



J-PARC 物質・生命科学実験施設における 水銀漏洩事象時の影響評価

Risk Assessment of the Mercury Leak at Materials & Life Science
Experimental Facility of J-PARC

春日井 好己 甲斐 哲也

Yoshimi KASUGAI and Tetsuya KAI

J-PARCセンター

物質・生命科学ディビジョン

Materials and Life Science Division
J-PARC Center

May 2009

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, 2009

J-PARC 物質・生命科学実験施設における水銀漏洩事象時の影響評価

日本原子力研究開発機構
J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン
春日井 好己・甲斐 哲也

(2009年2月5日受理)

J-PARC 物質・生命科学実験施設において、1MW 運転時に中性子ターゲットとして使用されている水銀が水銀循環系から漏洩し、放射性物質が排気筒から外部へ放出された場合の事業所境界における被ばく線量を評価した。その結果、事業所境界における外部被ばく量は $30 \mu\text{Sv}$ であり、その大部分は水銀から核破碎生成物として発生する希ガスによる寄与であることがわかった。また、水銀及びトリチウムによって与えられる内部被ばく量は、それぞれの寄与を合わせても $0.1 \mu\text{Sv}$ であった。保守的な事象想定にもかかわらず、これらの評価値は一般公衆が自然から受ける年間被ばく量と比較しても十分小さな値であり、本施設が放射能漏洩に対して十分な安全裕度をもつことが示された。

Risk Assessment of the Mercury Leak at Materials & Life Science Experimental Facility of J-PARC

Yoshimi KASUGAI and Tetsuya KAI

Materials and Life Science Division, J-PARC Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Ibaraki-ken

(Received February 5, 2009)

Evaluations of radiation dose at the site boundary for the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) at J-PARC were carried out supposing that the mercury used as the neutron target happened to leak from the mercury circulation system during 1 MW operation. As a result of the evaluation, the dose of external exposure at the site boundary was estimated to be 30 μSv , which was almost given by the radioactive noble gas produced via spallation reactions. The inner exposure of radioactive mercury and tritium was estimated to be 0.1 μSv in total. Since the estimated dose was enough low in comparison with a personal annual dose from natural radioactivity, even though the event scenario was made conservatively, it was shown that MLF has high safety margin for the leak of radioactivity.

Keywords: Risk Assessment, J-PARC, MLF, Spallation Neutron Source, Mercury, Noble Gas

目次

1. はじめに	1
2. 想定する事象	2
3. 評価	3
3.1 生成放射能	3
3.1.1 運転条件	3
3.1.2 計算コード及び計算モデル	3
3.2 換気系への移行	3
3.2.1 水銀	4
3.2.2 ハロゲン	4
3.2.3 希ガス	5
3.2.4 トリチウム	8
3.2.5 その他の核破砕生成物	9
3.3 実効線量の評価	9
3.3.1 実効線量の評価方法	9
3.3.2 大気拡散の評価	10
3.3.3 結果	14
4. まとめ	15
謝辞	15
参考文献	16
付録 A1 水銀の蒸発速度	32
付録 A2 水銀中での希ガス及び水素（トリチウム）の拡散定数の評価	39
付録 A3 水銀の空气中濃度許容値について	41
付録 A4 物質・生命科学実験施設における水銀及びオフガス漏洩事象時の影響評価	42

Contents

1. Introduction	1
2. Credible Event	2
3. Analysis	3
3.1 Produced radioactivity	3
3.1.1 Operation condition	3
3.1.2 Calculation code and model	3
3.2 Transfer of radioactivity to air ventilation system	3
3.2.1 Mercury	4
3.2.2 Halogen	4
3.2.3 Noble Gas	5
3.2.4 Tritium	8
3.2.5 Other spallation products	9
3.3 Effective dose evaluation	9
3.3.1 Method of effective dose evaluation	9
3.3.2 Atmospheric diffusion analysis	10
3.3.3 Results	14
4. Concluding remarks	15
Acknowledgement	15
References	16
Appendix A1 Evaporation rate of mercury	32
Appendix A2 Diffusion coefficients of noble gas and hydrogen (tritium) in mercury	39
Appendix A3 Maximum permissible value of density of mercury vapor in the air	41
Appendix A4 Risk assessment of mercury and off-gas leak at the Materials and Life Science Experimental Facility	42

1. はじめに

原子力機構と高エネルギー加速器研究機構が建設した大強度陽子加速器施設(J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex)¹⁾は、世界最高クラスの大強度陽子ビームを生成する加速器と、その大強度陽子ビームを利用する実験施設で構成されている。その中の物質・生命実験施設(MLF)²⁾は、3 GeV、1 MW の高エネルギー陽子をターゲット物質である水銀に打ち込むことにより中性子を発生させ、これを使って物質構造や原子核物理等の研究を行う施設である。

本施設では、陽子及び中性子等によって、ターゲット容器、水銀、ターゲット周りの機器（モデレータ及び反射体）、冷却水が放射化する。水銀中に発生した揮発成分である希ガス、トリチウムは気相に移行するため、一定期間毎に処理する必要がある。水銀からは放射性ガス（希ガス、トリチウムなど）が発生する。そのため本施設には、水銀から発生する放射性ガスの外部への放出量をできるだけ低減するための処理システム（正式名称：「気体廃棄物処理システム」）を設けている。水銀から発生する放射性ガスはこれによって処理された上で放出される。

ターゲット物質である水銀は、水銀ポンプ、水銀タンク（サージタンク）及び熱交換器を含む水銀循環系を循環する。水銀循環系の配管接続部などから水銀が漏洩した場合、水銀蒸気や放射性ガスの一部は処理されずに排気筒から外部へ放出されることになる。また、通常放出時には考慮する必要のない短寿命核種の一部も外部へ放出される。

本施設では、水銀漏洩等の異常事象の発生に対しては、それを出来るだけ早く検知し、影響を最小限に押さえるための設計を施している。水銀循環系からの水銀漏洩の発生については、漏洩検知器またはサージタンクの液位低下により検知する。それによって、加速器及び水銀循環系の運転は自動的に停止する。また、水銀循環系が設置されているホットセル（正式名称を「放射化機器取扱室」といい、通常、人は入室せず遠隔操作により機器の保守を行う）から空調系への放射性ガスの流出を遮断するために、ホットセルからの排気系には気密性の高いダンパーを設けている。

本レポートでは、水銀漏洩が発生した場合の外部への影響について評価するために、いくつかの安全装置の機能を考慮しない等できるだけ保守的な（つまり被ばく量が大きくなる）条件を想定し、その際の放射性物質の外部放出量とそれに伴う事業所境界における被ばく線量の評価を行った。

本レポート構成について記す。第2章では、想定シナリオの詳細について述べる。第3章では、被ばく評価の方法とその結果について示す。第4章では本レポートのまとめを行う。

2. 想定する事象

水銀漏洩に対しては、その拡大を防ぐために、以下に示すような設計上の考慮がなされている。ターゲット台車上の水銀循環系から水銀が漏洩した場合は、漏洩した水銀はターゲット台車上に設置したキャッチパン上に落ちる。キャッチパンには漏洩検知器が設けられ、水銀の漏洩を検知する。漏洩が検知された場合には、安全装置により陽子ビーム及び水銀循環系の運転は停止する。また、キャッチパンからはターゲット台車下の捕集タンクへ漏洩水銀を導く配管が設けられており、漏洩が検知された際は配管に設けられた弁が開き漏洩水銀を捕集タンクに導く。それにより水銀蒸気が気中に移行する量を最小限にする。また、大量の漏洩が発生した際には、放射化機器取扱室（ホットセル）の空調を遮断することにより、外部への水銀蒸気及びその他のガス状放射性物質の放出をできるだけ少なくする。なお、陽子ビームが照射される水銀ターゲット容器は、内側の水銀容器と外側の保護容器により構成されている。水銀容器と保護容器の間にも漏洩検知器が設けられており、水銀漏洩時には、水銀循環系からの漏洩と同様に、陽子ビームと水銀循環系の運転を停止するため、水銀ターゲット容器の外側に水銀の漏洩が拡大することはない。図 1 に、水銀漏洩に対する安全システムの概念図を示す。

このように、放射性物質の外部への放出に対しては多重性をもった防護システムを備えている。しかしながら本レポートでは、これらの安全システムのいくつかの機能を考慮せずに評価を行う。下記に想定したシナリオを示す。

- ① 1 MW 運転中に放射化機器取扱室の水銀循環配管の配管接続部または弁等から水銀が漏洩する。
- ② キャッチパン上の漏洩検知器により水銀の漏洩が検知される。安全装置により陽子ビーム及び水銀ポンプは停止し漏洩はほぼ終息する。全漏洩量は 0.5 m^3 （全量の約 1/3）とする。ⁱ
- ③ 水銀をターゲット台車下部の捕集タンクに導くための配管のバルブが動作せず、水銀はキャッチパン上に留まる。
- ④ 漏洩発生後も、放射化機器室の空調は継続して作動し続け、気化した水銀及び水銀中の核破砕生成物の一部が、空調系を通して排気筒から外部へ放出される。
- ⑤ 空調は漏洩発生から 1 時間後に停止され、排気筒からの放出は止まる。

なお付録 A4 には、技術上は起こり得ないが仮想的には外部への影響が最大となる「水銀循環系からの水銀全量漏洩」を仮定した評価を示す。ⁱⁱ

ⁱ 仮に漏洩検出器が働かなかった場合でも、サージタンク中の水銀液位の低下により漏洩を検知することができる。この場合も、安全装置により陽子ビーム及び水銀ポンプは自動的に停止する。

ⁱⁱ 付録 A4 は、本施設の変更許可申請（平成 20 年 3 月）において「参考資料」として提出したものである。

3. 評価

3.1 生成放射能

循環水銀に含まれる放射能の評価について示す。

3.1.1 運転条件

事故が発生するまでに 1MW で 5,000 時間の運転を行っているものとする。また、循環している水銀の全量は 1.4 m³ とする。

水銀は施設寿命の間、交換することなく使い続ける。そのため、半減期が年オーダーの放射能に対しては過少評価となる。しかしながら当想定事象によって与える被ばくは、大部分がトリチウム、希ガス及び水銀によるものでありⁱⁱⁱ、これらについては以下に示す理由から過少評価とされない。

- 水銀の主要核種は ²⁰³Hg であり、その半減期は 46 日である。よって 5000 時間の運転で十分飽和値に達している。
- トリチウム及び希ガスは、水銀内で生成されてから一定時間後にはほぼ全量がサージタンク内のカバーガスに移行する。カバーガスは半年に一回程度処理されるため、サージタンクを含む水銀循環系内に、トリチウムなどの年オーダー以上の半減期の放射性核種が蓄積することはない。

よって、放射能の評価については、5000 時間の運転を考慮すれば十分である。

3.1.2 計算コード及び計算モデル

NMTC/JAM³⁾、MCNP-4C⁴⁾及び DCHAIN-SP⁵⁾を用いた。評価モデルとしては、水銀、ターゲット容器、セーフティハル、反射体、減速材を実際の大きさ及び形状でモデル化したものを用いた⁶⁾。水銀中に生成する全放射能の計算結果を表 1 に示す。表中には、漏洩した水銀から気中に移行する可能性のあるトリチウム、希ガス及び水銀の放射能のみを示す。これ以外の核破砕生成物は気中に移行しない。理由は後述する。

3.2 換気系への移行

放射化機器取扱室内に漏洩した水銀から換気系へ移行する可能性のある放射性元素として水銀、ハロゲン、希ガス、トリチウム^{iv}、その他の核破砕生成物の順にその移行可能性と移行量の評価について記す。

ⁱⁱⁱ 理由については 3.2 以降で記述する。

^{iv} 水銀中ではトリチウムは HT または HTO として存在すると考えられるが、本レポートではすべてのトリチウムが気中に移行しやすい HT で存在すると考える。HT と HTO の存在比及びそれらの移行挙動については、今後の研究課題である。

3.2.1 水銀

水銀ターゲット台車のキャッチパン上に漏洩した水銀からの水銀の蒸発量を求めるために、以下の条件を仮定する。また、それぞれの仮定に対する根拠及び考え方を示す。

- ① 水銀の漏洩直後の温度は 80℃とし、その後も一定とする。
- ② 空調によるホットセル内の風速を 0.1 m/s とし、温度は 30℃とする。
- ③ 水銀表面にできる酸化膜による蒸発量の抑制効果は考慮しない。

①に関連して、1 MW 運転時において水銀循環系からターゲット容器に送り出された約 50℃の水銀の温度は、ターゲット中での核破砕反応により約 75℃まで上昇する。よって、水銀が漏洩した場合でもその最高温度は 80℃とすれば十分である。また、漏洩後の温度降下を考慮しないことにより蒸発量に対して安全側の（より蒸発量の大きい）評価になる。

②については、放射化機器取扱室の換気風量（14,220 m³/h）及び室内断面積(95 m²)から室内の平均風速は 0.04 m/s と求められるが、局所的に流速の速い領域があることを考慮して 0.1 m/s とした。風速が強いほど蒸発量が増加するため、より安全側の評価となす。

③については、水銀が漏洩し空気に触れると表面に酸化膜が形成され、そのため水銀の蒸発が抑制される可能性があるが^v、安全側に評価するという観点からこれを考慮しないこととする。

付録 A1 に示した方法により水銀の蒸発量を評価した。図 2 に水銀表面温度及び室内の風速に対する水銀の単位面積あたりの蒸発量の変化を示す。①～③の条件から水銀の蒸発量は 1.0 g/(m²h)となる。キャッチパンの捕集面の面積は 16 m²より、空調が作動している 1 時間での全蒸発量は 16 g となる。

放射化機器取扱室からの空気は水銀吸着フィルターを通過して排気筒から排出される。水銀蒸気に対するフィルターの除染係数を 100 とすると、1 時間で 0.16 g の水銀が排気筒から放出されることになる。表 2 に排気筒から放出される水銀核種の放射能を示す。

3.2.2 ハロゲン

水銀中で核破砕生成物として発生するヨウ素は、水銀と反応しヨウ化水銀（Hg₂I₂ 及び HgI₂）になる。ヨウ素の水銀に対する化学反応と各反応の標準反応ギブス自由エネルギー^{vi}及びそれか

^v 水銀を空気中に置いて酸化膜を形成させた後の空気中への蒸発量については、厳密には酸化皮膜の厚さに依存するものの 10³ 程度のオーダーで抑制されるという実験結果も報告されている。
^{vi} 標準状態（圧力 10⁵ Pa、温度 298 K）で化合物 1 モルをその構成要素から生成するときのギブスエネルギー変化を標準生成ギブスエネルギー $\Delta_f G^0$ とよぶ。化学反応 $\nu_A A + \nu_B B \rightarrow \nu_C C + \nu_D D$ の標準反応ギブス自由エネルギー $\Delta_r G^0$ は各々の化学物質の $\Delta_f G^0$ を用いて、次式で求められる。

$$\Delta_r G^0 = (\nu_C \Delta_f G_C^0 + \nu_D \Delta_f G_D^0)_{\text{生成物}} - (\nu_A \Delta_f G_A^0 + \nu_B \Delta_f G_B^0)_{\text{反応物}}$$

ら計算した平衡定数（反応系の温度 $T=80^{\circ}\text{C}$ とした）を表 3-1 に示す。また、ヨウ素及びヨウ化水銀の化学的性質を表 3-2 にまとめる。

平衡定数の値は、反応の平衡点が大きくヨウ化水銀側に偏っておりヨウ素が I または I_2 として水銀中に残存することはほとんどないことを示している。また、ヨウ化水銀は 80°C 程度では安定な固体であり蒸気圧も小さいため、水銀漏洩時において、気中に移行することはない。

同様に臭素についても水銀との反応でほとんどが臭化水銀 (HgBr_2 及び Hg_2Br_2) になり、気中に移行することはない。（表 4-1 に水銀に対する臭素の化学反応と $T=80^{\circ}\text{C}$ での平衡定数を示す。また、表 4-2 に臭素及び臭化水銀の化学的性質をまとめる。）

以上の理由から、ヨウ素及び臭素は水銀漏洩時においても排気筒から放出されることはない。

3.2.3 希ガス

水銀中で核破砕生成物として発生する希ガス（アルゴン、クリプトン及びキセノン）は、サージタンク内のカバーガス（ヘリウム）に連続的に放出される。漏洩した水銀からはカバーガスに放出されず残存した希ガスがある割合で気中に移行する。よって、漏洩した水銀からある時間内に気中に移行する希ガスの量を推定するためには、次の二つの要素を評価する必要がある。

- a. 発生した希ガスの内、サージタンクのカバーガスに放出されずに水銀中に残存する割合
- b. 漏洩水銀からの希ガス放出量

a については、水銀からのカバーガスへの希ガスの移行を図 3 に示すような 1 次元半無限物質からの拡散として評価し、これを考慮して水銀中に残存する希ガス放射能を評価することとする。また、b については、水銀がパイプの継ぎ目などから勢いをもって突出する場合を想定して、漏洩した水銀中に含まれる希ガスの全量が気中に移行するものとする。

まず、水銀（液相）からのカバーガス（気相）への希ガス（以下「ガス」とする）放出について検討する。それにあたって、以下のような条件を仮定した。

- 条件 1 初期条件として液相中のガス濃度は一様(C_0)とする。
- 条件 2 境界条件として、液相と気相が接する表面でのガス濃度はゼロ^{vii}、液相の深い位置（数学的には無限遠）では C_0 とする。
- 条件 3 表面付近の液相は、液相の循環などによる乱れによって初期状態（ガス濃度一様の状

^{vii} この条件は、液体水銀に対する希ガスの溶解度がとても小さい、つまり水銀（液相）に溶解している希ガスのモル濃度 C に対してそれと平衡状態になるカバーガス（気相）中の希ガスの分圧 p がとても大きいとすれば正当化される。このとき理想希薄溶液でのヘンリーの法則 $p=kC$ (k はヘンリー定数) が成り立つとすれば、ヘンリー定数は大きな値になる。

態) にランダムに更新される。⁷⁾

まず、条件 1 及び 2 を考慮して拡散方程式を解く。解くべき微分方程式は

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

で表される。ここで、

$C(x,t)$: 位置 x 、時間 t でのガス濃度

D : 液相中でのガスの拡散係数

である。座標については、液相表面を $x=0$ としてそこから液相の方向を正とした。これを、

初期条件: $C(x,0) = C_0$

境界条件: $C(0,t) = 0$ 及び $C(\infty,t) = C_0$

を考慮して解くと、水銀 (液相) 内の濃度分布は

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2)$$

となる。これより、時間 t での放出速度 (単位時間、単位面積あたりの放出量) q は

$$q = -D \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = -\sqrt{\frac{D}{\pi t}} C_0 \quad (3)$$

となる。(符号は放出の向きを示す。) つまり、拡散によってできた濃度分布が乱されないとすれば、希ガスの放出速度は $1/\sqrt{t}$ に比例して減少することになる。ここで、条件 3 を考慮して、表面付近では気相との単位接触面積のうち毎秒 s の面積が初期状態に更新されると仮定する。このとき、単位面積中で年齢 (初期状態に更新されてからの経過時間) が τ になる面積を $\phi(\tau)$ とする^{viii}。 $\phi(\tau)$ は単位時間当たり $s\phi(\tau)$ だけ減少するので、

$$\frac{d\phi}{d\tau} = -s\phi \quad (4)$$

とかける。また、 $\phi(\tau)$ を $0 \sim \infty$ まで積分すると単位面積になるので、

$$\int_0^\infty \phi d\tau = 1 \quad (5)$$

が成り立つ。これらの式から

$$\phi = se^{-s\tau} \quad (6)$$

となる。これから、表面更新があるときの希ガスの放出速度 q_s は

$$q_s = \int_0^\infty q(\tau)\phi(\tau)d\tau = -C_0\sqrt{Ds} \quad (7)$$

となり^{ix}、時間 t に依存しない値となる。

^{viii} $\phi(\tau)$ の次元は (時間)⁻¹

^{ix} $\int_0^\infty \frac{e^{-s\tau}}{\sqrt{\pi\tau}} d\tau = \frac{1}{\sqrt{s}}$ を使った。

サージタンク内の液相部分を円柱形として、その高さを L 、底面積を S とする。また、初期($t=0$)に液相部分に含まれている希ガスの量を n_0 とすると $C_0 = n_0/(LS)$ より、液相の表面全体から単位時間内に放出されるガスの量 Q は

$$Q = Sq_s = S \frac{n_0}{LS} \sqrt{Ds} = n_0 \frac{\sqrt{Ds}}{L} \quad (8)$$

となって、 $\beta \equiv \sqrt{Ds}/L$ を比例定数として希ガス量 n_0 に比例する。

D 及び s の値については

$$D = 3.4 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$s = 0.01 \text{ s}^{-1}$$

$$L = 1 \text{ m}$$

とした。 D の値については、下記に示す Wilke-Chang の経験式⁸⁾から求めた。^x

$$D_{AB} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{\sqrt{\Psi_B M_B T}}{\mu V_A^{0.6}} \quad (9)$$

ここで、

D_{AB} : 溶媒 B 中での溶質分子 A の無限希釈点での拡散定数 [cm^2/s]

V_A : 標準沸点における溶質分子のモル容積^{xi} [$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$]

μ : 溶液の粘度 [cP]

M_B : 溶媒分子の分子量

Ψ_B : 溶媒の会合定数^{xii}

T : 絶対温度 [K]

であり、値として、 $V_A=35$ [$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$]、 $\mu=1.3$ [cP]、 $M_B=201$ 、 $\Psi_B=1$ 、 $T=353$ [K] を式に代入して求めた。また s については、全水銀体積 1.4 m^3 及び循環流量 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ から、

$$\frac{1.4 \text{ m}^3}{50 \text{ m}^3/\text{h}^{-1} \times 1/3600 \text{ hs}^{-1}} \approx 101 \text{ s}$$

より約 100 s で全水銀が循環系を一周するので、接触面については少なくとも 100 秒に 1 回は更新されるとした。 L については実機のおおよその値である。これらを式に代入して計算すると $\beta = 5.8 \times 10^{-6} \text{ 1/s}$ となる。 β は放射性崩壊による崩壊定数と数学的に相似な定数であるので、拡散によって液相中の希ガス原子が減少する半減期 $T_{1/2}^\beta$ を $T_{1/2}^\beta = \ln 2/\beta$ と定義すると、その時間は $T_{1/2}^\beta \sim 30$ 時間となる。(以下、 β を「ガス放出減少率」、 $T_{1/2}^\beta$ を「ガス放出半減期」と呼ぶ。) ガス放出半減期を考慮すると、半減期の長い希ガス核種の放射能の蓄積は抑制されると考えられる。

^x 付録 A2 において、これより簡単な評価方法で D の値を算出し、オーダー的に一致することを示す。

^{xi} V_A については、例えば Kr の場合、標準沸点での密度 2.418 g/cm^3 及び原子量 83.80 mol^{-1} より、 $83.80/2.418=34.7$ [$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$] と求めた。また、Ar については 28.6 、Xe については 44.5 となるが、ここでは簡単のため平均的な値の 35 [$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$] を使うこととした。

^{xii} 会合とは、同一分子間に水素結合などの比較的弱い結合力が働き、2 分子またはそれ以上の分子が結合して、比較的規則性のよい集合体を形成することをいう。 Ψ_B の値については、溶媒が水の場合は 2.6 、メタノールの場合は 1.9 、その他の非会合性の溶媒の場合は 1 を使うことが推称されている。

以下でこのことを数学的に示す。

ガス放出量を考慮した場合、ある放射性希ガス核種 i の液相中に残存する原子核 N_i は、

$$\frac{dN_i}{dt} = R_i - (\lambda_i + \beta_i)N_i \quad (10)$$

から求められる。ここで、

$N_i(t)$: 時間 t で液相中の残存する核種 i の原子核数

R_i : 単位時間あたりの核種 i の生成数

λ_i : 核種 i の崩壊定数

β_i : 核種 i のガス放出減少率

である。これを、初期条件 $N_i(t)=0$ で解くと

$$N_i(t) = \frac{1}{\lambda_i + \beta_i} R_i (1 - e^{-(\lambda_i + \beta_i)t}) \quad (11)$$

となる。液相に残存する核種 i の放射能は

$$A_i = \lambda_i N_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \beta_i} R_i (1 - e^{-(\lambda_i + \beta_i)t}) \quad (12)$$

となる。この式を使って、想定漏洩量 0.5 m^3 の水銀中に含まれる希ガスの放射能 (1 MW、5000 時間運転後) を計算した。計算結果を表 5 に示す。表には、全放射能 (つまり、液相と気相にある全放射能) に対する液相中の放射能の割合を (残存率) の値も示した。希ガスのなかでも半減期の長いもの (例えば ^{127}Xe 等) は、残存率が低い。逆に半減期がガス放出半減期と比べて短い核種については、残存率が高いことがわかる。

3.2.4 トリチウム

水銀中で発生したトリチウムも、希ガスと同様サージタンク内のカバーガスに放出される。水銀内のトリチウム (すなわち水素^{xiii}) の拡定数は、付録 A2 に示すようにオーダーとしては希ガスと変わらないと考えられる。よって、ガス放出半減期も数十時間程度のオーダーと考えられる。それに比べて、トリチウムの半減期は 12.33 年なので、循環水銀内に残存するトリチウムの放射能は少ないと考えられる。以下、このことを数値的に示す。

トリチウムの崩壊定数は $\lambda=1.78 \times 10^{-9} / \text{s}$ であり、ガス放出定数 $\beta \sim 10^{-6} / \text{s}$ と比べると、オーダーで 3 桁小さい。よって、ガス放出を考慮した放射能生成の式は

$$A = \frac{\lambda}{\lambda + \beta} R (1 - e^{-(\lambda + \beta)t}) \cong \frac{\lambda}{\beta} R (1 - e^{-\beta t}) \quad (13)$$

と近似される。この式を見ると、トリチウムの放射能の飽和値はガス放出を考慮しない場合と比べて $\lambda/\beta \sim 1/1000$ より約 $1/1000$ になる。同時にガス放出半減期程度のオーダーの時間、つまり数日で飽和値に達することがわかる。

^{xiii} この評価では、トリチウムはすべて水素分子 (HT) として存在すると考える。

希ガスの場合と同様に、漏洩した水銀に含まれるトリチウム放射能の全量が気中に移行すると仮定すると、排気筒からのトリチウム放出量は

$$9.2 \times 10^{13} \text{ Bq} \times 1/1000 \times 0.5 \text{ m}^3 / 1.4 \text{ m}^3 = 3.3 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

となる。上の式で、 $9.2 \times 10^{13} \text{ Bq}$ はトリチウム全生成量（表 1 より）、 $1/1000$ はガス放出を考慮した減少率、 0.5 m^3 は漏洩水銀量、 1.4 m^3 は水銀の総量である。

3.2.5 その他の核破砕生成物

その他の核破砕生成物については、水銀中で化合物をつくるかアマルガム化するかまたは単体で存在していると考えられるが、いずれにしても融点は水銀の沸点と比べても低く、そのため水銀の最高温度である 80°C ではそれらの蒸気圧はきわめて小さい。（例えば、比較的蒸気圧の高い Eu についても、その値は水銀と比べると 13 桁以上低い。）よって、これらの物質の蒸発量は無視できると考えた。⁹⁻¹¹⁾

3.3 実効線量の評価

3.3.1 実効線量の評価方法

放射性物質の放出による外部被ばく及び内部被ばくの評価方法について述べる。

(a) 外部被ばくによる実効線量

放射性物質からのガンマ線による実効線量は、次式により計算する。

$$H_\gamma = K_2 \cdot \sum Q_\gamma^i \cdot (D/Q_\gamma) \quad (14)$$

ここで、

H_γ : ガンマ線による全身被ばく線量 [μSv]

K_2 : 空気吸収線量から実効線量への換算係数 (= $1.0 \mu\text{Sv}/\mu\text{Gy}$)¹²⁾

Q_γ^i : 核種 i のガンマ線換算放出量 [$\text{Bq} \cdot \text{MeV}$]
[放出された放射能 (Bq) \times ガンマ線実効エネルギー (MeV)]

D/Q_γ : 相対線量 [$\mu\text{Gy}/(\text{Bq} \cdot \text{MeV})$]

である。ガンマ線換算放出量 Q_γ^i については、以下の式で計算した。

$$Q_\gamma^i = \sum A^i E_{eff}^i \quad (15)$$

A^i : 核種 i の放出量 [Bq]

E_{eff}^i : 核種 i のガンマ線実効エネルギー [MeV]

ガンマ線実効エネルギー E_{eff}^i については、核種の崩壊データから以下の式を使って求めた。

$$E_{eff}^i = \sum_j E_j^i f_j^i \quad (16)$$

E_j^i : 核種 i の j 番目のガンマ線エネルギー [MeV]

f_j^i : 核種 i の j 番目のガンマ線放出率

である。表 6 に核種ごとのガンマ線実効エネルギーを示す。なお、相対線量 D/Q_γ 値の評価に

については後述する。

(b) 内部被ばくによる実効線量

放射性物質の呼吸摂取による実効線量は、以下の式から求めた。

$$H_I = \sum K_I^i \cdot M \cdot Q^i \cdot (\chi/Q) \quad (17)$$

H_I :	呼吸による実効線量[mSv]
K_I^i :	核種 i の呼吸摂取による実効線量係数[mSv/Bq]
M :	成人呼吸率(=1.2 m ³ /h)
Q^i :	核種 i の大気放出量(Bq)
χ/Q :	相対濃度(h/m ³)

表 7 に核種ごとの実効線量係数を示す。相対濃度 χ/Q については後述する。

3.3.2 大気拡散の評価

相対濃度及び相対線量の評価は、「発電用原子炉の安全解析に関する気象指針」¹³⁾の「VI. 想定事故時の大気拡散の解析方法」に従い、観測した気象データを基に出現頻度からみてそれより悪い条件にめったに遭遇しないといえる大気拡散条件（気象条件）を推定することにより行った。以下に、具体的な評価法、評価条件及び評価結果などについて述べる。

(a) 評価法

被ばく量の計算に用いる相対濃度(χ/Q)は、「指針」に従い次のようにして求めた。

- ① 相対濃度は、毎時刻の気象資料と実効的な放出継続時間^{xiv}をもとに方位別の着目地点について求める。
- ② 着目地点の相対濃度は、毎時刻の相対濃度を5年間について小さい方から累積した場合、その累積出現頻度が97%に当たる相対濃度とする。
- ③ 線量計算に用いる相対濃度は、上記②で求めた相対濃度のうち陸側方位で最大の値を使用する。

また、相対線量(D/Q_T)についても上記と同様の方法で求めた。

(b) 評価条件

1) 排気筒からの放出条件

物質・生命実験施設の排気筒については、地上から40m程度の高さがありかつ吹き上げ

^{xiv} 放出継続時間が長い場合は、その間に風向が評価地点の方位以外を向く確率が高くなるため、一般的には相対濃度（及び相対線量）は小さくなる傾向がある。そのため、放射性物質の放出量が時間によって大きく違う場合は、その時間的変化を考慮して実効放出継続時間Tを適切に定める必要がある。例えば、事故直後に多量の放射能が放出し、その後少量の放出が長時間続くような想定の場合は、相対濃度を実際の放出時間で評価すると過小になる可能性がある。そのような場合はTの値として、放射性物質の全放出量を1時間当たりの最大放出量で割った値などを用いる。

高さ^{xv}を考慮すると、建家の地上面からの有効高さは50 m程度と推測できる。しかしながら、本実験施設の排気筒は建家本体に付随しているため、排気筒から放出されるブルームが建家の風下方向に巻き込まれる可能性がある。

そこで今回は、

①排気筒放出（有効高さ：18 m）

②地上放出（有効高さ：0 m、建家の投影面積：1640 m²）

のそれぞれの条件での値を比較して、より保守側の条件を採用することとした。ここで、①の有効高さについては下記のように求めた。

$$\begin{aligned} \text{有効高さ} &= \text{排気筒の高さ} + \text{スタック設置面標高} + \text{吹上げ高さ} - \text{評価地点標高} \\ &= 40 \text{ m} + 6.2 \text{ m} + 10 \text{ m} - 38 \text{ m} \sim 18 \text{ m} \end{aligned}$$

評価地点の標高は、周辺の敷地境界外で最も高い場所の標高とした。また、②の投影面積については、凸型をした建家の南側または北側の壁面の面積である。それぞれの放出条件での排気筒からの距離に対する相対濃度及び相対線量の計算値を図4-1及び図4-2に示す。（これらの具体的な計算式については、(c)に記述する。）両者の比較から全般的に②地上放出条件での相対濃度が高く、よってこの条件②（地上放出）を採用することとした。

2) 評価地点

評価地点は事業所境界とする^{xvi}。また、保守側に評価するため評価地点の標高は考慮せず、放出源の有効高さは常に0mとする。

3) 気象データ

気象データとしては、旧東海研究所内の気象観測設備で測定された1999年から2003年までの5年間データを用いた。風向及び風速は、地上10m、20m及び40m（標高はそれぞれ32m、42m及び62m）で測定されている。物質・生命実験施設建家の地上標高は6.2mなので、地上10mの観測データを用いた。図5に物質・生命科学実験施設周辺図、図6に1999年から2003年までの気象データに基づいた風向出現頻度を示す。

(c) 相対濃度(χ/Q)の評価

評価地点における相対濃度(χ/Q)は次式から求めた。

$$\chi/Q = \frac{1}{\pi \cdot 3600 \cdot \Sigma_y \Sigma_z U} \exp\left(-\frac{y^2}{2\Sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{H^2}{2\Sigma_z^2}\right) \quad (18)$$

^{xv} 吹上げ高さ ΔH (m)については、吹出し速度 $W=4.5\text{m/s}$ 、風速 $U=2.6\text{m/s}$ 、排気筒出口直径 $D=2\text{m}$ として、次の式で計算した。 $\Delta H = 3(W/U)D$

^{xvi} 放出源の有効高さ及び大気安定度の種類によっては着目地点以遠に χ/Q の最大値があらわれることがあるが、地上放出の場合は評価点までの風下距離に関する単純な減少関数となる。（図4-1参照）

- χ/Q : 評価地点の相対濃度(h/m^3)
 Σ_y, Σ_z : 建家の影響を考慮した y 及び z 方向の広がりパラメータ(m)
 H : 放出源の有効高さ(m)

座標軸については、排気筒の地上に対する設置面を原点とし、風向き方向を x 軸、地面に対して水平方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とする。地上放出のため $H=0$ とした。従って、評価点の座標は $(x, y, 0)$ となる。また、 Σ_y, Σ_z は以下の式から求めた。

$$\begin{aligned}\Sigma_y &= \sqrt{\sigma_y^2 + cA/\pi} \\ \Sigma_z &= \sqrt{\sigma_z^2 + cA/\pi}\end{aligned}\tag{19}$$

- σ_y, σ_z : 濃度分布の y 及び z 方向の広がりパラメータ(m)
 A : 建物等の風向方向の投影面積(m^2)
 c : 形状係数

なお σ_y, σ_z は、大気安定度毎に以下の式より算出した。

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 0.67775 \cdot \theta_0 x \cdot (5 - \log x) \\ \sigma_z &= \sigma_0 x^{a_0 + a_1 \log x + a_2 (\log x)^2}\end{aligned}\tag{20}$$

ここで、 $x[\text{km}]$ は風下距離である。また $\sigma_0, \theta_0, a_1, a_2$ 及び a_3 は、大気安定度によって決まる定数である。その値を表 8-1 に示す。ただし、 σ_z が 1000 m を越える場合はすべて 1000 m とした。また、大気安定度の区分を表 8-2 に示す。図 7 に σ_y 及び σ_z の値を各大気安定度について x の関数として示す。

建家投影面積 A については、保守的に評価するために風向によらず 1640m^2 (建家の南及び北側壁面の面積) とした。 c については $1/2$ とした^{xvii}。

これらの式を使って、気象データから各時間における各方向の評価地点での相対濃度をもとめた。このとき、静穏時 (風速が 0 m の時) には、「指針」に従って便宜上風速を 0.5 m/s として計算した^{xviii}。またこのときの風向については、風向の持続性を考慮して静穏出現前の風向とした。

各方角での相対濃度の出現頻度分布を図 8-1 に、また方位別の 97% 値を表 9 にまとめる。被ばく評価に用いる相対濃度 (χ/Q) 値として最も大きい $2.8 \times 10^{-7} \text{h}/\text{m}^3$ を使う。

^{xvii} 参考文献 13 の「解説」、「V. 平常時の大気拡散の解析方法」、「1. 空間濃度分布の計算」を参照

^{xviii} 参考文献 13 にはその理由として次の二つが挙げられている：(1) 感度のよい微風向・微風速計では静穏時でも 0.5 m/s 以上の風速を示している場合が多い、(2) 静穏時における放射線雲からのガンマ線被ばくも極端に高い実測値がえられていないことから、静穏時においても大気による拡散希釈は行われているものと考えられる。

(d) 相対線量(D/Q_γ)の評価

放射性雲による地表付近のγ線量率の評価には、次式から求めた相対線量(D/Q_γ)を使った。
(相対濃度の評価と同様の座標軸を設定し、評価点の座標を(x, y, 0)とする。)

$$D/Q_{\gamma} = K_1 \mu_a \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} B(\mu r) \chi/Q(x', y', z') dx' dy' dz' \quad (21)$$

D/Q_γ: 評価地点における相対線量(μGy・MeV⁻¹・Bq⁻¹)

K₁: 空気吸収線量率への換算係数 $\left(\frac{\text{m}^3 \cdot \mu\text{Gy}}{\text{MeV} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h}} \right)$

μ_a: 空気に対するガンマ線の真吸収係数(m⁻¹)

μ: 空気に対するガンマ線の全吸収係数(m⁻¹)

r: 放射線雲中の点(x', y', z')から評価地点(x, y, 0)までの距離(m)

$$r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$$

B(μr): 空気に対するガンマ線のビルドアップ係数

χ/Q(x', y', z'): 放射線雲中の点(x', y', z')における相対濃度(h/m³)

値の評価は数値積分によって行った。K₁については、次式のように計算した値を用いた^{xix}。

$$K_1 = 1.602 \times 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{MeV}} \times \frac{1}{1.293} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \times 3.6 \times 10^3 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 4.46 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3 \mu\text{Gy}}{\text{MeV} \cdot \text{Bq} \cdot \text{h}} \quad (22)$$

B(μr)については次式から求めた。¹⁴⁾

$$B(\mu r) = 1 + \alpha(\mu r) + \beta(\mu r)^2 + \gamma(\mu r)^3 \quad (23)$$

ただし、μ_a、μ、α、β、γについては、0.5 MeV のガンマ線に対する値を用い、以下のとおりとした。

$$\mu_a = 3.84 \times 10^{-3} (\text{m}^{-1}), \quad \mu = 1.05 \times 10^{-2} (\text{m}^{-1})$$

$$\alpha = 1.00, \quad \beta = 0.4492, \quad \gamma = 0.0038$$

また、χ/Q(x', y', z')については、次式からもとめた。

$$\chi/Q(x', y', z') = \frac{1}{2\pi \cdot 3600 \cdot \Sigma_x \cdot \Sigma_y \cdot U} \exp\left(-\frac{y^2}{2\Sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z'-H)^2}{2\Sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z'+H)^2}{2\Sigma_z^2}\right) \right\} \quad (24)$$

ここでΣ_x及びΣ_yについては(19)式と同様である。また、地上放出を仮定するためHの値は常に0である。(従って、この式は(18)式と全く同じになる。)

これらの式を使って、気象データから各時間における各方向の評価地点での相対線量をもと

^{xix} この換算係数には以下の換算要素が含まれている：エネルギー単位(MeV→J)、空気体積の質量換算(空気の密度:ρ=1.293×10⁻³g/cm³)、時間単位の換算(h→s)。

めた。このとき、静穏時の扱いについては相対濃度の評価と同様に行った。各方角での相対線量の出現頻度分布を図 8-2 に、また方位別の 97%値を表 9 にまとめる。被ばく評価に用いる相対線量(D/Q₇)値として最も大きいである $8.0 \times 10^{-12} \mu\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$ を使う。

3.3.3 結果

以上の考察から、「水銀漏洩事象」時の公衆の被ばく線量を求めた。評価結果は、

・外部被ばく：	希ガス	→	33 μSv
	水銀	→	$1.3 \times 10^{-4} \mu\text{Sv}$
・内部被ばく：	トリチウム	→	$2.0 \times 10^{-5} \mu\text{Sv}$
	水銀	→	0.10 μSv

となる。核種ごとの内訳については表 10 に示す。これらの値を合計しても被ばく量は 30 μSv である。この値は、1 年間に自然界からうける被ばく量とくらべて 2 桁小さい値である。

4. まとめ

物質・生命科学実験施設において、水銀循環系からの水銀漏洩事象を想定し、それによる事業所境界での被ばく線量評価を行った。評価では、漏洩した水銀から放射性希ガス、トリチウム及び水銀蒸気が気中に移行し、排気系を通じて排気筒から外部へ放出されると考え、それらの外部放出量を算出した。さらに、5年間の気象データを使って、排気筒から放出される放射性物質の拡散に関する解析を行い、事業所境界における被ばく量を評価した。評価結果から以下のことがわかった。

- 本事象に伴う事業所境界の被ばく量は約 30 μSv である。
- それらの大部分は、放射性希ガス（主にキセノン）による外部被ばくである。

この値は一般公衆が1年間に自然界から受ける被ばく量と比べても十分小さい値である。このことから、本施設は放射能漏洩に対して十分な安全上の裕度をもつことが示された。

謝辞

核融合中性子工学研究グループの今野 カリーダーには、本評価の遂行に際して有益な助言を頂きました。また、旧日本原子力研究所環境放射線管理課（当時）から気象データを提供していただきました。

参考文献

- (1) Japan Proton Accelerator Research Complex: <http://j-parc.jp>
- (2) 物質・生命科学実験施設建設チーム：“大強度陽子加速器プロジェクト、物質・生命科学実験施設機器技術設計書”，JAERI-Tech 2004-001, J-PARC 04-03 (2004).
- (3) K. Niita, et al.: "High Energy Particle Transport Code NMTC/JAM", JAERI-Data/Code 2001-007 (2001).
- (4) J. F. Briesmeister, (Ed.): "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C", LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory (2000).
- (5) 甲斐哲也、他：“DCHAIN-SP 2001：高エネルギー粒子誘導放射能計算コード”、JAERI-Data/Code 2001-016、(2001).
- (6) T. Kai, M. Harada, F. Maekawa, M. Teshigawara, C. Konno, Y. Ikeda: "Induced-Radioactivity in J-PARC Spallation Neutron Source ", J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 4, 172 (2004)
- (7) 平岡正勝、田中幹也：“新版 移動現象論”、朝倉書店、(2002).
- (8) R. B. Bird, et al.: "Transport Phenomena", Second Edition, John Wiley & Sons, (2002).
- (9) 小林薫、他：“水銀ターゲットシステムにおけるソースタームの予備的評価”、JAERI-Tech 2000-050、(2000).
- (10) 小林薫、他：“無機水銀化合物の物理及び熱化学物性値集”、JAERI-Tech 2000-037、(2000).
- (11) 小林薫、他：“水銀ターゲットにおける核破砕生成物の熱化学的挙動の推定”、JAERI-Tech 2002-005、(2002).
- (12) 原子力安全委員会：“発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針、付録Ⅱ、2『重大事故』及び『仮想事故』における線量評価”、平成2年8月30日 原子力安全委員会決定.
- (13) 原子力安全委員会：“発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針”、昭和57年1月28日 原子力安全委員会決定、一部改定 平成元年3月27日 原子力安全委員会、一部改訂 平成6年4月21日 原子力安全委員会.

- (14) 原子力安全委員会：“発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針”、昭和51年9月28日 原子力安全委員会決定、一部改定 平成元年3月27日 原子力安全委員会.

表 1 1 MW、5000 時間運転で水銀中に生成されるトリチウム、希ガス、ハロゲン及び水銀核種の放射能^{a)}

トリチウム、希ガス			ハロゲン			水銀		
核種	半減期	放射能 [Bq]	核種	半減期	放射能 [Bq]	核種	半減期	放射能 [Bq]
T	12.33y	9.2E+13	Br76	16.2h	2.4E+12	Hg195	9.9h	4.5E+14
Ar41	1.822h	2.4E+11	Br77	2.38d	4.4E+12	Hg195m	23.8h	2.7E+14
Ar43	5.37m	6.0E+10	Br77m	4.28m	2.6E+12	Hg197	2.67d	2.3E+15
Ar44	11.87m	4.5E+10	Br78	6.46m	3.6E+12	Hg197m	23.8h	9.5E+14
Kr79	1.46d	3.8E+12	Br80	17.68m	2.9E+12	Hg199m	42.6m	4.9E+15
Kr85m	4.480h	7.9E+11	Br80m	4.4205h	1.4E+12	Hg203	46.612d	2.4E+15
Kr87	1.27h	2.8E+11	Br82	1.47d	1.3E+12			
Kr88	2.84h	1.6E+11	Br82m	6.13m	6.5E+12			
Xe120	40m	1.4E+12	Br83	2.40h	1.2E+12			
Xe121	40.1m	3.1E+12	Br84	31.8m	2.9E+11			
Xe122	20.1h	6.7E+12	Br84m	6.0m	2.1E+11			
Xe123	2.08h	8.6E+12	Br85	2.90m	3.1E+11			
Xe125	16.9h	1.4E+13	I 117	2.22m	1.7E+12			
Xe127	36.4d	1.4E+13	I 118g	13.7m	1.6E+12			
			I 118m	8.5m	1.5E+12			
			I 119	19.1m	7.1E+12			
			I 120g	1.35h	5.5E+12			
			I 120m	53m	4.1E+12			
			I 121	2.12h	1.3E+13			
			I 122	3.63m	1.4E+13			
			I 123	13.27h	1.5E+13			
			I 124	4.1760d	3.2E+12			
			I 125	59.408d	1.6E+13			
			I 126	13.11d	1.1E+12			

^{a)} NMTC/JAM, MCNP-4C 及び DCHAIN-SP による計算値。

表 2 排気筒から放出される水銀核種の放射能

核種	半減期	排気筒から放出される放射能[Bq] ^{a)}
Hg195	9.9h	3.8E+06
Hg195m	23.8h	2.3E+06
Hg197	2.67d	2.0E+07
Hg197m	23.8h	8.0E+06
Hg199m	42.6m	4.1E+07
Hg203	46.612d	2.1E+07

^{a)} 排気筒から放出される核種 i の放射能 A_i [Bq] は、 A_i^0 を循環水銀中の全放射能として $A_i = A_i^0 / (1.4 \times 10^6 \text{ cm}^3 \times 13.4 \text{ g/cm}^3) \times 0.16 \text{ g}$ から算出した。ここで、 $1.4 \times 10^6 \text{ cm}^3$ は循環水銀の全体積、 13.4 g/cm^3 は水銀の密度、 0.16 g は漏洩発生時に排気筒から放出される水銀の量である。

表 3-1 ヨウ素の水銀に対する主な化学反応

反応式 ^{a)}	標準反応ギブス自由エネルギー $\Delta_r G^0$ [kJ·mol ⁻¹] ^{b)}	平衡定数 ^{c)} $K=\exp\{-\Delta_r G^0/(RT)\}$
Hg + 2I → HgI ₂	-242	7×10^{35}
Hg + I ₂ → HgI ₂	-101	1×10^{15}
2Hg + 2I → Hg ₂ I ₂	-252	2×10^{37}
2Hg + I ₂ → Hg ₂ I ₂	-111	3×10^{16}
2I → I ₂	-141	7×10^{20}

a) Hg は液体、I は気体、I₂、HgI₂ 及び Hg₂I₂ は結晶状態とした。

b) $\Delta_r G^0$ の計算に必要な標準生成ギブス自由エネルギーは「化学便覧、基礎編Ⅱ」（日本化学会編、丸善）を参照。

c) 反応系の温度 T を 80℃ とした。また、気体定数 $R=8.31 \times 10^{-3}$ kJ·K⁻¹·mol⁻¹。

表 3-2 ヨウ素及びヨウ化水銀の化学的性質^{a)}

名称	化学式	融点	沸点	備考
ヨウ素	I ₂	133.5℃	184.4℃	分子性結晶をつくる
ヨウ化水銀(I)	Hg ₂ I ₂	290℃	357℃	正方晶系結晶、黄色
ヨウ化水銀(II)	HgI ₂	253℃	349℃	正方晶系結晶、126℃以下で安定な赤色型、それ以上で安定な黄色型及び橙色型

a) 「理化学事典、第4版」（久保亮五他編、岩波書店）参照

表 4-1 ヨウ素の水銀に対する主な化学反応

反応式 ^{a)}	標準反応ギブス自由エネルギー $\Delta_r G^0$ [kJ·mol ⁻¹] ^{b)}	平衡定数 ^{c)} $K=\exp\{-\Delta_r G^0/(RT)\}$
Hg + 2Br → HgBr ₂	-318	1×10^{47}
Hg + Br ₂ → HgBr ₂	-156	1×10^{23}
2Hg + 2Br → Hg ₂ Br ₂	-346	2×10^{51}
2Hg + Br ₂ → Hg ₂ Br ₂	-181	6×10^{26}
2Br → Br ₂	-162	9×10^{23}

a) Hg は液体、Br 及び Br₂ は気体、HgBr₂ 及び Hg₂Br₂ は結晶状態とした。

b) $\Delta_r G^0$ の計算に必要な標準生成ギブス自由エネルギーは「化学便覧、基礎編Ⅱ」（日本化学会編）を参照した。

c) 反応系の温度 T を 80℃ とした。また、気体定数 $R=8.31 \times 10^{-3}$ kJ·K⁻¹·mol⁻¹。

表 4-2 臭素及び臭化水銀の化学的性質^{a)}

名称	化学式	融点	沸点	備考
臭素	Br ₂	-7.2℃	58.8℃	
臭化水銀(I)	Hg ₂ Br ₂	—	—	正方晶系結晶、白色、345℃で昇華
臭化水銀(II)	HgBr ₂	238℃	320℃	斜方晶系結晶、銀白色

a) 「理化学事典、第4版」（久保亮五他編、岩波書店）及び「化学大事典」（化学大事典編集委員会、共立出版）参照

表5 排気筒から放出される希ガスの放射能

核種	半減期	残存率 ^{a)}	排気筒からの放出量 [Bq] ^{b)}
Ar41	1.822h	0.959	8.1E+11
Ar43	5.37m	0.998	2.1E+10
Ar44	11.87m	0.995	1.6E+10
Kr79	1.46d	0.551	7.5E+11
Kr85m	4.480h	0.906	2.6E+11
Kr87	1.27h	0.971	9.8E+10
Kr88	2.84h	0.938	5.3E+10
Xe120	40m	0.985	4.9E+11
Xe121	40.1m	0.985	1.1E+12
Xe122	20.1h	0.681	1.6E+12
Xe123	2.08h	0.954	2.9E+12
Xe125	16.9h	0.718	3.7E+12
Xe127	36.4d	0.048	2.4E+11

- a) 1 MW で 5000 時間運転後の生成放射能が水銀中に残存する割合。核種 i の全生成放射能 A_i^{all} は近似的に $A_i^{all}=R_i\{1-\exp(-\lambda_i t)\}$ である。水銀中に残存する核種 i の放射能 A_i^{in} は本文中で示すように $A_i^{in}=\{\lambda_i/(\lambda_i+\beta_i)\}R_i[1-\exp\{-(\lambda_i+\beta_i)t\}]$ で表されるので、残存率 A_i^{in}/A_i^{all} は、

$$A_i^{in}/A_i^{all}=\{\lambda_i/(\lambda_i+\beta_i)\}[1-\exp\{-(\lambda_i+\beta_i)t\}]/\{1-\exp(-\lambda_i t)\}$$
 で計算できる。 $(R_i$ は運転時の核種 i の accumulative な生成率、 λ_i は核種 i の崩壊定数、 β_i は希ガスのカバーガスへの放出率)
- b) 全生成放射能 $\times 0.5 \text{ m}^3/1.4 \text{ m}^3 \times$ 残存率

表6 ガンマ線実効エネルギー

核種	半減期	ガンマ線実効エネルギー[MeV] ^{a)}
Ar41	1.822h	1.283
Ar43	5.37m	1.505
Ar44	11.87m	1.936
Kr79	1.46d	0.186
Kr85m	4.480h	0.157
Kr87	1.27h	0.791
Kr88	2.84h	1.954
Xe120	40m	0.405
Xe121	40.1m	0.974
Xe122	20.1h	0.068
Xe123	2.08h	0.410
Xe125	16.9h	0.269
Xe127	36.4d	0.279
Hg195	9.9h	0.200
Hg195m	23.8h	0.203
Hg197	2.67d	0.073
Hg197m	23.8h	0.096
Hg199m	42.6m	0.183
Hg203	46.612d	0.240

- a) 値の計算に必要な放出ガンマ線エネルギー及び放出率については以下を参照した。
 R.B. Firestone and L.P. Ekström: "WWW Table of Radioactive Isotopes", V.2.1, <http://ie.lbl.gov/toi>, (2004).

表7 トリチウム及び水銀核種の実効線量係数

核種	半減期	実効線量係数 ^{a)} [mSv/Bq]
T	12.33y	1.8E-12 ^{b)}
Hg195	9.9h	1.4E-06
Hg195m	23.8h	8.2E-06
Hg197	2.67d	4.4E-06
Hg197m	23.8h	5.8E-06
Hg199m	42.6m	1.8E-07
Hg203	46.612d	7.0E-06

a) 「放射線を放出する同位元素の数量を定める件」(平成12年10月23日科学技術庁告示第5号)より

b) HTに対する値

表8-1 定数 θ_0 、 σ_0 、 a_1 、 a_2 及び a_3 の大気安定度ごとの値

大気安定度	σ_y, θ_0	$\sigma_z, x \geq 0.2 \text{ km}$				$\sigma_z, x < 0.2 \text{ km}$ $a_1 = a_2 = 0$	
		σ_0	a_0	a_1	a_2	σ_0	a_0
A	50	768.1	3.9077	3.898	1.7330	165.0	1.07
B	40	122.0	0.49523	0.49523	0.12772	83.7	0.894
C	30	58.1	-0.001649	-0.001649	0.0	58.0	0.891
D	20	31.7	-0.095108	-0.095108	0.0	33.0	0.854
E	15	22.2	-0.12697	-0.12697	0.0	24.4	0.854
F	10	13.8	-0.1227	-0.1227	0.0	15.5	0.822

表8-2 大気安定度分類表

風速(U) m/s	日射量(T) kW/m ²				放射収支量(Q) kW/m ²		
	T \geq 0.60	0.60>T \geq 0.30	0.30>T \geq 0.15	0.15>T	Q \geq -0.020	-0.020>Q \geq -0.040	-0.040>Q
U<2	A	A-B	B	D	D	G	G
2 \leq U<3	A-B	B	C	D	D	E	F
3 \leq U<4	B	B-C	C	D	D	D	E
4 \leq U<6	C	C-D	D	D	D	D	D
6 \leq U	C	D	D	D	D	D	D

表 9 方位別の相対濃度及び相対線量の 97%値

実効放出継続時間：1 時間
 放出高：0 m (地上放出)
 建家投影面積：1640 m²
 気象データ：1999 年 1 月 1 日～2003 年 12 月 31 日

着目方位 ^{a)}	評価点までの 距離[m]	$\chi/Q[h/m^3]$ 97%値 ^{b)}	$D/Q_\gamma [\mu Sv \cdot Bq^{-1} \cdot MeV^{-1}]$ 97%値 ^{b)}
NNW	380	- ^{c)}	-
NW	340	2.7E-8	1.2E-12
WNW	330	2.1E-8	1.2E-12
W	400	1.1E-7	4.2E-12
WSW	350	2.0E-7	6.3E-12
SW	310	<u>2.8E-7</u>	<u>8.0E-12</u>
SSW	330	1.9E-7	5.9E-12
S	410	1.3E-7	8.7E-13

a) 風下方向の意味

b) 下線は被ばく評価に用いる値。

c) -は 97%値が 0 であることを示す。

表 10 水銀漏洩事故時の実効線量評価結果

外部被ばく

希ガス			水銀		
核種	半減期	実効線量[μSv]	核種	半減期	実効線量[μSv]
Ar41	1.822h	0.8	Hg195	9.9h	6.1E-06
Ar43	5.37m	0.3	Hg195m	23.8h	3.7E-06
Ar44	11.87m	0.2	Hg197	2.67d	1.1E-05
Kr79	1.46d	1.1	Hg197m	23.8h	6.2E-06
Kr85m	4.480h	0.3	Hg199m	42.6m	6.1E-06
Kr87	1.27h	0.6	Hg203	46.612d	4.0E-05
Kr88	2.84h	0.8			
Xe120	40m	1.6			
Xe121	40.1m	8.4			
Xe122	20.1h	0.9			
Xe123	2.08h	9.6			
Xe125	16.9h	7.9			
Xe127	36.4d	0.5			
希ガス合計		33	水銀合計		1.3E-04

内部被ばく

水銀			トリチウム		
核種	半減期	実効線量 [μSv]	核種	半減期	実効線量 [μSv]
Hg195	9.9h	1.8E-03	T	12.33y	2.0E-5
Hg195m	23.8h	6.2E-03			
Hg197	2.67d	2.9E-02			
Hg197m	23.8h	1.6E-02			
Hg199m	42.6m	2.5E-03			
Hg203	46.612d	4.9E-02			
		1.0E-01			

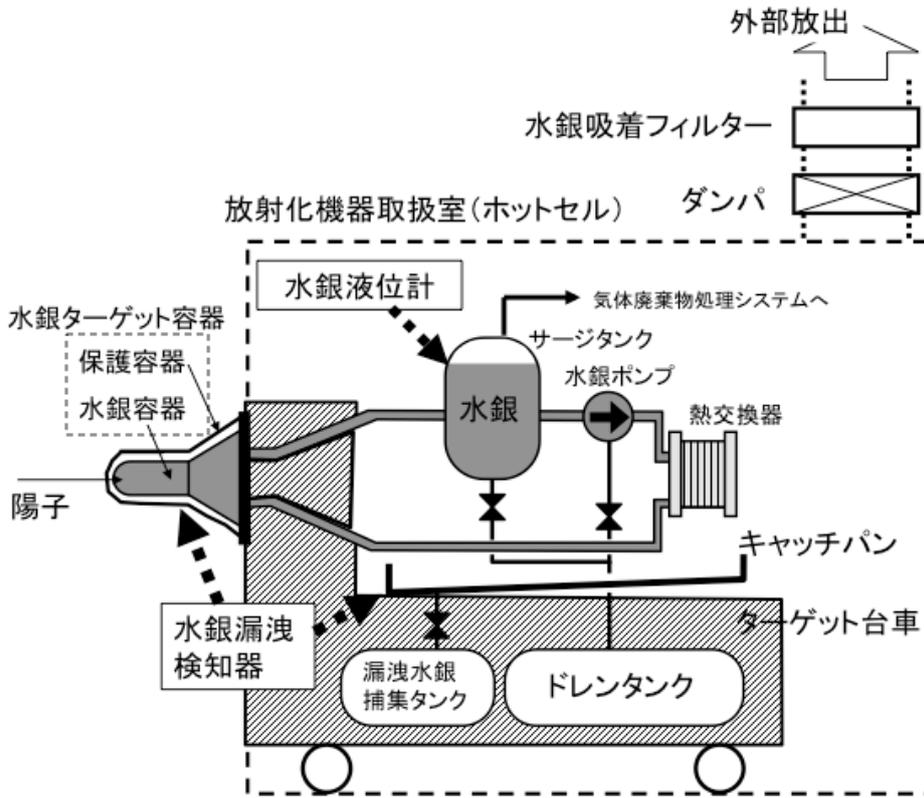


図1 水銀漏洩に関する安全システムの概念図

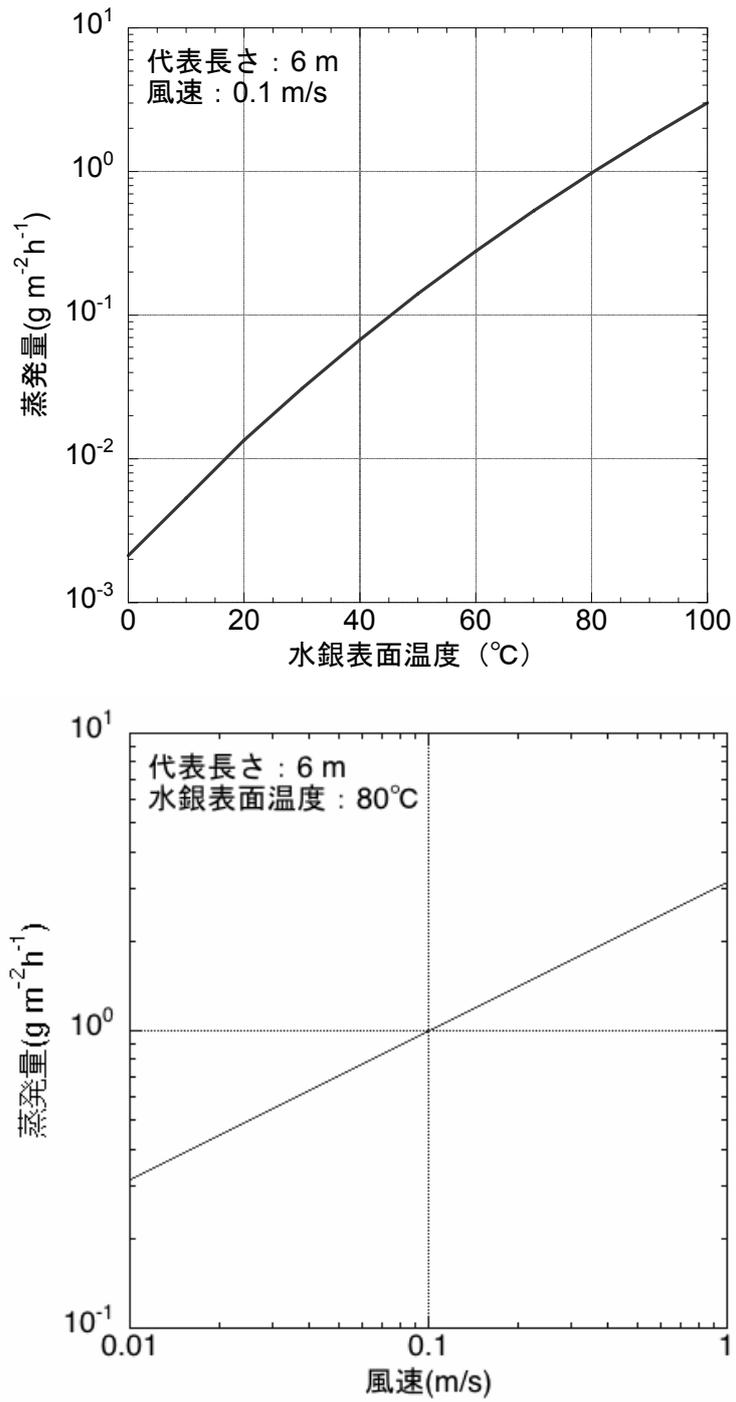


図2 水銀表面温度及び風速の変化に対する水銀蒸発量の変化

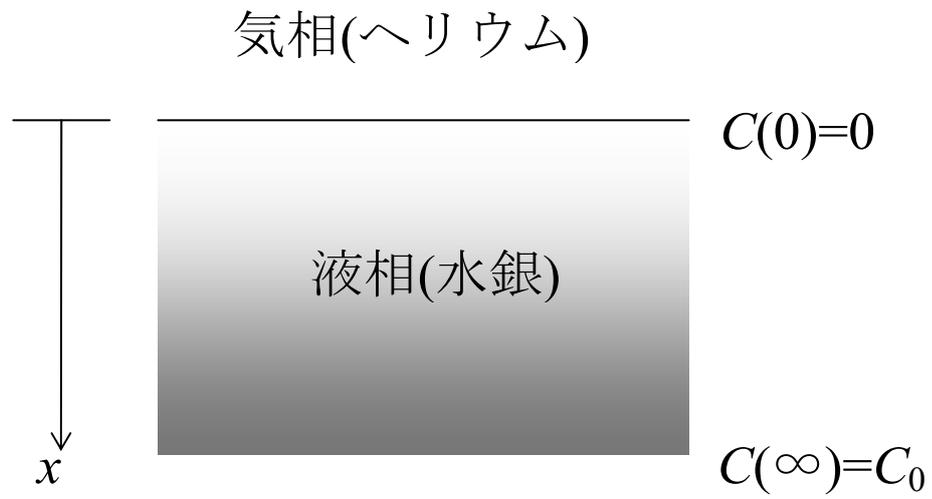


図3 水銀からの希ガス放出モデル

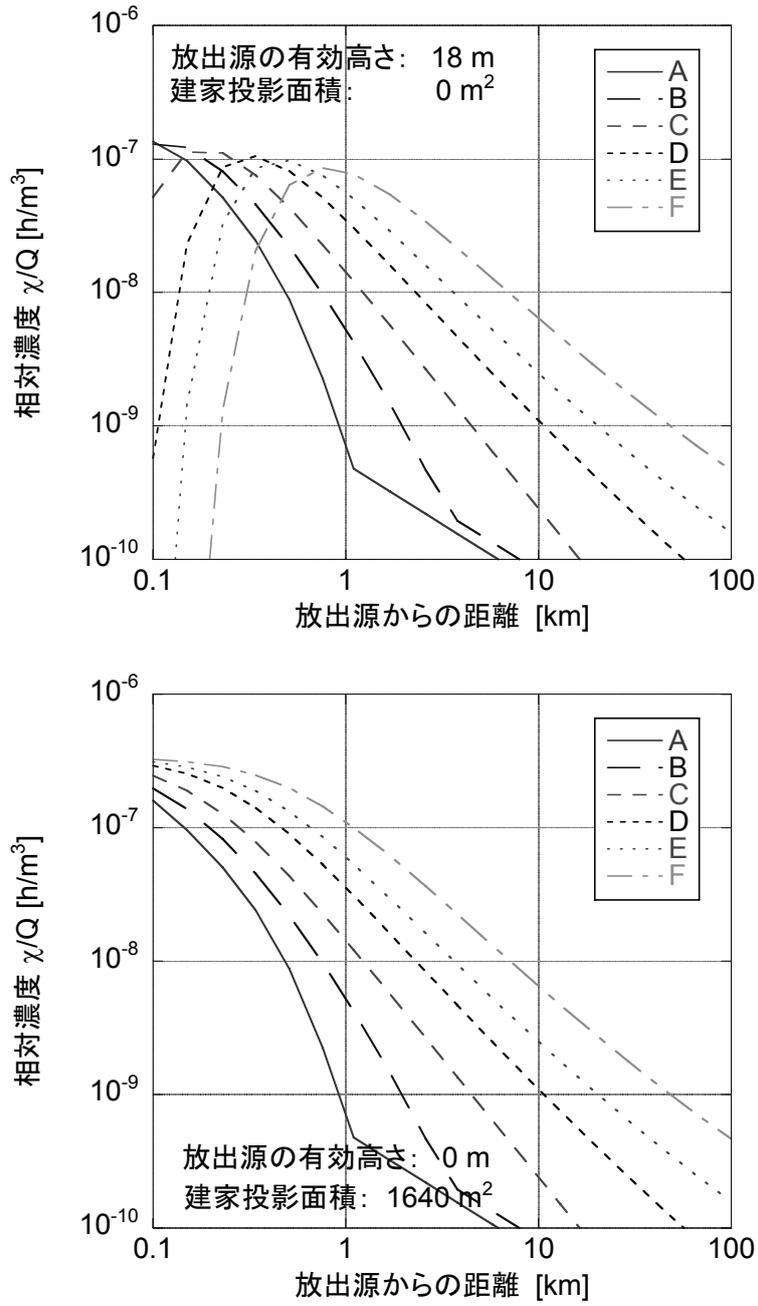


図 4-1 風速 1 m/s 時の①排気筒放出（有効高さ：18 m）と②地上放出（有効高さ：0m、建家の投影面積：1640m²）での風下方向の相対濃度分布

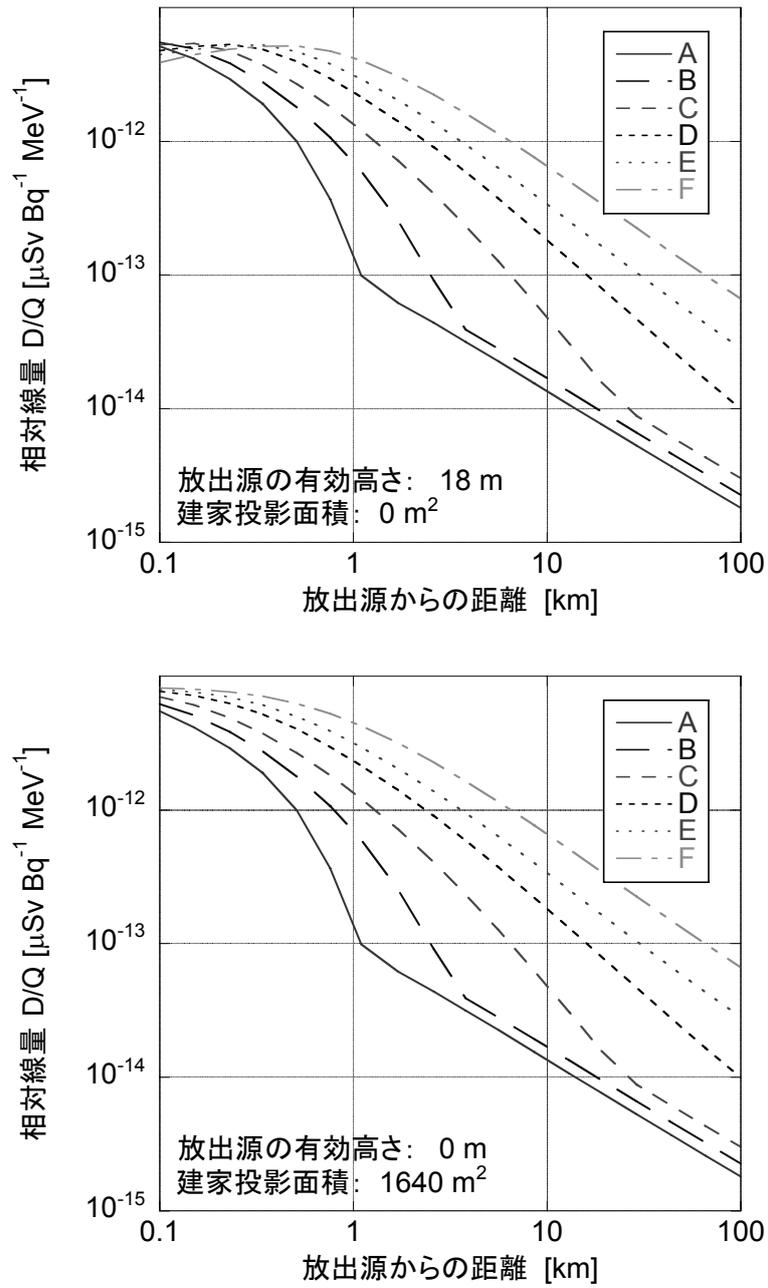


図 4-2 風速 1 m/s 時の①排気筒放出（有効高さ：18 m）と②地上放出（有効高さ：0m、建家の投影面積：1640m）での風下方向の相対線量分布

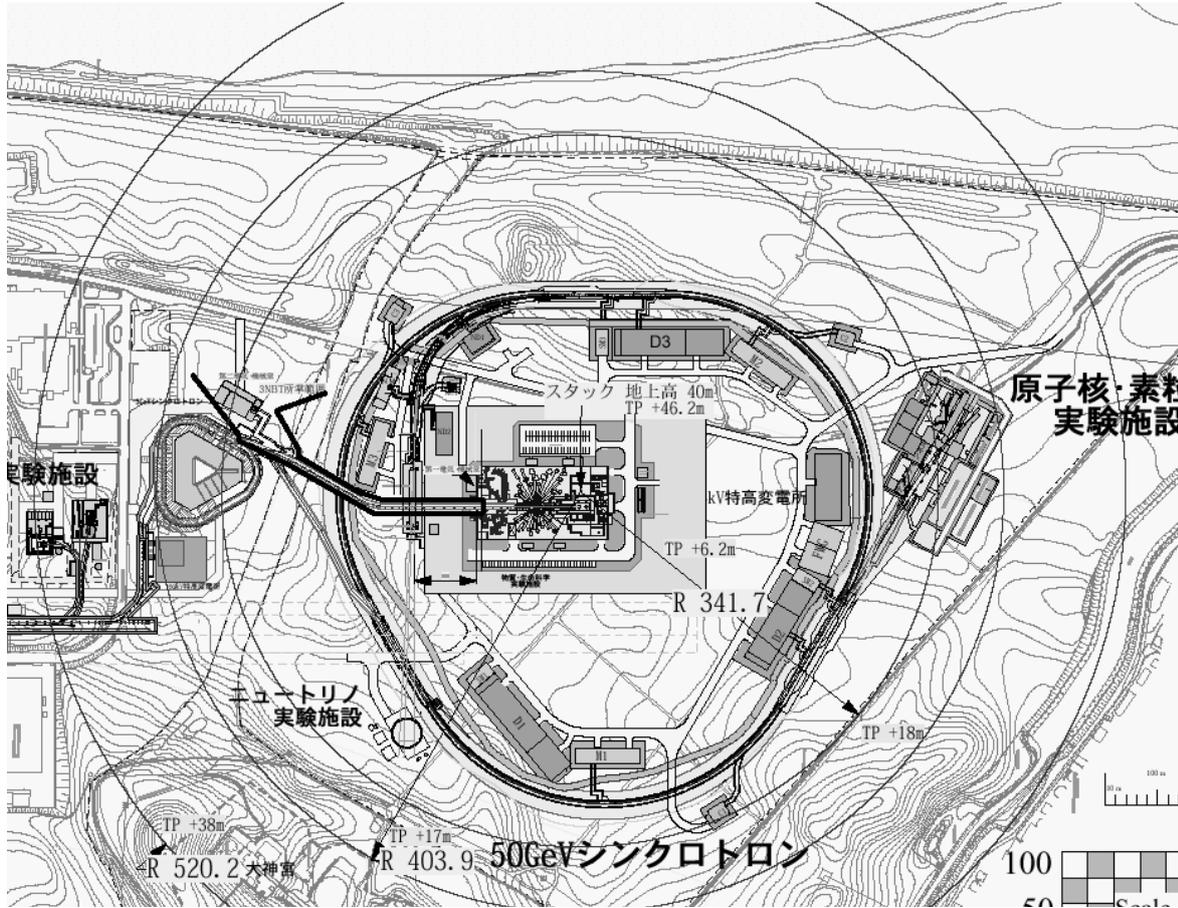


図5 物質・生命科学実験施設周辺図。図の上方向が東、左方向が北になる。

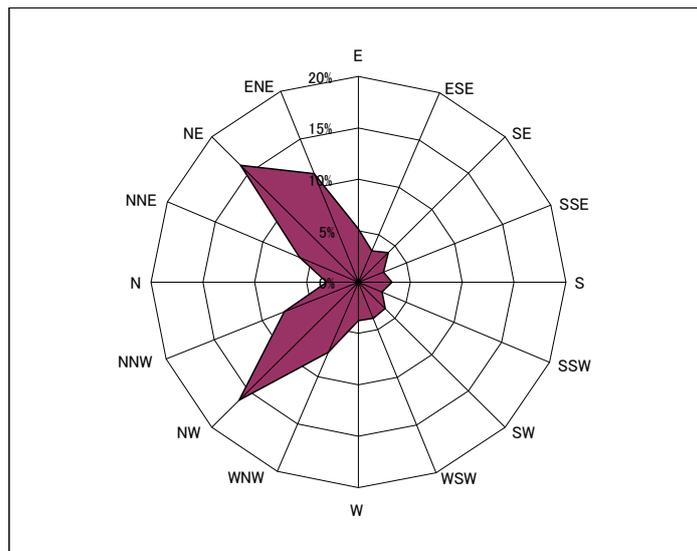


図6 1999年から2003年の気象データに基づいた風向出現頻度。旧原研東海研究所気象観測塔の高さ10mの気象観測データを集計した。図が示す方位は、周辺図(図5)と一致している。

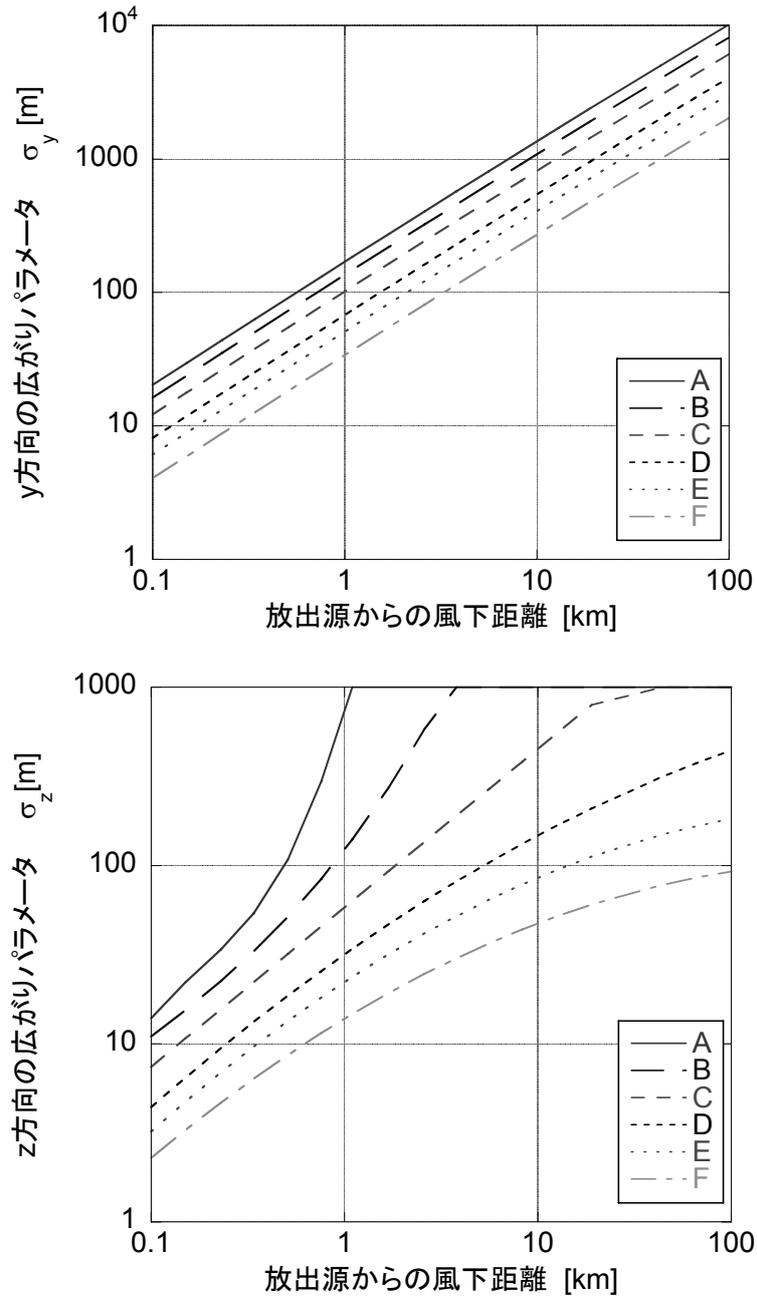


図7 y及びz方向の広がりパラメータ

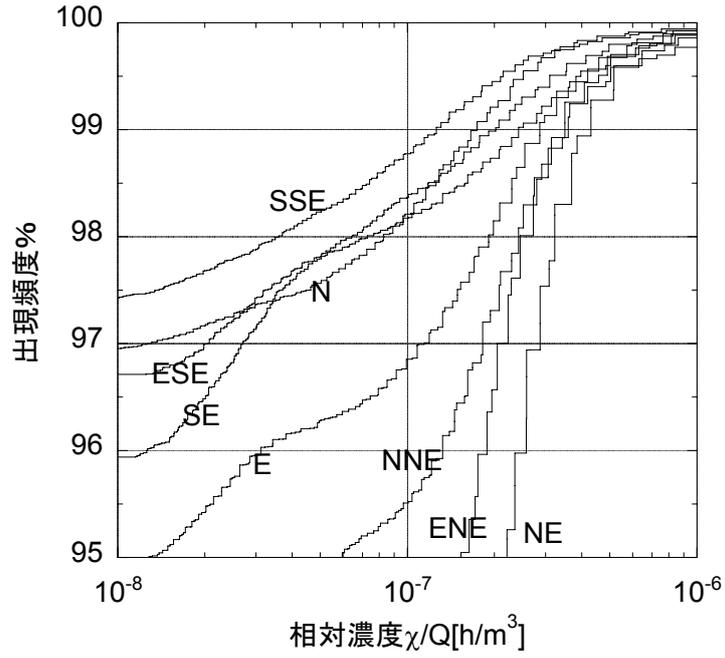


図 8-1 相對濃度頻度積算分布

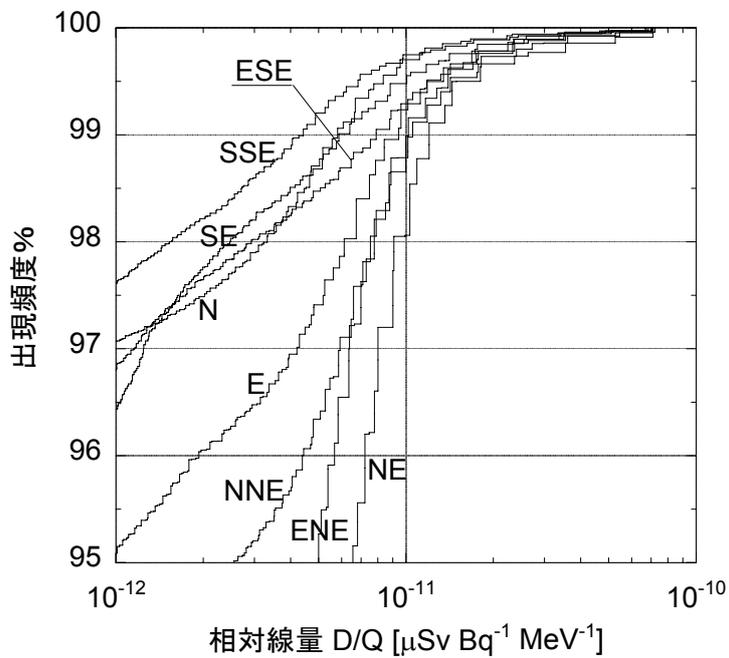


図 8-2 相對線量頻度積算分布

付録 A1 水銀の蒸発速度

漏洩した水銀の蒸発量の評価法とその結果について記す。

(1) 概要

評価モデルとして、1次元平板モデルを採用した。評価では、以下のような近似を行った。

- ① 界面における空気側の水銀濃度は平衡濃度とする。
- ② 空気は理想気体で、温度は一様で、流れは一定

水銀界面から空気の単位面積及び単位時間あたりの物質移動量 m_A は、次の式で与えられる。

$$m_A = -D_{AB} \left. \frac{\Delta\rho}{\Delta y} \right|_{y=0} \quad (\text{A1-1})$$

ここで、

D_{AB} : 空気に対する水銀の拡散係数 [m^2/s]

$\Delta\rho/\Delta y|_{y=0}$: 界面($y=0$)での水銀の濃度勾配 [$\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{m}$]

である。 $\Delta\rho/\Delta y|_{y=0}$ の評価については次のように考える。水銀表面には濃度勾配をもった薄い層

(境界層) が存在し、その層よりさらに外側では質量濃度一定と考える。すると

$$\left. \frac{\Delta\rho}{\Delta y} \right|_{y=0} \approx \frac{\rho_A - \rho_{A0}}{\delta} \quad (\text{A1-2})$$

と近似できる。ここで、

ρ_{A0} : 界面($y=0$)での水銀の質量濃度 [g/m^3]

ρ_A : 境界層の外側での空気中の水銀濃度 [g/m^3]

δ : 境界層の厚さ [m]

である。この式を代入して、

$$m_A = -D_{AB} \frac{\rho_A - \rho_{A0}}{\delta} = -\alpha(\rho_A - \rho_{A0}) \quad (\text{A1-3})$$

となる。ここで、 $\alpha \equiv D_{AB}/\delta$ [m/s]とした。この α を物質伝達係数という。さらに、境界層外側では水銀濃度は0と考えられるので $\rho_A \approx 0$ とすると、

$$m_A = \alpha\rho_{A0} \quad (\text{A1-4})$$

となる。 α (つまり、 D_{AB} と δ) 及び ρ_{A0} がわかれば m_A を計算することができる。以下それぞれの計算方法について記す。

(2) 拡散係数 D_{AB} の計算

拡散係数 D_{AB} [cm^2/s] の計算には次の式を使った。[A1-1]

$$D_{AB} = \frac{0.0018583T^{3/2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{P\sigma_{AB}^2\Omega_{D,AB}} \quad (A1-5)$$

ここで、

T :	温度[K]
M_A, M_B :	水銀及び空気の分子量 水銀： $M_A=200.59$ 、空気： $M_B=28.8$
P :	圧力[atm]
σ_{AB} :	衝突パラメータ(Å)
$\Omega_{D,AB}$:	衝突積分

である。このなかで、 T については水銀の温度とする^{xx}。また、 P は空気の圧力であり 1 atm とする。

衝突パラメータ σ_{AB} については、気体の種類によって定まっている定数 σ から求められる。二種類の気体 A, B に対する定数をそれぞれ σ_A, σ_B とすると

$$\sigma_{AB} = (\sigma_A + \sigma_B)/2 \quad (A1-6)$$

となる。表 A1-1 に各気体に対する定数 σ の値を示す。

衝突積分 $\Omega_{D,AB}$ については、 $k_B T/\varepsilon_{AB}$ (k_B : ボルツマン定数[J/K]) の関数であり、 ε_{AB} は

$$\frac{\varepsilon_{AB}}{k_B} = \sqrt{\frac{\varepsilon_A}{k_B} \frac{\varepsilon_B}{k_B}} \quad (A1-7)$$

から計算する。ここで ε_A/k_B 及び ε_B/k_B は気体の種類によって定まる定数である。表 A1-1 に各気体の ε/k_B の値も示す。また、 $\Omega_{D,AB}$ と ε_{AB}/k_B の関係を図 A1-1 に示す。

(3) 界面での水銀の質量濃度 ρ_{A0} の計算

界面における質量濃度は、水銀蒸気が空気に対して平衡に達しているとして計算した。水銀の蒸気圧 P_{Hg} は、次の半経験式^{xxi}から計算した^{xxii}。

$$\log_{10} P_{Hg} = 7.150 - 3212.5/T, \quad T < 423 \text{ K} \quad (A1-8)$$

水銀蒸気を理想気体とすれば平衡濃度 $C^*_{Hg}[\text{mol}/\text{m}^3]$ は、理想気体の状態方程式 $P_{Hg}V = nRT$ (V : 気体の占める体積 $[\text{m}^3]$ 、 n : 気体のモル数 $[\text{mol}]$ 、 R : 気体定数 $[8.314 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}]$) より

$$C^*_{Hg} = \frac{n}{V} = \frac{P_{Hg}}{RT} \quad (A1-9)$$

^{xx} T については、温度境界層厚さなどから水銀温度と空気温度の間にある実効的な温度を評価して使うのが適当であると考えられるが、簡略化及び安全側の評価という観点から、ここでは水銀の温度を使うこととした。

^{xxi} クラペイロン-クラウジウスの式から液体の蒸気圧 P と絶対温度 T との間には、 $\log P = A - B/T$ (A, B は定数) の関係があることが導かれる。

^{xxii} 実際の水銀中には核破砕生成物が溶け込んでいるため蒸気圧降下をするが、ここではこれを考慮しない。(界面での水銀濃度を大きめに評価することになるため安全側の評価となる。)

から求めることができる。

(4) 境界層厚さ δ の計算

境界層厚さ δ は、次式で定義される無次元数であるシャーウッド数 Sh から求めることができる。

$$Sh \equiv \frac{L}{\delta} = \frac{\alpha L}{D_{AB}} \quad (A1-10)$$

L は代表長さ[m]と呼ばれるもので、ここでは空気の流れに対する漏洩水銀の長さ ($L=6$ m) とする。

シャーウッド数 Sh は、次式で定義される無次元数レイノルズ数 Re 及びシュミット数 Sc から評価することができる。

$$Re = \frac{wL}{\nu}, \quad Sc = \frac{\nu}{D} \quad (A1-11)$$

w [m/s]は代表速度と呼ばれるもので、ここでは空気の平均流速 ($w=0.1$ m/s) とする。 ν [m²/s]は空気の動粘性係数であり、空気の温度を 40°C とすると $\nu=1.71 \times 10^{-5}$ [m²/s] となる^{xxiii}。図 A1-2 に温度に対する空気の動粘性係数の変化を示す。 Sh 数は Re 数及び Sc 数から以下の式を使って求める^{xxiv}。

$$Sh = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (\text{層流 ; } Re < 500,000) \quad (A1-12)$$

$$Sh = 0.037 Re^{0.8} Sc^{1/3} \quad (\text{乱流}) \quad (A1-13)$$

(5) 実際の水銀蒸発量計算

以上の式を使って、評価に必要な条件で実際に数値を代入して水銀の蒸発量を求める。評価上の条件を下記にまとめる。

水銀温度 : 80°C ($T=273+80=353$ K)

空気温度 : 40°C、空気流速 : $w=0.1$ m/s、圧力 : $P=1$ atm

代表長さ : $L=6$ m

まず、 D_{AB} を計算する。衝突パラメータ σ_{AB} は式(A1-6)とは表 A1-1 から

$$\sigma_{AB} = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} = \frac{2.969 + 3.711}{2} = 3.340$$

と求められる。次に、衝突積分の値を求めるために、 ε_{AB}/k_B を求める。式(A1-7)と表 A1-1 から

$$\frac{\varepsilon_{AB}}{k_B} = \sqrt{\frac{\varepsilon_A}{k_B} \frac{\varepsilon_B}{k_B}} = \sqrt{78.6 \times 750} = 243[\text{K}]$$

^{xxiii} 「理科年表」から 50°Cにおける空気の粘度は $\eta=19.3 \times 10^{-6}$ Pa·s である。また、50°Cでの空気密度は $\rho=1.09$ kg/m³ である。よって動粘性係数 ν は $\nu=\eta/\rho=1.77 \times 10^{-5}$ [m²/s]となる。

^{xxiv} これらの式は長さ L の平板に対する平均の Sh 数を求める式である。平板の先端から x の地点での局所的な Sh_x 数に対しては以下の式を使う。

層流 : $Sh_x = 0.332 Re_x^{1/2} Sc^{1/3}$ ($Sc > 0.6$)、乱流 : $Sh_x = 0.0296 Re_x^{0.8} Sc^{1/3}$

Re_x は代表長さとして平板の先端からの距離 x をとったときの Re 数である。

となる。よって、

$$\frac{k_B T}{\varepsilon_{AB}} = \frac{353 \text{ K}}{243 \text{ K}} = 1.45$$

となり、図 A1-1 から

$$\Omega_{D,AB} = 1.22$$

となる。また、

$$\sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} = \sqrt{\frac{1}{200.59} + \frac{1}{28.8}} = 0.199$$

であり、これらを式(A1-5)に代入すると

$$D_{AB} = \frac{0.0018583 T^{3/2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_{D,AB}} = \frac{0.0018583 \times 353^{3/2} \times 0.199}{1 \times 3.34^2 \times 1.22}$$

$$= 0.180 \text{ cm}^2/\text{s} = 1.80 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

となる。

次に、シャーウッド数 Sh を求めるために、レイノルズ数 Re 及びシュミット数 Sc を計算する。

$$Re = \frac{wL}{\nu} = \frac{0.1 \text{ m/s} \times 6 \text{ m}}{1.71 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 35,200$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{1.71 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{1.81 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 0.946$$

$Re < 500,000$ より流れは層流である。よって、 Sh 数は

$$Sh = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} = 0.664 \times 35200^{1/2} \times 0.946^{1/3} = 122$$

と求められる。 $Sh = L/\delta$ より、平板に対する平均の境界層厚さ δ は、

$$\delta = \frac{L}{Sh} = \frac{6 \text{ m}}{122} = 0.049 \text{ m} = 4.9 \text{ cm}$$

と計算できる。よって熱伝達率 $\alpha = D_{AB}/\delta$ は

$$\alpha = \frac{0.18 \text{ cm}^2/\text{s}}{4.9 \text{ cm}} = 0.037 \text{ cm/s} = 3.7 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

となる。

次に水銀の飽和蒸気圧は式(A1-8)より

$$\log_{10} P_{\text{Hg}} = 7.150 - \frac{3212.5}{T} = 7.150 - \frac{3212.5}{353 \text{ [K]}} = -1.95$$

$$P_{\text{Hg}} = 10^{-1.95} = 0.0112 \text{ [kPa]}$$

となる。これより界面における水銀濃度 C^*_{Hg} [mol/m³] は、

$$C^*_{\text{Hg}} = \frac{n}{V} = \frac{P_{\text{Hg}}}{RT} = \frac{11.2 \text{ Pa}}{8.31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \times 353 \text{ K}} = 3.82 \times 10^{-3} \text{ mol/m}^3$$

となる。これに水銀 1 mol あたりの重量 200.59 g/mol を掛けると界面での水銀の質量濃度は

$$\rho_{A0} = 0.766 \text{ g/m}^3$$

となる。以上の結果を式(A1-4)に代入すると、質量流速 m_A は、

$$\begin{aligned} m_A &= 3.7 \times 10^{-4} \text{ m/s} \times 0.766 \text{ g/m}^3 = 2.8 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ &= 1.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

となる。

参考文献

- [A1-1] A. H. P. Skelland: "Diffusional Mass Transfer", John Wiley & Sons, (1974).

表 A1-1 主な分子に対する Lennard-Jones parameter (σ 及び ϵ/k_B) の値^{a)}

物質名		σ [Å]	ϵ/k_B [K]	
軽い物質	H ₂	2.827	59.7	
	He	2.551	10.22	
希ガス	Ne	2.820	32.8	
	Ar	3.542	93.3	
	Kr	3.655	178.9	
	Xe	4.047	231.0	
	空気	3.711	78.6	
ガス	N ₂	3.798	71.4	
	O ₂	3.467	106.7	
	CO	3.690	91.7	
	CO ₂	3.941	195.2	
	NO	3.492	116.7	
	N ₂ O	3.828	232.4	
	SO ₂	4.112	335.4	
	F ₂	3.357	112.6	
	Cl ₂	4.217	316.0	
	Br ₂	4.296	507.9	
	I ₂	5.160	474.2	
	水銀及びその化合物	Hg	2.969	750
		HgBr ₂	5.080	686.2
HgCl ₂		4.550	750	
HgI ₂		5.625	695.6	

^{a)} 文献[A1-1]から

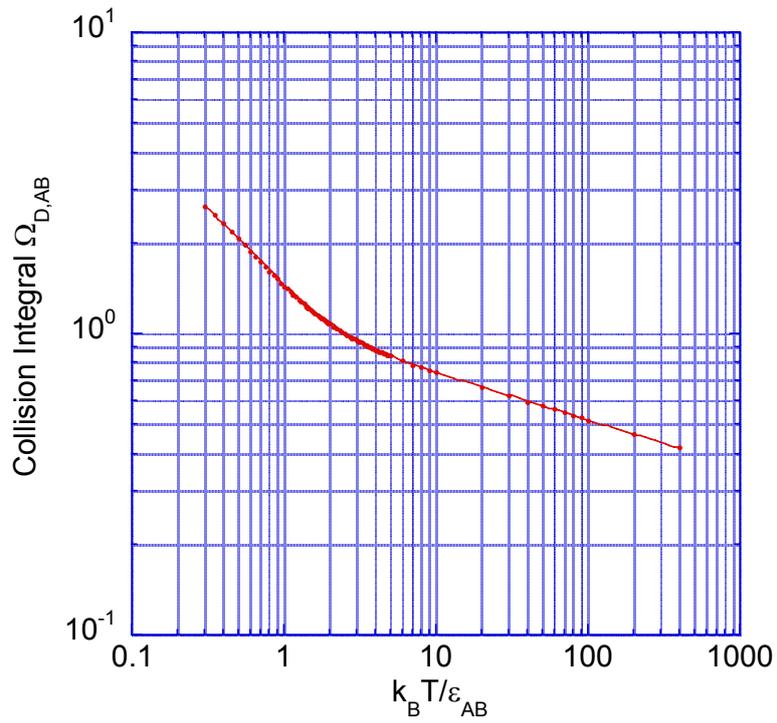


図 A1-1 衝突積分 $\Omega_{D,AB}$ と $k_B T / \epsilon_{AB}$ の関係

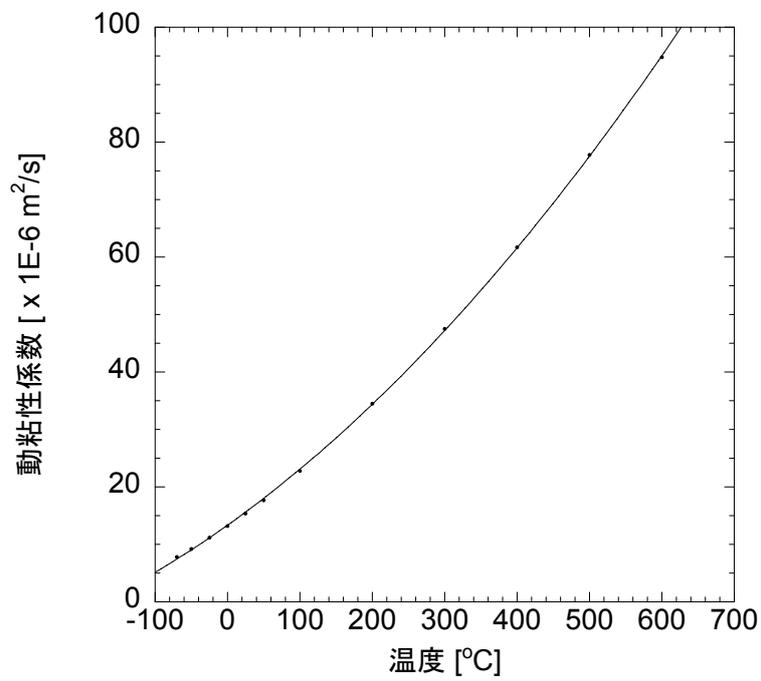


図 A1-2 空気の動粘性係数と温度の関係

付録 A2 水銀中での希ガス及び水素（トリチウム）の拡散定数の評価

拡散定数を評価するための最も簡単な式は次に示す Stokes-Einstein の式である。

$$\frac{D_{AB}\mu_B}{kT} = \frac{1}{4\pi R_A} \quad \text{または} \quad \frac{1}{6\pi R_A} \quad (\text{A2-1})$$

ここで、 D_{AB} は拡散定数、 μ_B は媒質の粘度、 k はボルツマン定数(1.38×10^{-23} J/K)、 T は絶対温度、 R_A は溶質粒子の半径である。また、左辺の分子側にある定数については、溶質粒子の表面が完全に滑る(Complete slip condition)と仮定した場合は4、全く滑らない(No-slip condition)と仮定した場合は6になる。この式は、液体金属中の自己拡散及び相互拡散に対してもオーダー的にはほぼ正しい値を与えることがわかっている[A2-1]。以下では、Complete slip 条件での Stokes-Einstein 方程式（定数が4の式）を使って、水銀の自己拡散定数及び水銀中の希ガスの拡散定数のおおまかな評価を行う。

まず、水銀の自己拡散定数を計算する。温度は 80°C ($T=353$ K)とする。水銀の粘度は $\mu_B=1.3 \times 10^{-3}$ Pa·s（温度 80°C ）である。 R_A については水銀原子の半径であるが、ここでは原子を球としてそれが立方体の各面に接する形で配置されているとして、以下の式で計算した。

$$2R_A = (V_A/N_A)^{1/3} \quad (\text{A2-2})$$

ここで、 V_A は水銀1モルあたりの容積で水素の原子量200.59及び密度 13.5 g/cm³から 14.8 cm³/molと求められる。また N_A はアボガドロ数である。よって $R_A=1.45 \times 10^{-8}$ cmとなる。これらを使って、

$$\begin{aligned} D_A &= \frac{kT}{4\pi\mu_B R_A} \\ &= \frac{1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 353 \text{ K}}{4 \times 3.14 \times 1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s} \times 1.45 \times 10^{-10} \text{ m}} \\ &\approx 2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} = 2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s} \end{aligned} \quad (\text{A2-3})$$

と求めることができる。一方、水銀の自己拡散定数 $D_{\text{Hg-Hg}}$ は、絶対温度 $T=248\sim 525$ K の範囲で次のような経験式から評価できる。[A2-2]

$$D_{\text{Hg-Hg}} = 4.34 \times 10^{-4} T^{3/2} - 0.481 \quad (\text{A2-4})$$

ここで、 $D_{\text{Hg-Hg}}$ の単位は 1×10^{-5} cm²/s である。この式に $T=353$ K を代入すると $D=2.40 \times 10^{-5}$ cm²/s となり、(A2-4)式による評価は 20%程度で一致している。これらの結果から、水銀の自己拡散係数は 10^{-5} cm²/s のオーダーであることがわかる。

次に、水銀に対する希ガスの拡散定数を評価する。式(A2-3)を使う場合は自己拡散の計算と比べて変わるのは R_A の値だけである。水銀の場合と同様に式(A2-2)で評価する場合、 V_A の値の取り方が問題になるが、ここでは、液体状態の希ガスの標準沸点での密度から評価することにする。代表として Xe を選ぶと、密度 2.95 g/cm³、原子量 131.3 [g/mol]から $V_A=131.3/2.95=44.5$ cm³/mol となり、 $R_A=2.1 \times 10^{-8}$ cm となる。この値は、水銀の場合とオーダー的にはほぼ同じ値であり、拡散

定数は水銀の自己拡散の場合と同じオーダーである。計算すると、 $D=1.2\times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ となる。また、Ar 及び Kr についても、 $R_A\sim 2\times 10^{-8} \text{ cm}$ であり拡散定数は $D\sim 1\times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーである。また、水素については密度 0.0708 g/cm^3 、原子量は 2 [g/mol] (H_2 の場合) なので、 $V_A=2/0.0708=28.2 \text{ cm}^3/\text{mol}$ となり R_A の値は希ガスのとくとそれほど変わらないので、 D の値も同様に $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーであると評価できる。以上の考察からわかるように、水銀内での気体の拡散定数は $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ のオーダーである。

参考文献

- [A2-1] A. D. Pasternak and D. R. Olander, "Diffusion in Liquid Metals", AICHE Journal, Vol. 13, No. 6, 1052 (1967).
- [A2-2] 日本化学会編、「化学便覧 基礎編Ⅱ」、改訂4版、丸善.

付録 A3 水銀の空气中濃度許容値について

水銀は放射化していなくてもそれ自体が化学的に毒性をもつ。水銀の空气中許容濃度として、The American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) 及び日本産業衛生学会が定めた値を示す。[A3-1]

ACGIH 許容濃度:	0.025 mg/m ³
日本産業衛生学会許容濃度:	0.05 mg/m ³

これらの濃度は、1日8時間、1週40時間の時間荷重平均濃度であり、この濃度でほとんどすべての労働者が毎日繰り返し暴露しても健康に悪影響を受けない値として定められている。この値は、あくまでの労働衛生上の基準であり、一般公衆に対する許容濃度として用いることはできないが、これをひとつの目安として水銀漏洩事故時の敷地境界での水銀濃度を評価し比較した。

事故時の敷地境界での濃度は、下記のように下記の通りである。

$$\begin{aligned}
 (\text{事故時の敷地境界での水銀濃度}) &= (1 \text{ 時間あたりの排気筒からの水銀放出量}) \times (\text{相対濃度}) \\
 &= 0.16 \text{ g/h} \times 2.8 \times 10^{-7} \text{ h/m}^3 \\
 &= 4.5 \times 10^{-8} \text{ g/m}^3
 \end{aligned}$$

ここで、水銀放出量及び相対濃度は、被ばく評価に用いた値と同じものを用いた。この値は上記の許容値とくらべて3桁も低く、これによって健康に影響を及ぼすことはないと考えられる。

参考文献

[A3-1] 化学物質安全情報研究会編：“化学物質安全性データブック（改訂増補版）”、オーム社、(1997)。

付録 A4 物質・生命科学実験施設における水銀及びオフガス漏洩事象時の影響評価^{xxv}

物質・生命科学実験施設 (MLF) において外部環境に最も大きな影響を与えると考えられる「水銀循環系からの放射化機器取扱室 (ホットセル) 内への水銀の流出とそれに伴うサージタンク内オフガスの全量漏洩」を仮定した場合の事業所境界における被ばく線量を評価した。

(1) 想定事象

以下の事象を想定する。

- ・ 出力 1MW での運転時にホットセル内において、水銀循環系配管が破断した。
- ・ 水銀の全量がターゲット台車上のキャッチパン上に漏洩するとともに、水銀循環系サージタンク内のカバーガスの全量が室内に漏洩した。
- ・ カバーガス及び気化した水銀が建家空調を通じて排気筒から外部へ放出された。

図 A4-1 にターゲット台車俯瞰図、図 A4-2 に放射化機器取扱室断面図を示す。

(2) 水銀中の放射能の計算

水銀は入射陽子及び 2 次粒子によって放射化する。水銀中に生成される放射能については、PHITS 及び DCHAIN-SP を使ったコードシステムで計算した。[A4-1] 計算条件を下記に示す。

陽子ビームエネルギー：	3 GeV
陽子ビーム強度：	1 MW (333 μ A)
照射時間：	5000 h
冷却時間：	0 h

(3) 外部放出された放射エネルギーの評価

事象発生に伴って外部放出される放射能として、水銀蒸気及びトリチウム、希ガス (アルゴン、クリプトン及びキセノン) を想定した。それぞれの全生成量及び想定放出量の評価について、以下に示す。

a. 水銀

外部へ放出される水銀蒸気量を評価するにあたって、以下のように仮定した。

- ・ 配管破断部から水銀の全量(体積: 1.4 m³)が漏洩し、キャッチパン上で保持される。
- ・ キャッチパン上に保持された水銀から気化した水銀が、空調を通じて建家外部へ放出
- ・ 漏洩発生 1 時間後に空調系のダンパーを閉止。それとともに、蒸気水銀の外部放出が停止

水銀の蒸発速度は、蒸発面上の一樣な空気の流れによってできる濃度境界層での蒸気拡散を仮定し、

^{xxv} 本文書は、平成 20 年 3 月に行った変更許可申請に際して「参考資料」として提出したものである。(ただし「参考資料」にはこれ以降の脚注は記載していない。)

0.3 g/分と評価した。[A4-2] その際、水銀温度を 80°C、空気温度を 40°C、空気の色度については、室内の換気風量と断面積から 0.1 m/s とした。また、キャッチパンの面積は 16 m² とした。これより、漏洩発生からダンパーが閉止される 1 時間での水銀の外部放出量は 18 g となる^{xxvi}。水銀核種の全放射能生成量と上記仮定より評価された外部放出量を表 A4-1 に示す。

b. 希ガス、トリチウム

希ガス及びトリチウムについては、全量が漏洩と同時に外部へ放出されるものと仮定した。被ばくに寄与する主要な核種の全生成量（即ち放出量）を表 A4.2 に示す。

(4) 事業所境界での被ばく線量評価

a. 評価式

事業所境界における水銀及び希ガスからのガンマ線による外部被ばく量 D_γ [μSv] については、以下の式を使って評価した。

$$D_\gamma = (D_\gamma / Q_\gamma) Q_\gamma \quad (\text{A4-1})$$

ここで、 D_γ / Q_γ [$\mu\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$] は大気拡散に係る相対線量、 Q_γ [$\text{Bq} \cdot \text{MeV}$] は放射性核種の放出量 [Bq] にそれが放出するガンマ線の実効エネルギー [MeV] を掛けた値である。ガンマ線実効エネルギーを表 A4-3 に示す。

また、事業所境界における水銀及びトリチウム (HT) の吸入による内部被ばく量 D_I [μSv] については、以下の式を使って評価した。

$$D_I = KMQ(\chi/Q) \quad (\text{A4-2})$$

ここで、 K は実効線量係数 [mSv/Bq]、 M は呼吸率で 1.2 m³/h とした。 Q は放射性核種の放出量 [Bq]、 χ/Q は大気拡散に係る相対濃度 [h/m^3] である。実効線量係数を表 A4-4 に示す。

大気拡散に係る係数の評価については、次に示す。

b. 相対線量、相対濃度の評価

(A4-1) 及び (A4-2) 式中の相対線量及び相対濃度については、下記の条件で評価した。

排気筒からの距離:	310 m
放出高さ:	0 m (地上放出)
建家投影面積:	1640 m ²
風速:	1.0 m/s
大気安定度:	F

^{xxvi} レポート本文中では 1 時間あたりの水銀の蒸発量を 16 g としたが、ここでは、水銀蒸発量評価時の端数を安全側に処理して 18 g とした。また、水銀蒸気の外放出について、本文中では空調系の水銀吸着活性炭フィルターによる除染を考慮したが、仮想的な条件による最大被ばく量を見積もるという立場から、ここでその効果を考慮していない。

相対線量は $7.2 \times 10^{-12} \mu\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$ 、相対濃度は $2.5 \times 10^{-7} \text{h/m}^3$ となった。^{xxvii}

事故評価においては、大気拡散しにくい天候状態の際に事故が発生する可能性を考慮する必要がある。発電用原子炉の場合、事故評価で使用する相対線量及び相対濃度の算出方法が「発電用原子炉の安全解析に関する気象指針」中の「想定事故時の大気拡散の解析方法」[A4-3]に定められている。それによると、敷地内で測定された風向、風速及び大気安定度のデータから時間毎の相対線量及び相対濃度を評価し、それらの上位 3%に相当する値を使用することになっている。上記は、本指針に従って、原子力機構内で測定された過去 5 年間の気象データを解析した結果得られたものであり、その条件は確率上まれにしか発生しない悪い条件であると考えられる。

c. 評価結果

事業所境界での被ばく量の評価結果を以下に示す。

外部被ばくによる実効線量

希ガス： 100 μSv
水銀： $1 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}$

内部被ばくによる実効線量

トリチウム： $5 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}$
水銀： 10 μSv

被ばく量は最大でも 100 μSv 程度であり、一般公衆が線量限度(1 mSv/年)以上の被ばくを受けることはない。

実際は漏洩した水銀がキャッチパン上で保持されることは無く、台車下の水銀捕集タンクに集められること、空調系には水銀蒸気を吸着する水銀フィルターを備えていること、漏洩検知後直ちに空調ダンパーの閉止が可能であること、さらに冷却時間を 0 としていることを考慮すると、本評価は十分安全側であり、実際の放出量は表に示したものよりかなり少ないものと考えられる。

参考文献

- [A4-1] T. Kai, M. Harada, F. Maekawa, M. Teshigawara, C. Konno, Y. Ikeda: "Induced-Radioactivity in J-PARC Spallation Neutron Source ", J. Nucl. Sci. Technol., Supplement 4, 172 (2004)
- [A4-2] 平岡正勝、田中幹也：“新版 移動現象論”、朝倉書店 (2002)
- [A4-3] 原子力安全委員会：“発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針”、昭和 57 年 1 月 28 日 原子力安全委員会決定、一部改定 平成元年 3 月 27 日 原子力安全委員会、一部改定 平成 6 年 4 月 21 日 原子力安全委員会。

^{xxvii} ここでの相対線量及び相対濃度の値は、本レポートの本文中で示した 97%値ではなく、(2)に示した条件で計算した場合の値である。97%値と比べて若干小さい値であるが、評価の精度を考慮すれば特に問題はない差である。本書類の性格上、評価結果を検証しやすいようにこのような形にした。

表 A4-1 水銀核種の生成量

核種	半減期	生成量[Bq]	外部放出量[Bq]
Hg-195	9.9 h	4×10^{14}	4×10^8
Hg-195m	1.73 d	3×10^{14}	3×10^8
Hg-197	2.67 d	2×10^{15}	2×10^9
Hg-197m	23.8 h	1×10^{15}	1×10^9
Hg-199m	42.6 m	5×10^{15}	5×10^9
Hg-203	46.6 d	2×10^{15}	2×10^9

表 A4-2 希ガス及びトリチウムの生成量(外部放出量)

核種	半減期	生成量 (=外部放出量) [Bq]
T	12.3 y	9×10^{13}
Ar-41	1.822 h	2×10^{11}
Ar-43	5.37 m	6×10^{10}
Ar-44	11.87 m	5×10^{10}
Kr-79	1.46 d	4×10^{12}
Kr-85m	4.480 h	8×10^{11}
Kr-87	1.27 h	3×10^{11}
Kr-88	2.84 h	2×10^{11}
Xe-120	40 m	1×10^{12}
Xe-121	40.1 m	3×10^{12}
Xe-122	20.1 h	7×10^{12}
Xe-123	2.08 h	9×10^{12}
Xe-125	16.9 h	1×10^{13}
Xe-127	36.4 d	1×10^{13}

表 A4-3 ガンマ線実効エネルギー

核種	半減期	ガンマ線実効 エネルギー[MeV] ^{a)}
Ar-41	1.822 h	1.283
Ar-43	5.37 m	1.505
Ar-44	11.87 m	1.936
Kr-79	1.46 d	0.186
Kr-85m	4.480 h	0.157
Kr-87	1.27 h	0.791
Kr-88	2.84 h	1.954
Xe-120	40 m	0.405
Xe-121	40.1 m	0.974
Xe-122	20.1 h	0.068
Xe-123	2.08 h	0.410
Xe-125	16.9 h	0.269
Xe-127	36.4 d	0.279
Hg-195	9.9 h	0.200
Hg-195m	1.73 d	0.203
Hg-197	2.67 d	0.073
Hg-197m	23.8 h	0.096
Hg-199m	42.6 m	0.183
Hg-203	46.6 d	0.240

^{a)} 値の計算に必要な放出ガンマ線エネルギー及び放出率については以下を参照した。
R.B. Firestone and L.P. Ekström: "WWW Table of Radioactive Isotopes", V.2.1, <http://ie.lbl.gov/toi>, (2004).

表 A4-4 実効線量係数

核種	半減期	実効線量係数[mSv/Bq] ^{a)}
T	12.33 y	1.8×10^{-12} ^{b)}
Hg-195	9.9 h	1.4×10^{-6}
Hg-195m	23.8 h	8.2×10^{-6}
Hg-197	2.67 d	4.4×10^{-6}
Hg-197m	23.8 h	5.8×10^{-6}
Hg-199m	42.6 m	1.8×10^{-7}
Hg-203	46.612 d	7.0×10^{-6}

a) 「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」(平成12年10月23日科学技術庁告示第5号)より

b) HT に対する値

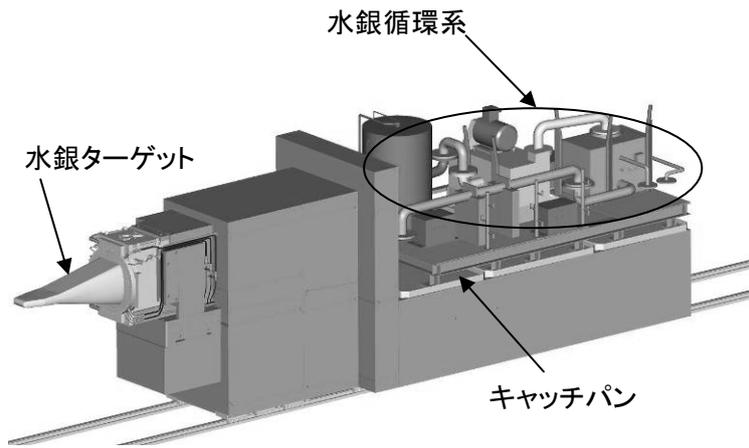


図 A4-1 水銀ターゲット台車俯瞰図

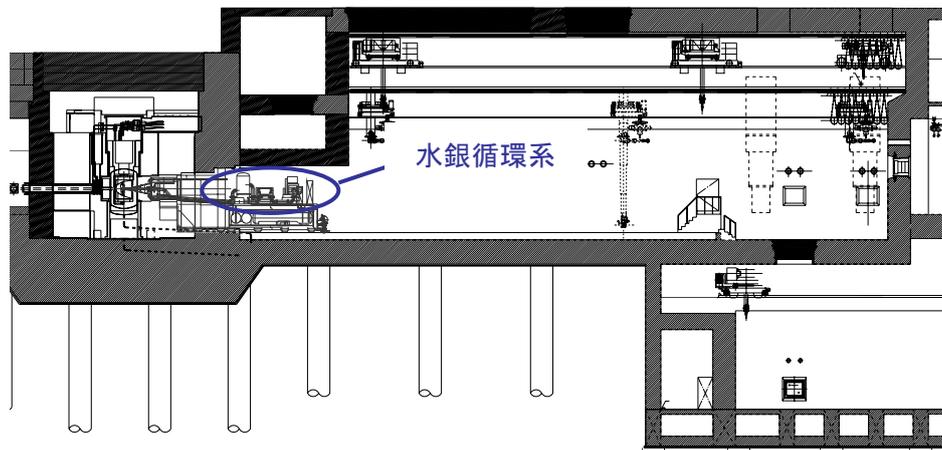


図 A4-2 放射化機器取扱室断面図

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
磁界の強度	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

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 ^(c)	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 ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射線量当量, 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
酸素活性化	カタール	kat	s ⁻¹ mol	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、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
粘りのモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	m ⁻¹ kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
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
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電荷の密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ 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	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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	1 h=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	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	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	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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
バット	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオトル	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁶ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe=(10 ³ /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。

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=1 cGy=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	fm	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	1 cal=4.1868 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

