. 1	6.0	6.5	6.0	6.5	5.7	6. 2	5.7	6. 2	6. 1	6.6	8. 4	10.4	4.1	4.2	5.0	5.3	7.2
	1996	49.2	44.8	49.9	45.0	49.7	44.9	8. 4	8. 2	8. 4	8. 1	6.0	6.6	6.0	6.6	5.7	6.2	5.7	6.2	6.2	6.8	8. 4	10.4	4.1	4.2	4.9	5.3	7.4
1/2)	1995	49.3	44.9	50.0	45.0	49.8	45.0	8. 1	8.0	8. 4	8.0	6.0	6.7	6.0	6. 7	5.8	6.3	5.7	6. 1	6.2	6.8	8. 7	10.4	4. 2	4.3	4.9	5.4	7.3
5.1 肉厚測定経年表(1/2)	1994	49.2	44.9	49.9	44.9	49.9	45.3	8.3	8. 1	8.5	8.3	6. 1	6.6	6.0	6.6	5.8	6. 2	5.7	6.2	6.0	6. 7	8.5	10.6	4.1	4.2	4.9	5.2	7.3
表 5.1 肉厚	1993	49.3	45.3	50.1	45.4	50.0	45.5	8.3	8. 1	8. 2	8.3	5.9	6.5	6.0	6. 7	5.7	6.3	5.7	6.3	6. 1	6. 7	8.5	10.9	4.1	4. 1	4.9	5. 2	7.2
	1992	49.3	45.0	50.3	45.3	50.0	45.0	8.5	8. 1	8.6	8.3	6.0	6.6	6.0	6.8	0.0	5.9	5.7	6.2	6.0	6.7	8.5	10.8	4. 2	4. 2	4.9	5.3	7.3
	1991	49.3	44.9	50.1	45. 1	50.0	45.0	8. 4	8. 1	8.3	8. 2	5.9	6.5	6.0	6.8	5.7	6.0	5.7	6.2	6.0	6.8	8.3	10.6	4.1	4.5	5.1	5.4	7.2
	1990	49.4	44.7	50.1	45. 1	49.8	45.0	8.5	8.0	8. 4	8. 1	6.0	6.3	6.0	6.6	6. 1	6.8	5.8	6.8	6. 2	6.6	9. 2	10.7	4.3	4. 2	5.0	5.3	7.3
		鏡	順	鏡	順	鏡	順	鏡	順	鏡	順	鏡	· 胴	鏡	- 胴	鏡	- 順	鏡	- 順	鏡	厠	鏡	胴	tB	3	/2B	3	~
	機器名	· 相	A11百八	時標 日	ΩЩ	つ罪品) III	1	Y . /	ロードールーカトケ	7 D	No.1 圧縮機	1stインタークーラー	No.2 圧縮機	ーケーデー	No.1 圧縮機	ーケーデー	No.2 圧縮機	1-7-7-	-41-611°F	1	T, 1-11.11		3/4B	1B	$1 \cdot 1/2B$	2B	3B
	*		, LH	松	, LH	計	A11	1-41-5		7-4-5		No.1	1st1>1	No.2	1stインタークーラー	No.1	2ndインターケーラー	No.2	2ndインターケーラー	7°117.	. / (, /	ارً	\		屋		徊	

	ŀ				表 5.1 肉厚測	肉厚測定経年表(2/2)	/2)			(単位:mm)	:mm)
機器名		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
	鏡	49.3	49.3	49.2	49.2	49. 1	49.1	49. 1	49.1	49. 1	49.1
凡可合	順	44.7	44.8	44.7	44.7	44.7	44.7	44.7	44.7	44. 7	44.7
日押日	鏡	50.0	20.0	50.0	90.09	49.9	49.9	50.0	90.09	50.0	50.0
	順	45.0	45.0	45.1	45. 1	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0	45.0
	鏡	49.7	49.7	49.7	49.7	49.7	49.7	49.7	49.7	49.7	49.7
AJ/首し	順	44.8	44.7	44.7	44.7	44. 7	44. 7	44. 7	44.7	44. 7	44.7
A	鏡	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8.5
	順	8.0	7.9	7.8	8 '2	7.8	7.9	7.9	6 '2	7.9	7.8
7. H. H. T.	鏡	8.5	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8.5
	順	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8. 1	8. 1	8. 1	8. 1	8. 1
圧縮機	鏡	6.0	0.9	6.0	0.9	0.9	6.0	6.0	0.9	6.0	5.9
1stインターケーラー	順	6. 4	6.4	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.6
No.2 圧縮機	鏡	6.0	6.0	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	6.0
1s インターケーラー	順	6.6	6.5	6.6	9.9	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.6
No.1 圧縮機	鏡	5.9	5.8	5.8	2.8	5.8	5.8	5.8	2.8	5.8	5.8
2ndインターケーラー	胴	6.3	6.4	6.2	0.9	5.9	5.9	5.9	6.3	5.9	5.9
No.2 圧縮機	鏡	5.8	8.3	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.7	5.8
2ndインターケーラー	胴	6. 2	6.1	6.1	6.3	5.9	5.9	5.9	2.8	5.7	5.8
-4/-L11°L	鏡	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
	脯	6.6	6.6	6. 7	6.7	6. 7	6.7	6.7	6.7	6. 7	6. 7
T, 1-11, T	鏡	8. 4	8. 4	8.5	8.5	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4	8. 4
	順	10.4	10.5	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4
3/4B		4.0	4.1	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.1
1B		4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.2	4.2	4.2	4.3
$1 \cdot 1/2B$	В	4.9	4.9	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.9
2B		5. 2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
3B		7.1	7.1	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.1	7.3

表 5.2 最小二乗法による直線近似値(貯槽 A)

		20.2 72.3 —	一人はによる巨小	(C) (III)	
i	x _i 年数[年]	y _i 肉厚[mm]	X _i ²	$x_i y_i$	誤差の分布の推定値
					$\{y_i - (a+bx_i)\}^2$
1	12	49.4	144	592.8	0.003951
2	13	49.3	169	640.9	0.00059
3	14	49.3	196	690.2	0.000131
4	15	49.3	225	739.5	0.000002
5	16	49.2	256	787.2	0.007347
6	17	49.3	289	838.1	0.000737
7	18	49.2	324	885.6	0.0036
8	19	49.1	361	932.9	0.021651
9	20	49.3	400	986.0	0.004318
10	21	49.3	441	1035.3	0.006173
11	22	49.3	484	1084.6	0.008359
12	23	49.3	0.010876		
13	24	49.2	0.000294		
14	25	49.2	625	1230.0	0.0009
15	26	49.1	676	1276.6	0.003265
16	27	49.1	729	1325.7	0.001961
17	28	49.1	784	1374.8	0.000988
18	29	49.1	841	1423.9	0.000345
19	30	49.1	900	1473.0	0.000033
20	31	49.1	961	1522.1	0.000051
	∇ v. −420	$\Sigma y_{i} = 984.3$	$\sum x_i^2 = 9910$	$\sum x_i y_i = 21153.9$	$S_{yx} = \Sigma$
	$\sum x_i = 430$	∠ y _i −904.3	∠ x _i −9910	∠ x _i y _i −21103.9	${y_i-(a+bx)}^2=0.075571$

表 5.3 最小二乗法による直線近似値 (貯槽 B)

		27 0.0 72 7 -	一次はによる巨脈		
i	x _i 年数[年]	y _i 肉厚[mm]	${f x_i}^2$	$x_i y_i$	誤差の分布の推定値 {y;-(a+bx;)}²
	10		1.1.1	201.0	1
1	12	50.1	144	601.2	0.000459
2	13	50.1	169	651.3	0.000821
3	14	50.3	196	704.2	0.055632
4	15	50.1	225	751.5	0.001856
5	16	49.9	256	798.4	0.02241
6	17	50.0	289	850.0	0.001805
7	18	49.9	324	898.2	0.018296
8	19	50.0	361	950.0	0.000787
9	20	50.0	400	1000.0	0.000434
10	21	50.0	441	1050.0	0.000185
11	22	50.0	484	1100.0	0.000041
12	23	50.0	0.000001		
13	24	50.0	0.000065		
14	25	50.0	625	1250.0	0.000233
15	26	49.9	676	1297.4	0.006009
16	27	49.9	729	1347.3	0.004942
17	28	50.0	784	1400.0	0.001363
18	29	50.0	841	1450.0	0.001948
19	30	50.0	0.002637		
20	31	50.0	961	1550.0	0.003431
	Σ v420	$\Sigma y_{i} = 995.5$	$\sum x_i^2 = 9910$	$\sum x_i y_i = 21499.5$	$S_{yx} = \Sigma$
	$\Sigma x_i = 430$	∠ y _i −990.0	∠ x _i −9910	$\Delta x_{i}y_{i}$ -21499.0	${y_i-(a+bx)}^2=0.123353$

表 5.4 最小二乗法による直線近似値(貯槽 C)

		- 米伝による但称:		
x _i 年数[年]	y _i 肉厚[mm]	${ m x_i}^2$	$x_i y_i$	誤差の分布の推定値
-	•	•		$\{y_i - (a + bx_i)\}^2$
12	49.8	144	597.6	0.012737
13	50.0	169	650.0	0.010334
14	50.0	196	700.0	0.013494
15	50.0	225	750.0	0.017076
16	49.9	256	798.4	0.002042
17	49.8	289	846.6	0.001624
18	49.7	324	894.6	0.015823
19	49.8	361	946.2	0.000127
20	49.8	400	996.0	0.00001
21	49.7	441	1043.7	0.006766
22	49.7	484	1093.4	0.004589
23	49.7	529	1143.1	0.002834
24	49.7	576	1192.8	0.001499
25	49.7	625	1242.5	0.000586
26	49.7	676	1292.2	0.000094
27	49.7	729	1341.9	0.000023
28	49.7	784	1391.6	0.000373
29	49.7	841	1441.3	0.001145
30	49.7	900	1491.0	0.002337
31	49.7	961	1540.7	0.003951
V = -400	Z., -00F F	V = 2-0010	Z = 01202 C	$S_{yx} = \Sigma$
∠ x _i =430	∠ y _i −995.5	∠ x _i −9910	∠ x _i y _i −21393.0	${y_i-(a+bx)}^2=0.097566$
	12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	12 49.8 13 50.0 14 50.0 15 50.0 16 49.9 17 49.8 18 49.7 19 49.8 20 49.8 21 49.7 22 49.7 23 49.7 24 49.7 25 49.7 26 49.7 28 49.7 29 49.7 30 49.7 31 49.7	12 49.8 144 13 50.0 169 14 50.0 196 15 50.0 225 16 49.9 256 17 49.8 289 18 49.7 324 19 49.8 361 20 49.8 400 21 49.7 441 22 49.7 484 23 49.7 529 24 49.7 576 25 49.7 625 26 49.7 676 27 49.7 784 29 49.7 841 30 49.7 900 31 49.7 961	12 49.8 144 597.6 13 50.0 169 650.0 14 50.0 196 700.0 15 50.0 225 750.0 16 49.9 256 798.4 17 49.8 289 846.6 18 49.7 324 894.6 19 49.8 361 946.2 20 49.8 400 996.0 21 49.7 441 1043.7 22 49.7 484 1093.4 23 49.7 529 1143.1 24 49.7 576 1192.8 25 49.7 625 1242.5 26 49.7 676 1292.2 27 49.7 729 1341.9 28 49.7 784 1391.6 29 49.7 841 1441.3 30 49.7 900 1491.0 31 49.7 961 1540.7

$$y = a + bx$$

$$a = \frac{-\sum x_i \sum x_i y_i + \sum y_i \sum x_i^2}{N\sum x_i 2 - \sum x_i \sum x_i}$$
(5.1)

$$b = \frac{N\sum x_i y_i - \sum y_i \sum x_i}{N\sum x_i^2 - \sum x_i \sum x_i}$$

N:数列の数

$$S_{vx} = \sum \{y_i(a + bx_i)\}$$
 (5.2)

S_{vx}:誤差の分布の推定値

$$V_{yx} = \frac{S_{yx}}{(N-2)} \tag{5.3}$$

$$\sigma_{yx} = \sqrt{V_{yx}} \tag{5.4}$$

σ:標準偏差

$$B_{31y} = a + bx_{31y} - 3\sigma_{yx} \tag{5.5}$$

B_{31v}:使用年数 31 年間の標準偏差下限界での肉厚 [mm]

$$t_{rem} = \frac{\left(B_{31y} - B_{req}\right)}{V_{cr}} \tag{5.6}$$

t_{rem}:今後の寿命[y]

B_{reg}:設計肉厚[mm]

V_{cr}:減肉速度[mm/y](直線近似された直線の傾き b 値)

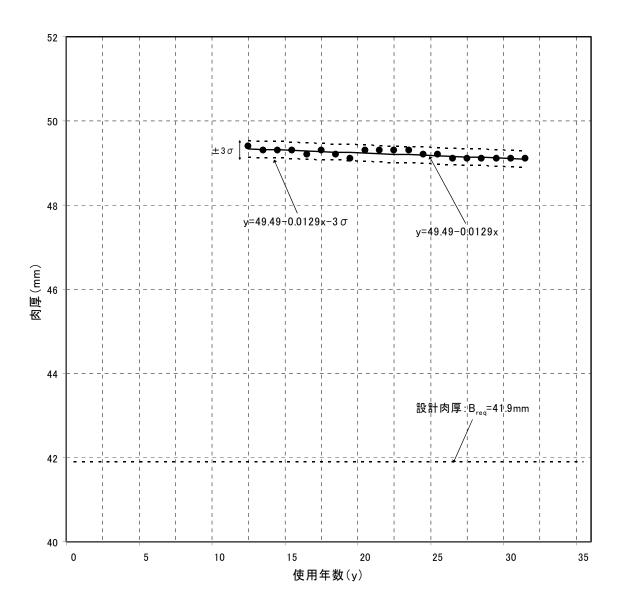


図 5.1 肉厚の時間変化(貯槽 A)

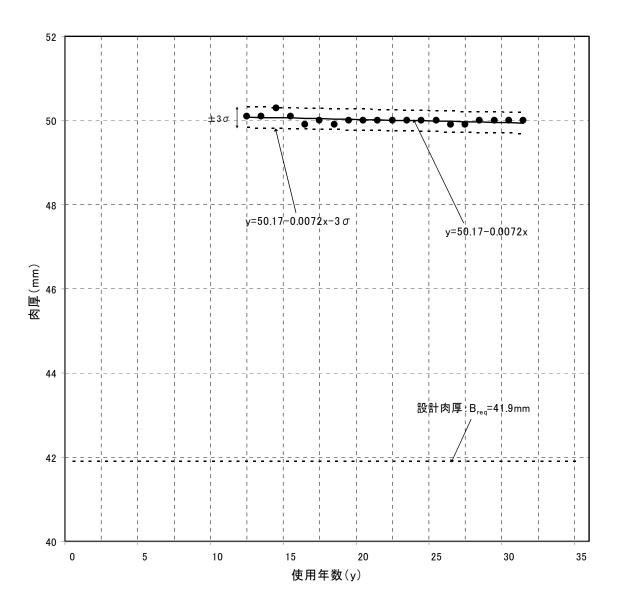


図 5.2 肉厚の時間変化(貯槽 B)

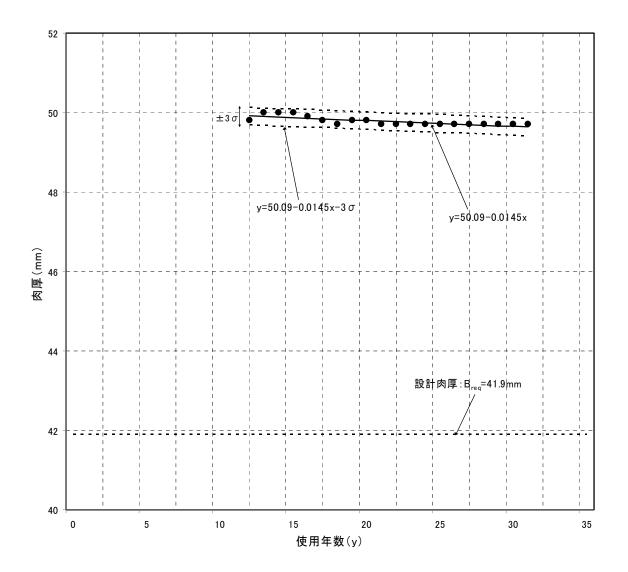


図 5.3 肉厚の時間変化(貯槽 C)

6. 点検整備

当施設は、高圧部、低圧部に区分され、機器、計器、安全装置、操作弁、配管、附帯設備が設置されている(図 4.1)。また、機器等を冷却する冷却水系(図 4.4)、安全弁からの放出ガスや真空ポンプからの排気ガスを大気へ排出するための排気系で構成されている。施設の安定運転を保つためには、機器等の点検整備は不可欠である。点検には、定期自主検査(対象機器に関しては保安検査を含む)と日常点検がある。

6.1 機器

機器には、貯槽、アフタークーラー、コンプレッサー、インタークーラー、ピュリファイヤー、ディータンク、配管があり、定期自主検査を、法令に基づき1年に1度以上実施する。検査項目には、開放検査(耐圧検査)、非破壊検査、肉厚測定検査、気密検査がある。これらの検査項目を実施し、法令で定める技術上の基準に適合しているか検査する。開放検査は、機器の経年劣化を早期に発見する重要な検査であり、各機器の開放検査の周期は法令で定められている。貯槽は5年、その他の機器は3年の周期で実施する。非破壊検査は、肉厚の厚い貯槽の胴体部は磁粉探傷検査、肉厚の比較的薄い箇所は浸透探傷検査、これらの検査が困難である配管は放射線透過検査、ベローズは設計圧力の1.5倍の耐圧試験により技術上の基準に適合しているか検査する。肉厚測定検査は、超音波による肉厚測定を行う。気密検査は、窒素ガスを常用圧力まで加圧し、フランジ接続部等に発泡液をかけて漏れのないことを検査する。

日常点検は、施設の停止期間中は1日1回、運転期間中は運転前に1回、運転中に1時間毎、停止 後に1回の頻度で施設全体の点検を実施している。

機器の点検整備履歴を表 6.1 に示す。1999 年、コンプレッサー2 基の 2nd インタークーラーの熱交換チューブに浸食が進んでいることを確認したため更新をした。2007 年、コンプレッサーNo.1、No.2 周りの冷却水配管の腐食が進行しているため冷却水配管、冷却水フィルター、ゲート弁、チャッキ弁の更新を行った。その他は大きな故障、修理はなく、一定周期で実施する開放検査により機器の安全を確保してきた。2009 年より、振動等のストレスが大きく加わる箇所の配管及び高圧ガスを管理する上で重要な操作弁等を優先的に更新することを進めている。

6.2 計器

計器には温度計、圧力計があり、系内のガスの状態を監視する重要な計器である。温度計の点検整備履歴を表 6.2 に、圧力計の点検整備履歴を表 6.3 に示す。高圧部(図 3.2 参照)の計器は、定期自主検査において毎年1回以上点検を実施している。その他、低圧部(図 3.2 参照)に関しては順次実施している。また、1999年に高圧ガス取締法から高圧ガス保安法に法令が改正され、圧力の単位が kg/cm² からMPa に変更された。これに基づき 1999年11月に、圧力計のほぼ全数をMPa 表記のものに更新した。温

度計は 1999 年以降、高圧部 15 個、低圧部 2 個を交換した。圧力計は 1999 年全数交換以降、高圧部 1 個、低圧部 1 個の交換、高圧部 3 個の調整を行った。

6.3 安全装置

安全装置には、安全弁、圧力センサーがあり、機器の破損や事故を未然に防ぐために重要な装置である。安全弁は、系内のガスの圧力上昇に伴い、圧力を放出させる安全装置である。圧力センサーは、系内のガスの圧力が設定圧力になると、コンプレッサーを自動停止させる装置である。

安全弁及び圧力センサーは、毎年 1 回以上点検を実施している。安全弁の点検整備履歴を表 6.4 に示す。安全弁は、2007 年に低圧部 1 台について、技術上の基準である作動圧力の範囲に調整ができなかったため、分解整備を行って性能を確保した。その他、高圧部 19 台については作動圧力の調整を行い技術上の基準を確保した。圧力センサーは、定期自主検査において作動圧力の検査及び調整を行い技術上の基準を確保している。

6.4 操作弁

操作弁は、ガスの移送ラインの切り替え、ガスの流量を調節する等において、開閉するための弁である。 操作弁の点検整備履歴を表 6.5 に示す。高圧部の弁は39 個、低圧部の弁は25 個設置されている。1998 年以降、高圧部34 箇所46 個、低圧部23 箇所、23 個の弁の分解整備を行った。高圧部の弁は、定期自 主検査において分解整備を行い、その後、気密検査により漏えいがないことを確認している。特に貯槽の 元弁は、SF₆ ガスを管理する上で重要な弁である。この弁は、貯槽の開放周期に合わせ分解整備を繰り 返し実施し、これまでに貯槽元弁6 個について2回分解整備を実施した。しかし、31 年という使用年月を 考慮して、2009 年に貯槽 Bと貯槽 Cの4 個ある元弁を認定品の弁に更新をした。貯槽Aの元弁につい ても更新する予定である。低圧部の弁は、法令上、定期自主検査を行う義務はないが、予算の状況によ り順次分解整備を実施している。弁の分解整備では、弁内部の異常、弁の出流れがないかを検査し、弁 が正常に機能することを確認している。

6.5 配管

当施設で使用する配管の径の種類は 3B、2B、1.5B、1B、3/4B、1/2B、1/4B がある。配管は定期自主検査において 1 年に 1 回以上、肉厚測定検査により肉厚が技術上の基準に適合しているか検査を行っている。これまで大きな不具合はなかったが、2009 年に 31 年使用してきたコンプレッサー吐出側の一部配管の更新を行った。コンプレッサー吐出側の配管には、コンプレッサーからの振動や圧縮されたガスが常用圧力(機器が使用状態で出現する最高圧力)3.46MPa、常用温度(機器が使用状態で出現する最高温度)100℃と高圧高温の環境下にあり、様々なストレスが配管に加わると推定できる。そこで取り出した配管を切断して配管内部を診断した。取り外した配管の切断面を写真 6.1 に示す。写真から、配管内面はサビ、スラッジ等もなく溶接箇所も非常にきれいな状態であり、配管の経年的な減肉も進行していない

ことを確認した。

また、計器と配管を接続する継ぎ手には Swagelok を使用しているが、この配管更新に合わせて材質を 真ちゅう製のものから強度的に優れているステンレス製のものに更新した。また、コンプレッサー周辺の計 器類が取り付けられている配管は 1/4 インチの細い配管であり、大きく振動するため柱等に針金で括り付 けて振動抑制対策をとっている。

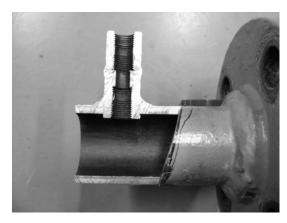




写真 6.1 配管の断面

6.6 附帯設備

低圧部の附帯設備には、キニーポンプ、ガスドライヤー、ターボコンプレッサー、ガスクーラー、アキュムレータータンク、レシーバータンク、サージタンク、オイルセパレーター、ダストフィルター、オイルフィルター、電源操作盤がある。中でもターボコンプレッサーは、年間約 200 日連続運転しているためベアリングの磨耗により異音が発生したため、これまでに2回分解整備を実施した。また、1998年に老朽化のため電源操作盤の更新を行った。翌年 1999 年には、高圧部(濃い緑色)、低圧部(薄い緑色)、冷却水系(水色)、排気系(灰色)の設備や配管を色で区別できるように、高圧ガス施設全般の塗装工事を実施した。配管には流体名称、流体方向を明確に表示した。

一部配管 更新 公掛 • ●法令開放検査 公敬 • 水フィルタ 更新 2007 弁更新 弁更新 公科 • フィルター 更新 2006 井 中 中 東 新 并分解 整備 并分解 整備 2002 交換 公掛 水ポンプ 修理 2004 • 公掛 アルミナ 確認 2003 分解整備 2002 2001 公母 • • 2000 公母 機器の点検整備履歴 全般塗装 チューブ 更新 交換 無 • 1998 并分解 整備 并分解 整備 公母 操作盤 更新 1997 公母 表 6.1 屋根更新 ベイング ベイン タンプ な数な数な数数数 1996 • 1995 公母 • 1994 公掛 公掛 1993 • 1992 公禄 • 1991 公母 1990 公母 ニーポンプ放出フィルター 2nd.インタークーラーNo.2 1st.インタークーラーNo.2 ターボコンプレッサーNo.2 2nd.インタークーラーNo.1 ターボコンプレッサーNo.1 1st.インタークーラーNo. アフターケーラーA アフターケーラーB ダストフィルター(3F) コンプレッサーNo.1 オイルフィルター ダストフィルター アキュムレーター ガスクーラー(3F) コンプレッサーNo.2 ガスドライヤーNo.2 ガスドライヤーNo.1 キニーポソプNo.1 キニーポンプNo.2 オイルセパレーター プリファイヤーディタンク ベーパライザー 電源操作盤 施設全般 ₹5-(3F) 貯槽B 貯槽C 機器名 貯槽A 配會 高压部 低圧部

-27-

●:分解整備	2009年度	8月	7	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	7	>	7	7	7	>	>																			
○:調整	2008年度	8月	7	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>																			
檢 ◎:交換	2007年度	8月	7	`	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	>	0	>	^	>	>	>	7	7																			
7 :点檢	2006年度	2月	^	>	7	<i>></i>	<i>></i>	<i>></i>	<i>></i>	<i>></i>	7	7	7	7	<i>></i>	>	^	>	^	^	/	>	>																			
	200	8月	>	>	7	>	>	>	>	>	>	>	>	7	>	>	>	>	>	>	>	7	>																			
	2005年度	2月	^	>	>	>	>	>	>	>	7	7	7	>	>	>	/	>	/	/	/	7	7				L															
	200	8月	<i>></i>	>	7	>	7	>	>	>	7	7	7	7	>	>	0	0	0	0	>	7	7																		Ц	
	2004年度	2月	>	>	>	>	>	>	>	>	7	7	0	7	7	>	1	>	1	1	1	7	7		7	7	>							/							7	>
温度計の点検整備履歴	20	8月	>	>	>	>	>	>	>	>	7	7	0	7	>	>	1	>	1	1	>	7	7			L	L															
、検整(2003年度	2月	1	^	7	^	>	>	^	>	7	7	7	7	>	^	^	>	^	^	1	7	7		>	>	>							>							7	7
計の点	20	8月	>	^	7	<i>></i>	>	>	<i>></i>	>	7	7	7	7	>	1	^	>	1	1	>	7	7			L	L															
温度調	2002年度	2月	1	^	7	^	>	>	^	>	7	7	7	7	>	0						L	L			L	L															
表 6.2	20	8月	>	>	7	>	7	>	>	>	7	7	7	7	>	>	>	>	>	>	>	7	7				L															
ШÁ	2001年度	2月	1	^	7	^	>	>	<i>></i>	0	7	7	7	7	>	1						L	L			L	L															
	20	8月	1	'	7	'	>	>	'	>	7	7	7	7	>	>	1	>	1	>	>	7	7																			
	2000年度	2月	<i>></i>	>	7	>	7	7	>	7	7	7	7	7	7	>						L	L																		L	
		8月	>	>	7	>	>	>	>	>	7	7	7	7	>	>	>	>	>	>	>	7	7																			
	1999年度	2月	^	>	>	>	>	>	0	0	0	>	0	>	0	>																									0	0
	温度計	番号	TI-8	TI-12	TI-17	TI-18	TI-19	TI-20	TI-22	TI-23	TI-24	TI-25	TI-27	TI-28	TI-29	TI-30	TIT-4	LIT-5	9-LIL	LIIT-7	TIT-8	6-TIT	TIT-10	TI-3	TI-4	TI-14	TI-21	TI-26	TIT-1	TIT-2	TIT-3	TI-1	TI-2	TI-5	9-IL	1-I-J	6-IL	TI-10	TI-11	TI-13	TI-15	TI-16
													高圧部														作工型									冷却水系					排气系	אר אר זען

	1 1 000		+			10000	_	-		4.000	-	1 - 0 0 0	_	1	1	4 4	+ -
_	9年	200C	2000年度	2001年度	年度	2002年度	\dashv	34	+	4 相	\dashv	05年	4	數.	2007年度	2008年度	2009年度
-	11月 2月	8月	2月	8月	2月	8月	2月	8月	2月	8月 2	2月 8	8月 2月	8月	2月	8月	8月	8月
H	© ~	^	>	>	>	>	>	7	>	>	7	> >	7	>	>	>	>
H	H	>	>	>	>	7	>	7	>	H	H	L		>	7	>	0
PI-10		>	>	7	>	>	7	7	7	-				7	7	>	>
PI-15	⊚ >	>	>	>	>	>	7	7	7	7	7	>	7	>	7	>	>
PI-16	© 7	>	7	7	7	7	7	7	7	7	7	>	7	7	>	>	>
PI-17	© 7	1	>	>	>	7	7	7	>	>	7	>	>	>	7	>	7
PI-18	© ~	1	^	^	1	1	1	1	^	^	1	1	>	^	>	^	>
_	© ?	>	>	7	>	>	7	7	7	7	7	>	7	7	>	,	7
PI-20		>	>	>	>	>	7	7	7	7		>	7	7	>	,	>
PI-21	© 7	1	>	7	>	>	7	7	>	7	7	>	7	7	>	,	7
PI-23	⋄	>	>	>	>	>	7	7	7	L	L	>	7	>	7	>	>
PI-24	⊘	1	^	^	^	1	1	1	^	^	0	1	>	^	>	`	>
PI-25	© 7	>	7	7	7	7	7	7	7	7	0	>	7	7	7	,	7
PI-27	© 7	^	>	7	>	>	7	7	7	7	7	>	7	7	>	>	7
80		>	>	>	7	>	7	7	7	7	7	>	7	7	7	,	>
PI-30	_	^	1	7	>	>	7	7	7	7	_	>	7	7	>	>	7
PI-31	© 7	>	7	7	7	7	7	7	7	7	7	>	7	7	7	,	7
PI-32	© 7	>	>	7	>	>	7	7	7	7	7	>	7	7	>	>	7
PI-S11	⊚ ~	>	7	7	7	7	7	7	7	7	7	>		7	7	,	0
3	0						>		>		>	>		>			
PI-4	0						1		1		1	>		>			
PI-5	0						7		7		7	7		7			
9-Id	0						<i>></i>		>		`	>		>			0
PI-8	0						<i>'</i>		'		^	>		>			
PI-11	0						1		1		1	>		>			
PI-12	0						1		^		1	^		^			
PI-22	0					r		\vdash			7	7		7			
PI-26	0						<i>'</i>		>		<i>></i>	>		>			
6	0						<i>></i>		<i>></i>		>	7		>			
PI-33											7	7		7			
PI-34											>	>		>			
PI-35																	
PI-36																	
PI-A1	0						'		'		<i>></i>	7		>			
PI-A2	0																
:12	0						1		^		1	^		^			
PI-41A							^		'		1	>		>			
PI-1	0																
PI-2	0																
PI-13	0						>		7		>						
PI-14	0						1		1		1						
PI-100	0						>		>		>						
טייי זיי	0																

●:分解整備	2009年度	8月	>	>	>	>	`	^	0	^	^	^	>								
7:点檢 ◎:交換 ○:調整 ●	2008年度	8月	^	7	>	>	>	>	0	>	>	>	>								
◎:洨嶽	2007年度	11月																		•	
点檢	200	8月	^	^	^	^	^	^	^	^	^	^	0								
2	2006年度	2月	>	>	^	`	^	^	^	^	^	^	>						^		
	2000	8月	0	>	1	>	0	>	0	^	>	0	0								
	2005年度	2月	1	>	^	>	>	1	1	>	1	>	1						>		
	2005	8月	0	0	0	>	>	^	^	0	0	0	^								
履歴	2004年度	2月	>	>	>	>	>	^	>	^	^	>	>						>		
倹整備	2007	8月	0	>	1	>	0	1	0	>	1	0	0								
3の点	2003年度	2月	1	>	1	>	>	1	1	1	1	1	^						1		
安全弁	2003	8月	^	^	^	^	^	1	1	^	1	^	^								
表 6.4 安全弁の点検整備履歴	2002年度	2月	1	^	1	^	^	1	1	^	1	^	^						^	^	
表	2002	8月	^	^	^	^	^	1	1	1	1	1	^								
	年度	2月	^	^	^	^	^	1	1	^	1	^	^								
	2001年度	8月	/	7	/	>	>	/	/	>	/	>	/								
	年度	2月	>	>	/	>	>	/	/	>	/	>	>								
	2000年度	8月	/	7	/	/	/	^	1	7	^	7	/								
	1999年度	2月	>	7	>	>	>	>	>	>	>	>	^								
	安全弁	番号	RV-6	RV-7	RV-13	RV-14	RV-15	RV-16	RV-17	RV-18	RV-20	RV-21	RV-22	RV-1	RV-2	RV-3	RV-4	RV-5	RV-8	RV-19	RV-23
								高圧部									低圧部				排気系

表 6.5 操作弁の点検整備履歴(1/2)

●:分解整備

1	ᇣᄹᄼ			1				1		ı	1	
	操作弁 番号	1999年度	2000年度	2001年度	2002年度	2003年度	2004年度	2005年度	2006年度	2007年度	2008年度	2009年度
Н												
	V-5			•								
	V-6			•								
	V-20		•									
	V-21		•		•							
	V-22		•									
	V-23		•									
	V-24		•									
	V-25											
	V-26			•								
	V-27		•					•				
	V-28		•					•				
	V-29	•					•					•
	V-30	•					•					•
	V-31	•										•
	V-32	•					•					•
	V-35				•			•				
	V-42		•									
	V-43											
	V-44	•										
	V-45											
	V-46		•							·		
	V-66											
	V-73		•					•				
		_										
	V-74	•					•					
	V-75	•					•					
	V-76											
高圧部	V-77											
上部	V-78											
ш	V-79											
	V-80											
	V-81											
	V-82											
	V-85											
	V-86											
	V-87			•								
	V-99											
	V-101											
	V-102											
	V-103											
	V-107											
	V-201											
	V-202											
	V-203						•					
	V-204						•					
	V-205						•					
	V-206						•					
	V-207											
	V-208											
	V-209						•					
	V-210						•					
	V-211						•					
	V-212						•					
	V-213						•					
	S-1											

表 6.5 操作弁の点検整備履歴(2/2)

●:分解整備

	操作弁	1999年度	2000年度	2001年度	2002年度	2003年度	2004年度	2005年度	2006年度	2007年度	2008年度	2009年度
	番号	1000-12	2000十尺	2001十1久	2002十1文	2000十尺	2001-12	2000十1文	2000十段	2007 十1文	2000十1文	2000十尺
	V-1											
	V-2											<u> </u>
	V-3					•						
	V-4					•						
	V-7			•								
	V-8			•								
	V-9					•						
						•						
	V-10											
	V-11		•									
	V-12		•									
	V-13		•									
	V-14		•									
	V-15		•									
	V-16			•								
	V-17					•						
	V-18		•									
	V-19		•									
	V-34											
	V-36		•									
	V-36 V-37				-							—
					-							
	V-38		•									
	V-47											-
	V-48											ļ
	V-49											
	V-50											
	V-51							•				
	V-52											
	V-53											
	V-54							•				
低	V-55							•				
低圧部	V-56											
当	V-57											
								•				
	V-58											
	V-59											
	V-60											
	V-61			•								
	V-62											
	V-63											
	V-64											
	V-65											
	V-67											
	V-68											
	V-69											
	V-70											
	V-71				1							
	V-71											
	V-83											
	V-84			•								<u> </u>
	V-92											
	V-93											
	V-94											
	V-95											
	V-96											
	V-104											
	V-105											
	V-106											
	V-214											<u> </u>
	V-70A											
	V-70A V-70B				-							
												
	VT-1							•				

7. SF₆ガスの管理

7.1 SF₆ガスの補充

タンデム加速器施設の圧力タンクに SF_6 ガスを 0.44MPa(G)充填するために、常時約 45tの SF_6 ガスを保有している。 SF_6 ガスは、加速器タンクの圧力及び貯槽の圧力により保有量を算出し、減った分を補充する。ガス補充の履歴を表 7.1 に示す。2002 年から 2009 年までの 8 年間で約 15t補充を行った。2004 年の補充量が少ないのは、2002年、2003年に損失量に対し多めに補充したことによる。2006年の補充量が多いのは、加速器タンクの SF_6 ガスの圧力を 0.44MPa(G)から 0.5MPa(G)にして加速器の印加電圧を上昇させる計画があったためである。

ガスの補充は、市販の SF₆ガス容器 (50kg/1 本) から 0.2MPa の低圧の状態にした貯槽 A へ気相で補充する。補充作業時間は外気温に影響し、容器 1 本あたり夏場で 3 時間、冬場で 6 時間を要する。これは、気化熱により容器が冷却されるため容器の表面温度が零度になったら補充を停止し、表面温度の回復を待ち再度補充することを繰り返すためである。

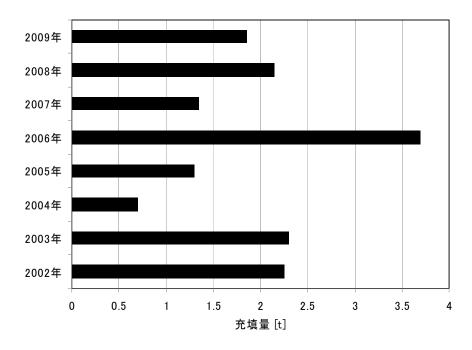


表 7.1 SF₆ ガス充填履歴

7.2 取扱上の注意

 SF_6 ガスは無色、無臭で無害であるが、ガス密度が $6.52~kg/m^3$ と空気よりかなり重い物質である。そのためガスが漏えいした場合に周辺の空気を押しだし酸素欠乏状態を招く恐れがある。当施設では、ガス漏えいに備えて酸素検知機を各所に床から 30cm の位置に設置している。また、 SF_6 ガスの臨界温度(液相状態に保てなくなる温度)は 44.5 C と低いため、市販の SF_6 ガス容器においても取扱に十分注意し、特に 夏場の直射日光があたらないように管理している。

8. SF₆ガス排出管理

8.1 温室効果ガス

 SF_6 は、その優れた電気絶縁性及び化学的安定性から幅広く用いられているが、地球温暖化係数が 23,900(CO_2 を1 として積分年数:100 年)と非常に大きく、大気寿命も3,200 年と長いことから地球温暖化への影響が懸念され、京都議定書で削減対象の温室効果ガスの1つに指定された。付録1に温室効果ガスとして指定されているガス及びその地球温暖化係数を示す。温室効果ガスには二酸化炭素、メタン、一酸化炭素、ハイドロフルオロカーボン(HFC)、パールフルオロカーボン(PFC)、六フッ化硫黄ガス (SF_6)がある。以下に温室効果ガス排出量を地球温暖化係数(CO_2 換算値)による算定式示す。

温室効果ガス排出量(tCO₂)=温室効果ガス排出量(t ガス)×地球温暖化係数 (8.1)

地球温暖化係数の表を元に式(8.1)から温室効果ガス排出量を算定すると、 SF_6 の地球温暖化係数が他の温室効果ガスより桁違いに大きいことから、排出量が少量でも大きな温室効果ガス排出量となる。これにより地球温暖化を引き起す可能性のある SF_6 は、大気中への放出を抑制するよう厳しく求められている。

8.2 SF₆排出状況

近年の SF₆の損失量と補充量及びタンク開放回数を表 8.1 に示す。年により変動はあるものの、毎年 1〜3tの SF₆の損失がある。これらの損失を補うために同程度の SF₆を購入し補充している。

損失の原因として加速器を整備する際に発生する残ガスが挙げられる。加速器タンクを0.93kPaまで真空回収した際の残ガスは約80 kg であり、これらは大気中へ放出される。例えば、2008 年度の加速器タンクの年間の開放回数は5 回であるため、整備に伴い約400 kg/年の SF_6 の損失が発生したと推定する。この他、法令で定められる年1 回の高圧ガス施設定期自主検査の際に配管等の残ガスが約50 kg 大気へ放出される。しかし、これら既知の損失量に比べ、実際の損失量ははるかに多い。

表 8.1 近年の SF₆の損失量と補充量の履歴

左	損失量	補充量	開放
年	(kg)	(kg)	回数
2002	1600	2250	5
2003	1800	2300	3
2004	1500	700	5
2005	3200	1300	7
2006	2200	3700	4
2007	1100	1350	2
2008	1400	2150	5
2009	4000	2150	7

8.3 SF₆損失原因の推定

SF₆損失の原因特定のため、高圧ガス施設の日常点検記録より分析を行った。1回のガスハンドリングサイクルでの SF₆の損失量を気体の状態方程式より計算し、加速器の運転期間に対して 2002 年から 2006 年についてプロットしたものを図 8.1 に示す。グラフよりガスの損失には 2 種類の原因があることがわかる。1つは運転日数に比例した損失である。運転期間が長くなるにつれて損失量も増える傾向があることが読み取れる。これは運転中の加速器タンクやガス循環系の機器からのリークによるものと推察される。その量は年により変動はあるが、1日当たり約5~10 kgのリーク量に相当する。もう一方は、運転期間に依存しないガスの損失であり、運転1サイクル当り約300 kgになる。損失量が運転期間に関わらずおおよそ一定であるため、ガス回収・充填工程で発生していると考えられる。

8.4 リーク検査の結果とSF₆ガス排出抑制対策

これまでは整備時に開放したフランジのみ、ガス充填時に、携帯型 SF₆ガス検知機によりリーク検査を行ってきた。前述(8.3)の推定から、リーク検査の範囲を広げてリーク検査を実施した。タンデム加速器施設の SF₆ガスは図 3.2 高圧ガス製造施設系統図にあるように、高圧部と低圧部がある。2006 年後期、写真 8.1~8.3 のように低圧部である加速器タンク及び循環系機器に付随する全てのフランジ、配管、バルブ類を対象にリーク検査を実施した。SF₆ガス検知機の検出感度を上げるために、写真 8.2 のようにフランジ類はビニールバッグやビニールシートで完全に覆い、数時間から数日静置した後にリーク測定を行った。その結果、バルブやフランジ等、計 18 箇所からリークがあることを確認できた。これらのリーク箇所は、定期整備時に順次補修した。図 8.2 にリーク対策後の 2007 年から 2009 年の運転期間とガス損失量の関係を示す。実施したリーク対策により、運転期間に依存するガス損失量はほぼ無くなった。2007 年以降も定期的にリーク検査を実施し、運転期間に依存するガスの損失を抑えてきた。

しかし、表 8.1 のとおり依然としてガス損失量は多い。 2010 年初期、運転期間に依存しないガス損失の原因について、再度リーク検査の方法、範囲、実施時期について検討を行った。高圧部は法令に基づき実施する定期自主検査の気密検査において、ガスの漏れがないことは実証されている。このことから運転期間に依存する加速器タンク、ガス循環系の機器を除いた、低圧部に範囲を絞って徹底的にリーク検査を実施した。その結果、弁や配管継ぎ手の 4 箇所から微少リークを確認した。さらに、弁(V-9)の仕切りシール面の劣化等によるガスの出流れにより、ガス回収時に大量の SF₆ が排気口より放出されていたことが判明した。その量は、運転 1 サイクル当たり数百 kg の損失と推定した。

これまでのリーク検査の結果をまとめたものを表 8.2 に示す。リーク検査の実施により、多くのリーク箇所が発見することできた。フランジの接続に使用するガスケットの交換、フランジのボルトの増し締め、出流れがある弁の分解整備の対策等により、SF₆ガスの排出量を数百 kg 抑えることができた。今後、定期的にリーク検査を実施して、SF₆ガスの排出抑制対策を継続的に実施していくことが大切である。

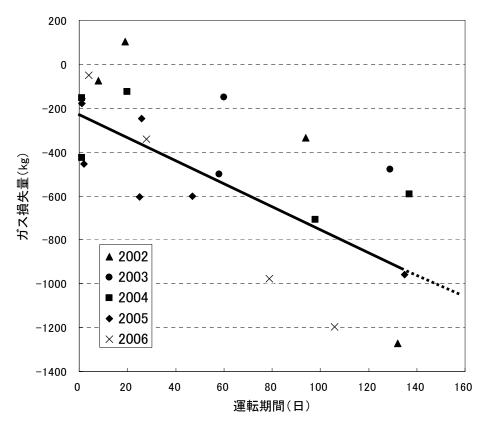


図 8.1 損失量と運転期間との関係

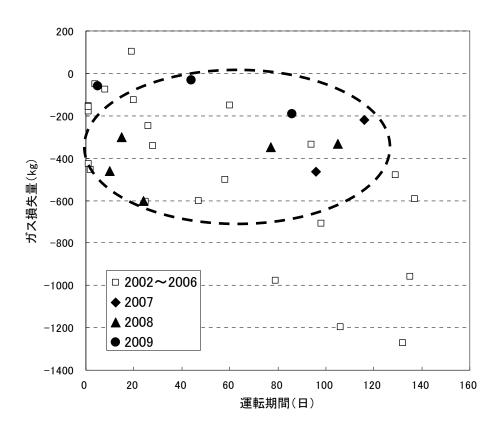


図8.2 リーク対策後の損失量と運転期間との関係



写真 8.1 リーク検査(SF₆検知機)





写真 8.2 リーク検査のための養生





写真8.3 リーク量の測定

JAEA-Technology 2010-023

表 8.2 リーク原因と対策

リーク箇所	発生数	原 因	対 策
フランジ接続部	13	ガスケットの経年劣化および締め付け不足	ガスケット更新
フラン マ 1安がに申り	10	スペノット・シル性中分 旧ねよい 神殿 内 () 不足	ボルト増し締め
45	3	弁グランドパッキンの経年劣化	弁の交換
弁	2	仕切りシール面の劣化による出流れ	分解点検、修理
CPO電極ネジ式フィ	1	CPO調整の繰り返しによるシールテープの	シールテープの巻
ードスルー	1	痩せ	き直し
コロナプローブ直線導	1	プローブシール用Oリング締め付けネジの	ネジの増し締め
入機構	1	緩み	インサービャルの
No.1ガスドライヤード	1	SF ₆ 分解性生物とドレン水が反応し強酸性	ドレン配管の更新
レン配管	1	液体となり配管と弁を腐食	トレン配官の皮利
司体処ギエ	2.	タケルルサンダウトナ	継ぎ手の交換・増し
配管継ぎ手	Δ	経年劣化及び締め付けの不足 	締め

JAEA-Technology 2010-023

9. おわりに

運転管理において、これまで 31 年間、当施設が安定に稼働し続けていられるのは、各機器の点検整備を継続的に実施してきたからである。定期自主検査や日常点検において、機器の異常を早期に発見し、補修や整備をすることは、安全を確保するためにも重要である。また、高圧ガス主要機器の経年劣化の評価を行った結果、経年劣化対策は特に必要ないことを確認できた。SF₆ の排出抑制対策に関しては、施設全般のリーク検査を実施し、加速器の運転期間中及びガス回収・充填中の損失原因を特定でき、SF₆ ガスのリーク量を減らすことができた。

今後、高圧ガス主要機器はもとより、計器、安全装置、操作弁、配管、その他の附帯設備について、 点検整備を充実させ、施設の安定な稼動のため運転管理を行う。また、定期的にリーク検査を実施して 更なる SF₆排出量の低減に努める。

最後に、これらを従事する作業員全員の安全意識向上のためにも、日常的な保安教育に努める。

謝辞

本施設の運転管理及びSF₆ガス排出抑制対策の実施にあたり、多くのご支援を頂いた加速器管理課の 各位に心から感謝致します。

参考文献

- 1) 岩波書店: "岩波理化学辞典 第 5 版",p.1175.1998
- 2) 峰原英介ほか: "原研タンデム加速器の SF6 ガス中に含まれる不純物", JAERI-M84-004, 1984.
- 3) 茨城県商工労働部工業技術課: "高圧ガス設備経年劣化対策マニュアル ー高圧ガス設備の寿命 予測手法とその応用ー",1997.

JAEA-Technology 2010-023

付録1 地球温暖化係数

				地球温暖化係
		温室効果ガス		数
				(CO ₂ 換算値)
1	二酸化	比炭素	CO_2	1
2	メタン		CH ₄	21
3	一酸化	比炭素	N_2O	310
		トリフルオロメタン	HFC-23	11,700
		ジフルオロメタン	HFC-32	650
		フルオロメタン	HFC-41	150
	ハイ	1・1・1・2・2-ペンタフルオロエタン	HFC-125	2,800
	ハイドロフルオロカーボン(HFC)	1・1・2・2-テトラフルオロエタン	HFC-134	1,000
	フルオ	1・1・1・2-テトラフルオロエタン	HFC-134a	1,300
4	プロカー	1・1・2-トリフルオロエタン	HFC-143	300
	ボ	1・1・1-トリフルオロエタン	HFC-143a	3,800
) (HF	1・1-ジフルオロエタン	HFC-152a	140
	rC)	1・1・1・2・3・3・3-ヘプタフルオロプロパン	HFC-227ea	2,900
		1・1・1・3・3・3-ヘキサフルオロプロパン	HFC-236fa	6,300
		1・1・2・2・3-ペンタフルオロプロパン	HFC-245ca	560
		1・1・1・2・3・4・4・5・5・5-デカフルオロペンタン	HFC-43-10mee	1,300
	パ	パーフルオロメタン	PFC-14	6,500
	ールフ	パーフルオロエタン	PFC-116	9,200
	フルオロカーボン(PFC)	パーフルオロプロパン	PFC-218	7,000
5	立カー	パーフルオロブタン	PFC-31-10	7,000
	ーボン	パーフルオロシクロブタン	PFC-c318	8,700
	(PF	パーフルオロペンタン	PFC-41-12	7,500
	()	パーフルオロヘキサン	PFC-51-14	7,400
6	六フッ	· 化硫黄	SF ₆	23,900

付録2 機器の写真

《高圧部の機器》



貯槽



コンプレッサー



1st.インタークーラー



2nd.インタークーラー



アフタークーラー

《低圧部の機器》



ベーパライザー(蒸発器)



キニーポンプ(真空ポンプ)



ターボコンプレッサー



ガスドライヤー

国際単位系(SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本 ¹	単位
巫平里	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	K
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

組立量	SI 基本単位	
和立里	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	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 ³
質 量 濃 度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝 度		cd/m ²
屈 折 率 (b)	(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物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。 (b) これらは海沢元量かるいは次元1をもっ量であるが、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

双 5 .	固有の名称と記す	7 (1)(0		
			SI 組立単位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
	2010	記方	表し方	表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 (p)	m/m
立 体 角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 (b)	$m^{2/}m^2$
周 波 数	ヘルツ ^(d)	$_{ m Hz}$		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	$m^2 \text{ kg s}^{-2}$
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	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静 電 容 量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
	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
	テスラ	Т	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
	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)	$^{\circ}$ C		K
光	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
	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,	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
カーマ	/ - 1	dy	o/kg	III S
線量当量, 周辺線量当量, 方向	シーベルト ^(g)	G	T.0	2 -2
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

(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

コニーレントではない。 したリントではない。 (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

実際には、使用する時には応ぎては及び客か用いられるが、管償としく無払単位としていた方である数子の「は対 示されない。 (a)無火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)へルツはは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性技種の総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。 (放射性技術の放射能(citvity 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

X 4. 牛匠V		[組立単位	T-> 1/2
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘	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
	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		J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
· -	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
電界の強き	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 sA
	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
	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 sA
吸 収 線 量 率	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 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/m³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

		表5.8	I 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	Е	10 ⁻³	₹ <u>リ</u>	m
10^{15}	ペタ	Р	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナーノ	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}	丰 口	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	У

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	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/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=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$		

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 eV 1eV=1.602 176 53(14)×10⁻¹⁹J 1Da=1.660 538 86(28)×10⁻²⁷kg H. ルト Da 統一原子質量単位 1u=1 Da u 天 文 単 位 1ua=1.495 978 706 91(6)×10¹¹m ua

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	
バーン	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	CI光体しの料体的な関係は	
ベル	В	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。	
デ ジ ベ ル	dB ∽	713/2=17/23/1-17/10	

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	$1 \text{ St} = 1 \text{cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$		
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ 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		
マクスウェル	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 ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10³/4π)A m ⁻¹		

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

	いその他	の単位の例

	3	名利	Ķ.		記号	SI 単位で表される数値
丰	ユ		リ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レ	ン	卜	ゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				k	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レ				A	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		ン		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	工		ル	13		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系.	カラ:	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
}				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カ	П		IJ	1	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー),4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク		口	ン	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$