

J-PARC核変換実験施設・ADSターゲット試験施設に おける鉛ビスマス漏洩事象時の影響評価

Assessment of Lead-bismuth-eutectic Leak at ADS Target Test Facility
in Transmutation Experimental Facility of J-PARC

岩元 大樹 前川 藤夫 松田 洋樹 明午 伸一郎

Hiroki IWAMOTO, Fujio MAEKAWA, Hiroki MATSUDA and Shin-ichiro MEIGO

原子力科学研究部門

J-PARC センター

核変換ディビジョン

Nuclear Transmutation Division

J-PARC Center

Sector of Nuclear Science Research

January 2018

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2018

J-PARC 核変換実験施設・ADS ターゲット試験施設に おける鉛ビスマス漏洩事象時の影響評価

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門

J-PARC センター 核変換ディビジョン

岩元 大樹、前川 藤夫、松田 洋樹、明午 伸一郎

(2017年11月1日受理)

J-PARC 核変換実験施設の ADS ターゲット試験施設において、250 kW 出力ビーム運転時にターゲットとして使用される鉛ビスマスが鉛ビスマス循環系から漏洩し、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公衆が受ける被ばく線量について、様々な保守的仮定を想定しながら評価した。その結果、事業所境界における被ばく量は約 660 μSv であり、その大部分は鉛ビスマスから核破砕生成物として発生する水銀、希ガスおよびヨウ素による寄与であることがわかった。保守的な事象想定にもかかわらず、被ばく量の合計は一般公衆が受ける年間被ばく量よりも低い値であり、本施設が放射性物質の漏洩に対して十分な安全裕度を持つことが示された。

Assessment of Lead-bismuth-eutectic Leak at ADS Target Test Facility in Transmutation Experimental Facility of J-PARC

Hiroki IWAMOTO, Fujio MAEKAWA, Hiroki MATSUDA
and Shin-ichiro MEIGO

Nuclear Transmutation Division
J-PARC Center
Sector of Nuclear Science Research
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received November 1, 2017)

Under an assumption that an incident of lead-bismuth-eutectic (LBE) leak from an LBE circulation system occurred during a 250-kW beam operation, an estimation of radiation dose at the site boundary for the ADS Target Test Facility (TEF-T) in Transmutation Experimental Facility (TEF) of J-PARC was conducted using various conservative assumptions. As a result, the radiation dose at the site boundary was estimated to be about 660 μSv , which were dominated by mercury, noble gas, and iodine produced as spallation products from the LBE. Even though the incident scenario was made conservatively, it was shown that the estimated total dose was lower than the annual radiation dose due to natural sources, and the TEF-T has sufficient safety margin for the leak of radioactivity.

Keywords: ADS Target Test Facility (TEF-T), Transmutation Experimental Facility (TEF), J-PARC, Lead-bismuth Eutectic (LBE), Mercury

目次

1. 緒言	1
2. 想定する事象	2
3. 評価	4
3.1 生成放射能	4
3.2 換気系への移行	7
3.3 実効線量の評価	15
4. 結言	29
謝辞	29
参考文献	30
付録A 揮発性物質の蒸発速度	32
付録B 濃度分布式の導出	35
付録C 水銀の空气中濃度許容値	37
付録D 核反応モデルの妥当性検証	38

Contents

1. Introduction	1
2. Credible accident	2
3. Analysis	4
3.1 Produced radioactivity	4
3.2 Transition to ventilation system	7
3.3 Evaluation of effective dose rate	15
4. Conclusion	29
Acknowledgment	29
References	30
Appendix A Evaporation rate of volatile materials	32
Appendix B Derivation of concentration distribution	35
Appendix C Acceptable value of density of mercury vapor in the air	37
Appendix D Validation of nuclear reaction models	38

List of Tables

表 3.1.1	250 kW、5000 時間運転で鉛ビスマス中に生成される主要核種の放射能	6
表 3.1.2	250 kW、5000 時間運転で鉛ビスマス中に生成される主な元素の生成量	7
表 3.2.1	排気筒から放出される水銀核種の放射能	8
表 3.2.2	排気筒から放出されるヨウ素核種の放射能	9
表 3.2.3	排気筒から放出される臭素核種の放射能	9
表 3.2.4	排気筒から放出されるアスタチン核種の放射能	10
表 3.2.5	排気筒から放出される希ガス核種の放射能	14
表 3.2.6	排気筒から放出されるトリチウムの放射能	14
表 3.2.7	鉛ビスマス中の鉛、ビスマス、タリウム、ポロニウムおよびセシウムの蒸 発量および排気筒から放出される量	15
表 3.2.8	排気筒から放出されるセシウム、タリウム、鉛、ビスマスおよびポロニウ ム核種の放射能	16
表 3.3.1	γ 線実効エネルギー	18
表 3.3.2	トリチウム、水銀、ハロゲン、セシウムおよびタリウム核種の吸入摂取に よる実効線量係数	20
表 3.3.3	鉛、ビスマスおよびポロニウム核種の吸入摂取による実効線量係数	21
表 3.3.4	定数 θ_0 、 σ_0 、 a_1 、 a_2 および a_3 の大気安定度ごとの値	23
表 3.3.5	大気安定度分類表	24
表 3.3.6	内部被ばく核種別内訳（上位 10 核種）	28
表 3.3.7	外部被ばく核種別内訳（上位 10 核種）	28
表 A.1.1	表面温度に対する Henry 定数の推奨関数	33
表 A.1.2	物質の原子量、モル分率、表面温度 550°C における Henry 定数および蒸発 速度	33

List of Figures

図 1	鉛ビスマスターゲット台車俯瞰図	2
図 2	鉛ビスマス漏洩に関する安全システムの概念図	3
図 3.3.1	核変換実験施設周辺図	22
図 3.3.2	風速 1 m/s 時の地上放出での風下方向の相対濃度分布	24
図 3.3.3	y 方向の拡がりパラメータ	25
図 3.3.4	z 方向の拡がりパラメータ	25
図 3.3.5	風速 1 m/s 時の地上放出での風下方向の相対線量分布	27
図 A.1.1	鉛ビスマス表面温度に対する蒸発速度	34
図 D.1.1	500 MeV 陽子入射による ^{208}Pb 標的からの核破碎生成物核種 (水銀、キセ ノン、ヨウ素およびクリプトン) 生成断面積の C/E 値	38

1. 緒言

J-PARC 核変換実験施設 (TEF) の ADS ターゲット試験施設 (TEF-T) は、400 MeV、250 kW の高エネルギー陽子を標的 (ターゲット) 物質である鉛ビスマスに打ち込むことで高速・高エネルギーの中性子・陽子照射環境を生成し、高放射線環境下における材料、熱流動等の試験を通して ADS 開発に向けた要素技術開発を行う施設である。

本施設では、陽子及び中性子等によって、ターゲット容器、鉛ビスマス、ターゲット周りの機器、冷却水が放射化する。鉛ビスマス中に発生した希ガス及びトリチウムは気相部に移行するため、一定期間ごとに処理する必要がある。また鉛ビスマスからはその他の放射性ガス (ハロゲンなど) が発生する。そのため本施設には、鉛ビスマス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 (気体廃棄物処理システム) を設けている。鉛ビスマスから発生する放射性ガスはこれによって処理されたうえで放出される。

本施設では、鉛ビスマス漏洩等の異常事象の発生に対してはそれをできる限り早く検知し、影響を最小限に抑えるための設計を施している。鉛ビスマス循環系からの鉛ビスマスの漏洩については、漏洩検知器等により検知し、加速器及び鉛ビスマス循環系の運転を自動的に停止させる。また、鉛ビスマス系が設置されている放射化機器取扱室 (ホットセル) から外部への放射性物質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を設けている。

本報告書は、鉛ビスマス漏洩が発生した場合に、上記のいくつかの安全装置の機能を考慮しない等かなり保守的な条件を想定し、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を、「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¹⁾」および「鉛ビスマスハンドブック²⁾」を参考に評価し、その結果をまとめたものである。

2. 想定する事象

図1に鉛ビスマスターゲット台車の俯瞰図を示し、図2に鉛ビスマス漏洩に関する安全システムの概念図を示す。TEF-Tでは鉛ビスマス漏洩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鉛ビスマス循環系から鉛ビスマスが漏洩した場合は、漏洩した鉛ビスマスはターゲット台車上に設置した保護容器（真空ベッセル）内またはキャッチパン上に落ちる。真空ベッセルおよびキャッチパンには漏洩検出器が設けられ、鉛ビスマスの漏洩を検知する。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鉛ビスマス循環系の運転は停止する。漏洩センサが動作するような漏洩発生時には、放射化機器取扱室（ホットセル）のダンパを閉止することにより、外部へのガス状放射性物質の放出を抑制する。

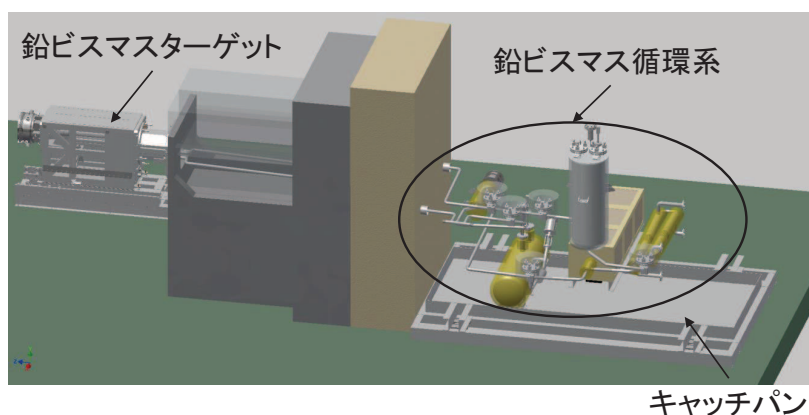


図1 鉛ビスマスターゲット台車俯瞰図

このように、本施設は、予定外の放射性物質の外部への放出に対して多重性を持った防護システムを備えている。しかしながら本報告書では、これらの安全システムの幾つかが機能しなかったとして評価を行う。以下に想定したシナリオを示す。

1. 250 kW 出力ビーム運転中に放射化機器取扱室の鉛ビスマス循環系の配管または弁等から鉛ビスマスが漏洩する。
2. キャッチパン上の漏洩検出器により鉛ビスマスの漏洩が検知される。安全装置により陽子ビーム及び鉛ビスマス循環ポンプは停止し、漏洩は収束する¹。漏洩量は鉛ビスマス循環系に流れる鉛ビスマスの全量（0.1 m³）とする。

¹仮に漏洩検出器が働かなかった場合でも、膨張タンク中の鉛ビスマス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および鉛ビスマス循環ポンプは自動的に停止する。

3. 鉛ビスマスをターゲット台車下部の漏洩鉛ビスマス捕集タンクに導くための配管のバルブが作動せず、鉛ビスマスはキャッチパン上に留まり、キャッチパン全面に均一に拡がる。
4. 漏洩発生後も、放射化機器取扱室の空調は継続して作動し続け、鉛ビスマス中の揮発性の放射性物質の一部が、空調系を通して排気筒から外部へ放出される。
5. 放射化機器取扱室のダンパは漏洩発生から 1 時間後に閉止され、排気筒からの放射性物質の放出は止まる。

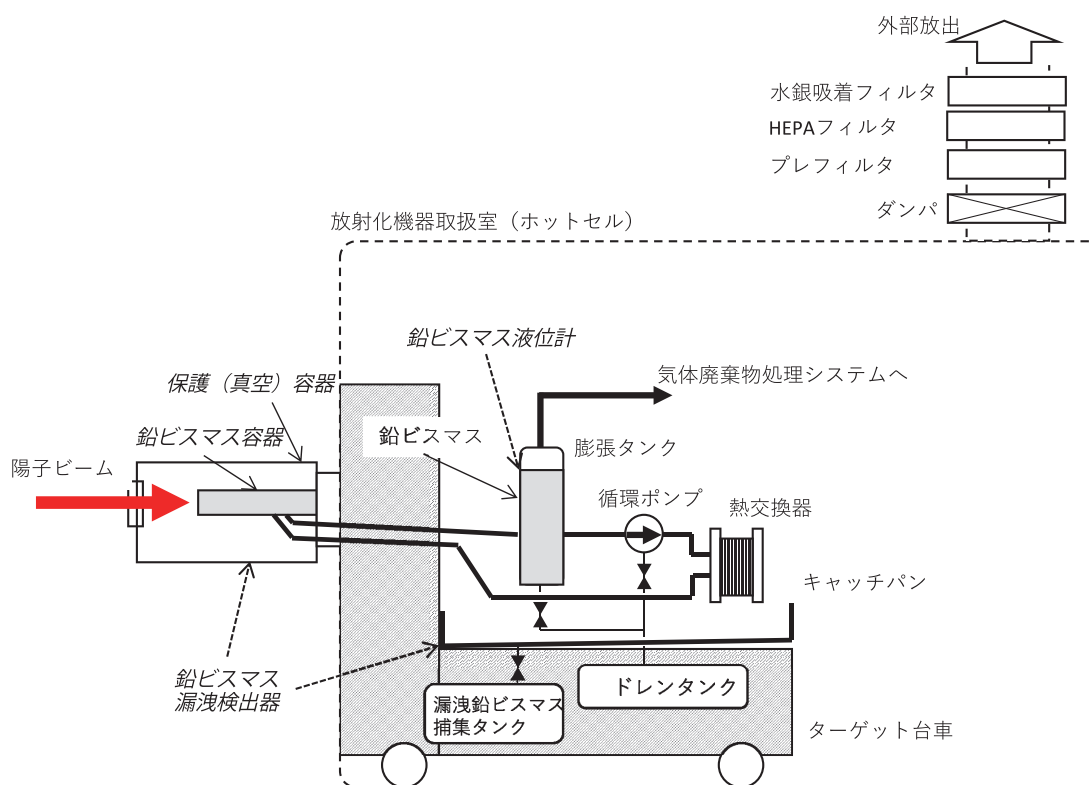


図 2 鉛ビスマス漏洩に関する安全システムの概念図

3. 評価

3.1 生成放射能

循環鉛ビスマスに含まれる放射能の評価について示す。

3.1.1 運転条件

漏洩事象が発生するまでに250 kWで5000時間の運転を行っているものとし、循環している鉛ビスマスの全量は 0.1 m^3 とする。鉛ビスマスは施設寿命の間、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小評価となる。しかしながら当想定事象によって与える被ばくは、大部分が水銀、希ガスおよびトリチウムによるものであり、これらについては以下に示す理由から過小評価にならない。

- 水銀の主要核種は ^{197}Hg であり、その半減期は64時間である。よって5000時間の運転で十分飽和値に達している。
- 希ガスおよびトリチウムは、鉛ビスマス内で生成されてから一定時間後にはほぼ全量が膨張タンク内のカバーガスに移行する。カバーガスは一年に一回程度処理されるため、膨張タンクを含む鉛ビスマス循環系内に、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。

したがって、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 計算コードおよび計算モデル

計算はモンテカルロ粒子輸送計算コードPHITS³⁾および誘導放射能計算コードDCHAIN-SP2001⁴⁾を用いた。ここで、20 MeV以上の中性子、陽子入射核反応に対してはPHITSに組み込まれている核内カスケード(INC: Intranuclear Cascade)モデル Bertini INC⁵⁾および一般化蒸発モデルGEM⁶⁾を使用し¹⁾、20 MeV未満の中性子および γ 線に対しては評価済み核データライブラリJENDL-4.0⁷⁾を使用した。評価モデルとしては、鉛ビスマス、ターゲット容器、遮蔽体を実際の寸法および形状をモデル化したものを用いた。計算条件を以下に示す。

陽子ビームエネルギー	400 MeV
陽子ビーム強度	250 kW (625 μA)
照射時間	5000 時間
冷却時間	0 時間

¹⁾核反応モデルの妥当性検証については付録Dを参照。

表 3.1.1 に、鉛ビスマス中に生成する放射能の計算結果を示す。ここで、付録 D で示した妥当性検証により C/E 値が 1 未満の核種に対しては、C/E 値の逆数を乗じることで補正した値を用いた。表中には、漏洩した鉛ビスマスから気中に移行する可能性のあるトリチウム、希ガス、水銀および比較的放射エネルギーの高い核反応生成物 (10^{10} Bq 以上) の放射能を示し、表 3.1.2 に、主な核反応生成物の生成量を質量の単位で示す。これ以外の核反応生成物の気中への移行は無視できる。理由は後述する。

表 3.1.1 250 kW、5000 時間運転で鉛ビスマス中に生成される主要核種の放射能

核種	半減期	放射能 [†]	核種	半減期	放射能 [†]	核種	半減期	放射能 [†]
T	12.32 y	1.4E+13	Hg-195	9.9 h	4.9E+13	Pb-202m	3.531 h	4.5E+13
Ar-41	1.822 h	6.3E-04	Hg-195m	23.8 h	6.4E+12	Pb-203	1.161 d	1.7E+14
Ar-43	5.37 m	7.5E-04	Hg-197	2.67 h	6.7E+13	Pb-204m	1.12 h	7.9E+13
Ar-44	11.87 m	2.3E-08	Hg-197m	23.8 h	3.5E+12	Pb-209	3.253 h	1.6E+12
Br-76	16.2 h	1.4E+10	Hg-199m	42.67 m	1.7E+12	Bi-195	3.05 m	3.7E+11
Br-77	2.38 d	6.4E+10	Hg-203	46.594 d	3.5E+11	Bi-195m	1.45 m	3.5E+11
Br-77m	4.28 m	3.2E+10	Hg-205	5.14 d	7.4E+10	Bi-196	5.133 m	1.1E+12
Br-78	6.46 m	1.6E+11	Tl-189	2.3 m	1.4E+11	Bi-197	9.33 m	2.6E+12
Br-80	17.68 m	6.7E+11	Tl-189m	1.4 m	1.1E+11	Bi-197m	5.04 m	2.4E+12
Br-80m	4.4205 h	3.3E+11	Tl-190	2.6 m	5.0E+11	Bi-198	10.3 m	3.7E+12
Br-82	1.47 d	9.7E+11	Tl-190m	3.7 m	3.8E+11	Bi-198m	11.55 m	5.9E+12
Br-82m	6.13 m	4.9E+11	Tl-191	5.22 m	3.6E+12	Bi-199	27 m	1.1E+13
Br-83	2.40 h	1.6E+12	Tl-192	9.6 m	4.6E+12	Bi-199m	24.7 m	9.2E+12
Br-84	31.8 m	6.3E+11	Tl-192m	10.8 m	2.9E+12	Bi-200	36.40 m	2.0E+13
Br-84m	6.0 m	3.9E+11	Tl-193	21.6 m	1.5E+13	Bi-200m	31 m	7.9E+12
Br-85	2.90 m	7.1E+11	Tl-193m	2.11 m	8.7E+12	Bi-201	1.8 h	2.8E+13
Kr-79	1.67 d	4.3E+11	Tl-194	33 m	1.8E+13	Bi-201m	59.1 m	2.0E+13
Kr-85m	4.480 h	4.4E+12	Tl-194m	32.8 m	7.6E+12	Bi-202	1.72 h	5.6E+13
Kr-87	1.27 h	2.8E+12	Tl-195	1.16 h	4.0E+13	Bi-203	11.76 h	7.2E+13
Kr-88	2.84 h	1.7E+12	Tl-196	1.84 h	4.2E+13	Bi-204	11.22 h	9.2E+13
I-119	27.6 m	1.9E+10	Tl-196m	1.41 h	1.1E+13	Bi-205	15.31 d	1.6E+14
I-120	1.27 h	2.9E+10	Tl-197	2.839 h	6.4E+13	Bi-206	6.243 d	1.9E+14
I-121	2.12 h	1.3E+11	Tl-198	5.3 h	7.5E+13	Bi-207	31.55 y	2.7E+12
I-122	3.63 m	2.2E+11	Tl-198m	1.87 h	1.2E+13	Bi-210	5.013 d	8.6E+12
I-123	13.27 h	3.5E+11	Tl-199	7.419 h	9.2E+13	Po-198	1.76 m	1.6E+12
I-124	4.1760 d	4.4E+11	Tl-200	1.087 d	1.1E+14	Po-199	5.48 m	1.2E+12
I-125	59.408 d	6.6E+11	Tl-201	3.038 d	1.2E+14	Po-199m	4.17 m	1.2E+12
I-126	13.11 d	5.6E+11	Tl-202	12.23 d	2.5E+13	Po-200	11.5 m	5.3E+12
I-128	24.98 m	8.2E+11	Tl-204	3.78 y	2.5E+12	Po-201	15.3 m	5.2E+12
I-130	12.36 h	6.7E+10	Tl-206	4.198 m	1.5E+13	Po-201m	8.9 m	3.4E+12
I-130m	8.84 m	3.6E+10	Tl-206m	3.74 m	7.5E+12	Po-202	44.7 m	1.3E+13
I-131	8.021 d	3.2E+10	Tl-207	4.77 m	5.4E+12	Po-203	36.7 m	1.3E+13
Xe-121	40.1 m	4.6E+09	Tl-208	3.053 m	7.7E+11	Po-204	3.531 h	1.7E+13
Xe-122	20.1 h	3.7E+04	Pb-192	3.5 m	1.6E+12	Po-205	1.66 h	1.9E+13
Xe-123	2.08 h	2.7E+07	Pb-193	2 m	3.3E+12	Po-206	8.8 d	2.9E+13
Xe-125	16.9 h	3.3E+11	Pb-194	12 m	1.0E+13	Po-207	5.8 h	2.1E+13
Xe-127	1.213 m	6.6E+11	Pb-195	15 m	7.6E+12	Po-208	2.898 y	1.8E+12
Cs-127	6.25 h	2.3E+10	Pb-195m	15 m	7.3E+12	Po-209	102.0 y	1.1E+10
Cs-128	3.66 m	4.1E+10	Pb-196	37 m	3.0E+13	Po-210	4.614 m	5.5E+12
Cs-129	1.336 d	1.0E+11	Pb-197	8 m	2.2E+13	At-203	7.4 m	5.0E+10
Cs-130	29.22 m	6.4E+10	Pb-197m	43 m	1.6E+13	At-205	26.9 m	1.1E+11
Cs-130m	3.46 m	3.2E+10	Pb-198	24 h	5.8E+13	At-206	30.6 m	6.4E+10
Cs-131	9.689 d	1.4E+11	Pb-199	1.5 h	6.5E+13	At-207	1.81 h	5.0E+10
Cs-132	6.479 d	4.6E+10	Pb-199m	12.2 h	2.5E+13	At-208	24.35 m	3.7E+10
Cs-134m	2.93 h	1.6E+10	Pb-200	21.5 h	9.4E+13	At-209	5.42 h	5.0E+10
Cs-135m	53 m	1.1E+10	Pb-201	9.331 h	1.1E+14			
Hg-194	444 y	3.5E+10	Pb-201m	1.017 m	4.1E+13			

[†] 単位：Bq

表 3.1.2 250 kW、5000 時間運転で鉛ビスマス中に生成される主な元素の生成量

元素	生成量 (g)
水銀	3.1E+00
タリウム	1.4E+00
ポロニウム	1.4E-01
カドミウム	4.0E-02
ルビジウム	1.5E-02
ヨウ素	1.2E-02
アスタチン	8.0E-03
臭素	6.2E-03
セシウム	6.9E-03

3.2 換気系への移行

漏洩した鉛ビスマスから換気系へ移行する可能性のある元素として、水銀、ハロゲン、希ガス、トリチウム²、その他の核反応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。

3.2.1 水銀

鉛ビスマスターゲット台車のキャッチパン上に漏洩した鉛ビスマス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および考え方を示す。

仮定 1 鉛ビスマスの漏洩直後の鉛ビスマスの表面温度は 550°C とし、その後も一定とする。

250 kW 運転時において鉛ビスマス循環系からターゲット容器に送り出された約 400°C の鉛ビスマスは、ターゲット中での陽子ビーム加熱によって局所的に 550°C まで上昇する。したがって、鉛ビスマスが漏洩した場合でもその最高温度は 550°C とすれば十分である。また、漏洩後の温度低下を考慮しないことによって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。

仮定 2 鉛ビスマス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。

鉛ビスマスが漏洩し空気に触れると表面に酸化膜が形成され、そのため鉛ビスマス中の水銀の蒸発が抑制される可能性があるが、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 A に示した方法により水銀の蒸発量を評価した。上記の仮定における水銀の蒸発量は 0.070 g/(m²·h) となる。漏洩した鉛ビスマスが、捕集面 6 m² のキャッチパン上に均一に拡がると仮定すると、空調が動作している 1 時間での全蒸発量は 0.42 g となる。

²鉛ビスマス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吸引摂取による人体への影響が大きい HTO で存在すると考える。HT と HTO の存在比およびそれらの移行挙動については今後の研究課題である。

放射化機器取扱室の空気は水銀吸着フィルターを通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4.2 mgの水銀が排気筒から放出される³。表3.2.1に排気筒から放出される水銀核種の放射能を示す。

表 3.2.1 排気筒から放出される水銀核種の放射能

核種	半減期	放射能 (Bq)
Hg-194	444 y	4.7E+07
Hg-195	9.9 h	6.6E+10
Hg-195m	23.8 h	8.6E+09
Hg-197	2.67 h	9.0E+10
Hg-197m	23.8 h	4.7E+09
Hg-199m	42.67 m	2.2E+09
Hg-203	46.594 d	4.6E+08
Hg-205	5.14 d	9.9E+07

3.2.2 ハロゲン

3.2.2.1 ヨウ素

核破碎生成物として発生するヨウ素は、鉛ビスマス中で化合物を形成し、二ヨウ化鉛 (PbI₂) および三ヨウ化ビスマス (BiI₃) になる。Neuhansen¹¹⁾により、鉛ビスマスにおける純物質のヨウ素の Henry 定数 $K_{H(I,LBE)}$ を

$$K_{H(I,LBE)} = 10^{-\frac{10407}{T} + 14.56} \quad (3.1)$$

と評価しているが、鉛ビスマス中のヨウ素の大部分は上述のように化合物として保持されている点、および式(3.1)よりも安全側の評価値となることを考慮して、参考文献2)では、PbI₂の分圧式

$$p_{PbI_2(\ell)}^{\circ} = 10^{-\frac{9087}{T} - 6.16 \log T + 31.897} \quad (3.2)$$

を $K_{H(I,LBE)}$ の評価式とすることを推奨しているため、本報告書でもこれを採用する。これより、水銀の場合と同一条件でのヨウ素の蒸発速度は 9.0×10^{-8} g/(m²·h) となる。したがって、キャッチパンの捕集面の面積 6 m² を考慮して、空調が動作している1時間での全蒸発量 0.54 μg のヨウ素が排気筒から放出される。表3.2.2に排気筒から放出されるヨウ素核種の放射能を示す。

3.2.2.2 臭素

核破碎生成物として発生する臭素は、鉛ビスマスと反応して化合物を形成し、二臭化鉛 (PbBr₂) および三臭化ビスマス (BiBr₃) になる。ここでは参考文献2)で推奨されているように、臭素-鉛ビスマス系はヨウ素-鉛ビスマス系と同じ振る舞いをすると仮定して、臭素の Henry 定数に対して

³PHITS/DCHAIN-SP2001より鉛ビスマス中の水銀の全生成質量は3.1 gと評価される。したがって、鉛ビスマス中で生成した全水銀量の0.13% (= 4.2 mg/3.1 g)が排気筒から放出される。

表 3.2.2 排気筒から放出されるヨウ素核種の放射能

核種	半減期	放射能 (Bq)
I-119	19.1 m	8.7E+05
I-120m	53 m	1.4E+06
I-121	2.12 h	5.9E+06
I-122	3.63 m	1.0E+07
I-123	13.27 h	1.6E+07
I-124	4.1760 d	2.1E+07
I-125	59.408 d	3.1E+07
I-126	13.11 d	2.7E+07
I-128	24.98 m	3.9E+07
I-130	12.36 h	3.2E+06
I-130m	8.84 m	1.7E+06
I-131	8.021 d	1.5E+06

も式 (3.2) と同じ式を用い、排気筒から放出される臭素核種の放射能を評価した。このときの臭素の蒸発速度は 6.1×10^{-8} g/(m²·h) となり、キャッチパン捕集面の面積を考慮すると、空調が動作している 1 時間での全蒸発量 0.37 μ g の臭素が排気筒から放出されることになる。表 3.2.3 に排気筒から放出される臭素核種の放射能を示す。

表 3.2.3 排気筒から放出される臭素核種の放射能

核種	半減期	放射能 (Bq)
Br-76	16.2 h	8.3E+05
Br-77	2.38 d	3.8E+06
Br-77m	4.28 m	1.9E+06
Br-78	6.46 m	9.5E+07
Br-80	17.68 m	4.0E+07
Br-80m	4.4205 h	2.0E+07
Br-82	1.47 d	5.8E+07
Br-82m	6.13 m	2.9E+07
Br-83	2.40 h	9.5E+07
Br-84	31.8 m	3.7E+07
Br-84m	6.0 m	2.3E+07
Br-85	2.90 m	4.2E+07

3.2.2.3 アスタチン

鉛ビスマス中のアスタチンは、主に核破砕反応で生成したヘリウム原子核とビスマスとの核破砕反応（二次反応）により生成される。



アスタチン-鉛ビスマス系に関する記述は参考文献 2) になく、その化学的性質は不明だが、同族のヨウ素および臭素に類似していると考えられることから、アスタチンの Henry 定数に対しても

式(3.2)と同一の式を用いて排気筒から放出されるアスタチン核種の放射能を計算した。このときのアスタチンの蒸発速度は 4.9×10^{-8} g/(m²·h) となり、キャッチパンの捕集面の面積を考慮すると、空調が動作している1時間での全蒸発量 0.29 μg のアスタチンが排気筒から放出されることになる。表 3.2.4 に排気筒から放出されるアスタチン核種の放射能を示す。

表 3.2.4 排気筒から放出されるアスタチン核種の放射能

核種	半減期	放射能 (Bq)
At-203	7.4 m	1.8E+06
At-205	26.9 m	3.8E+06
At-206	30.6 m	2.3E+06
At-207	1.81 h	1.8E+06
At-208	1.63 h	1.3E+06
At-209	5.41 h	1.8E+06

3.2.3 希ガス

鉛ビスマス中で核破碎生成物として発生する希ガス（アルゴン、クリプトンおよびキセノン）は、膨張タンク内のカバーガス（アルゴン雰囲気）に連続的に放出される。漏洩した鉛ビスマス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、漏洩した鉛ビスマス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。

1. 発生した希ガスのうち、膨張タンクのカバーガスに放出されずに鉛ビスマス中に残存する割合
2. 漏洩鉛ビスマスからの希ガス放出量

1. については、鉛ビスマスからのカバーガスへの希ガスの移行を1次元半無限物質からの拡散として評価し、これを考慮して鉛ビスマス中に残存する放射能を評価することとする。また、2. については、鉛ビスマスが配管の破損部分などから勢いをもって漏出する場合を想定して、漏洩した鉛ビスマス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、鉛ビスマス *B*（液相）からカバーガス（気相）への希ガス *A*（以下「ガス」とする）の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、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（ガス濃度一様の状態）にランダムに更新される（表面更新説）。

まず、**条件 1** および **条件 2** を考慮して拡散方程式を解く。解くべき微分方程式は、

$$\frac{\partial C_A(x,t)}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A(x,t)}{\partial x^2} \quad (3.4)$$

で表される。ここで、 $C_A(x,t)$ は、位置 x および時刻 t でのガス濃度、 D_{AB} は液相 B 中でのガス拡散係数である。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 $C_A(x,0) = C_0$ 、境界条件 $C_A(0,t) = 0$ および $C_A(\infty,t) = C_0$ を考慮して解くと、鉛ビスマス（液相）内の濃度分布は

$$\frac{C_A(x,t)}{C_0} = \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{AB}t}} \right) \quad (3.5)$$

となる⁴。これより、時刻 t における放出速度（単位時間、単位面積当たりの放出量） q_A は

$$q_A = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\sqrt{\frac{D_{AB}}{\pi t}} C_0 \quad (3.6)$$

となる（負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、ガスの放出速度は $1/\sqrt{t}$ に比例して減少する。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。 $\phi(\tau)$ は単位時間当たり $s\phi(\tau)$ だけ減少するので、

$$\frac{d\phi}{d\tau} = -s\phi \quad (3.7)$$

と書ける。また $\phi(\tau)$ を $\tau = 0$ から $\tau = \infty$ まで積分すると単位面積になるので

$$\int_0^\infty \phi d\tau = 1 \quad (3.8)$$

が成り立つ。これらの式から

$$\phi = se^{-s\tau} \quad (3.9)$$

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

$$q_s = \int_0^\infty q(\tau)\phi(\tau)d\tau = -C_0\sqrt{sD_{AB}} \quad (3.10)$$

となり⁵、時間 t に依存しない値となる。

膨張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

$$Q = Sq_s = S \frac{n_0}{LS} \sqrt{sD_{AB}} = n_0 \frac{\sqrt{sD_{AB}}}{L} \quad (3.11)$$

⁴導出過程は付録 B を参照。

⁵ $\int_0^\infty \frac{e^{-s\tau}}{\sqrt{\pi\tau}} = \frac{1}{\sqrt{s}}$ を用いた。

となつて、

$$\beta \equiv \frac{\sqrt{sD_{AB}}}{L} \quad (3.12)$$

を定数として希ガス量 n_0 に比例する。

拡散係数 D_{AB} の値については、次に示す Stokes-Einstein の式から概算して求めた。

$$\frac{D_{AB}\mu_B}{kT} = \frac{1}{6\pi R_A}, \quad \text{または} \quad \frac{1}{4\pi R_A} \quad (3.13)$$

ここで、 μ_B は媒質の粘度、 k は Boltzmann 定数 (1.38×10^{-23} J/K)、 T は絶対温度、 R_A は溶質粒子 A の半径である。左辺の分子側にある定数については、溶質粒子の表面が全く滑らない (No-slip 条件) と仮定した場合は 6、完全に滑る (Complete slip 条件) と仮定した場合は 4 になる。この式は液体金属中の自己拡散および相互拡散に対してもオーダー的にほぼ正しい値を与えることがわかっている。以下では、Complete slip 条件での Stokes-Einstein の式 (定数が 4 の式) を使って、鉛ビスマス中の希ガスの拡散係数の大まかな評価を行う。

鉛ビスマスに対する希ガスの拡散係数を評価する。鉛ビスマスの温度は 550°C ($T = 823$ K) とする。鉛ビスマスの粘度は、参考文献 2) の評価式

$$\mu_B = 4.94 \times 10^{-4} \cdot \exp\left(\frac{754.1}{T}\right) \quad (3.14)$$

より、 550°C では $\mu_B = 1.98 \times 10^{-4}$ (Pa·s) となる。溶質粒子の半径 R_A は、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し、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。

$$2R_A = \left(\frac{V_A}{N_A}\right)^{1/3} \quad (3.15)$$

ここで、 V_A は鉛ビスマス 1 mol 当りの容積、 N_A は Avogadro 定数 (6.02×10^{23} mol $^{-1}$) である。希ガスの代表としてキセノンを選ぶと、密度 2.95 g/cm 3 、原子量 131.3 g/mol から、 $V_A = 131.3/2.95 = 44.5$ cm 3 /mol となり、 $R_A = 2.1 \times 10^{-8}$ cm となる。これらを使って、

$$D_{AB} = \frac{kT}{4\pi\mu_B R_A} \sim 2.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s} \quad (3.16)$$

と求めることができる。同様に、アルゴンおよびクリプトンの D_{AB} はそれぞれ 2.5×10^{-4} cm 2 /s および 2.4×10^{-4} cm 2 /s となる。

また s については、鉛ビスマス循環系の長さ 42.5 m および流速 1 m/s より、 42.5 s で全鉛ビスマスが循環系を一周するので、接触面については少なくとも 42.5 s に 1 回は更新されるとした。 L については膨張タンク実機のおおよその値として $L = 1$ m とした。これらを式に代入して計算すると $\beta = 2.4 \times 10^{-5}$ 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 $T_{1/2}^\beta = \ln 2/\beta \sim 8$ 時間となる (以下、 β を「ガス放出減少率」、 $T_{1/2}^\beta = \ln 2/\beta$ を「ガス

放出半減期」とよぶ)。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。以下ではこれを数学的に示す。

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

$$\frac{dN_i}{dt} = R_i - (\lambda_i + \beta_i)N_i \quad (3.17)$$

から求められる。ここで

$N_i(t)$ 時間 t で液相中で残存する核種 i の原子核数

R_i 単位時間当たりの核種 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

$$N_i(t) = \frac{1}{\lambda_i + \beta_i} R_i \left(1 - e^{-(\lambda_i + \beta_i)t}\right) \quad (3.18)$$

となる。液相に残存する核種 i の放射能は

$$A_i = \lambda_i N_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \beta_i} R_i \left(1 - e^{-(\lambda_i + \beta_i)t}\right) \quad (3.19)$$

となる。この式を用いて、想定漏洩量 0.1 m^3 の鉛ビスマス中に含まれる希ガスの放射能 (250 kW、5000 時間運転後) を計算した。計算結果を表 3.2.5 に示す。表には、全放射能 (液相と気相にある全放射能) に対する液相中に残存する放射能の割合 (残存率) の値も示している。ここで、核種 i の全生成放射能 A_i^{all} は近似的に

$$A_i^{\text{all}} = R_i (1 - \exp(-\lambda_i t)) \quad (3.20)$$

である。鉛ビスマス中に残存する式 (3.19) で表されるので、残存率 $A_i^{\text{in}}/A_i^{\text{all}}$ は

$$A_i^{\text{in}}/A_i^{\text{all}} = \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \beta_i)} \cdot \frac{(1 - \exp(-(\lambda_i + \beta_i)t))}{(1 - \exp(-\lambda_i t))} \quad (3.21)$$

で計算される。希ガスの中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。

3.2.3.1 トリチウム

鉛ビスマス中に発生したトリチウムも、希ガスと同様膨張タンク内のカバーガスに放出される。希ガスと同様の手法によりトリチウム⁶のガス放出定数は $\beta = 2.6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ となり、トリチウム

⁶ここではトリチウムはすべて水分子 (HTO) として存在すると仮定した。

表 3.2.5 排気筒から放出される希ガス核種の放射能

核種	半減期	残存率 (%)	放射能 (Bq)
Ar-41	1.822 h	81.2	5.1E-04
Ar-43	5.37 m	98.9	7.4E-04
Ar-44	11.87 m	97.6	2.2E-08
Kr-79	1.46 d	18.7	8.1E+10
Kr-85m	4.480 h	64.3	2.9E+12
Kr-87	1.27 h	86.4	2.4E+12
Kr-88	2.84 h	74.0	1.3E+12
Xe-121	40.1 m	92.6	4.3E+09
Xe-122	20.1 h	29.5	1.1E+04
Xe-123	2.08 h	80.2	2.1E+07
Xe-125	16.9 h	33.2	1.1E+11
Xe-127	36.4 d	1.0	6.5E+09

の崩壊定数 $\lambda = 1.78 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ と比べると、オーダーで4桁大きい。したがって、ガス放出を考慮した放射能生成の式 (3.19) は

$$A_T \simeq \frac{\lambda_T}{\beta} R_T (1 - e^{-\beta t}) \quad (3.22)$$

と近似される。この式より、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4桁小さな値である。これと同時に、ガス放出半減期程度のオーダーの時間、すなわち数時間で飽和値に達することがわかる。希ガスと同様に、液中に含まれるトリチウムの全量が気中に移行すると仮定したときの排気筒から放出されるトリチウムの放射能を表 3.2.6 に示す。

表 3.2.6 排気筒から放出されるトリチウムの放射能

核種	半減期	残存率 (%)	放射能 (Bq)
T (HTO)	12.32 y	0.21	3.0E+10

3.2.3.2 その他の核反応生成物

その他の核反応生成物については、鉛ビスマス中で化合物を作るかまたは単体で存在していると考えられる。例えば、鉛ビスマス標的に特有のポロニウムは、液体鉛中で鉛ポロニウム化物 PbPo を形成するが、ポロニウム-ビスマス系およびポロニウム-鉛-ビスマス系での化学的性質は明らかにされていない。しかしながら、いずれにしてもそれらの融点および沸点は水銀（融点： -38.83°C 、沸点： 356.7°C ）と比べて高く、 550°C であっても蒸発速度は極めて小さいと考えられる。例として表 3.2.7 に、付録 A で示した方法で評価した核反応生成物（鉛、ビスマス、タリウム、ポロニウムおよびセシウム）の蒸発量および排気筒から放出される量を示す。これらの中で蒸発速度の最も大きいビスマスでも、その値は水銀よりも2桁程度低く、したがって、これらの核種の排気

筒から放出される放射能は水銀に比べて無視できるほど小さい。表 3.2.8 に、排気筒から放出される上記核種の放射能を示す。

表 3.2.7 鉛ビスマス中の鉛、ビスマス、タリウム、ポロニウムおよびセシウムの蒸発量および排気筒から放出される量

元素	融点 (°C)	沸点 (°C)	蒸発速度 (g/(m ² ·h))	蒸発量 (μg)	除染係数 (-)	排気筒から放出される量 (μg)
鉛	327.5	1749	1.5E-05	92	1	92
ビスマス	271.4	1564	6.9E-05	410	1	410
タリウム	303.8	1473	1.7E-09	0.0093	1	0.0093
ポロニウム	253.8	962	1.8E-09	0.011	1	0.011
セシウム	28.44	670.8	5.7E-09	0.035	1	0.035

3.3 実効線量の評価

3.3.1 実効線量の評価方法

排気筒から大気中に放出された気体状あるいは微粒子状物質は、風とともに移動しながら拡散し、希釈されると考えられる。ここでは排気筒から放出された放射性物質による外部被ばくおよび内部被ばくの評価方法について述べる。

3.3.1.1 外部被ばくによる実効線量

放射性物質からのγ線による実効線量は、次式により計算する。

$$H_{\gamma} = K_2 \cdot \sum Q_{\gamma}^i \cdot \left(\frac{D}{Q_{\gamma}} \right) \quad (3.23)$$

ここで

H_{γ} γ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 μSv/μGy)

Q_{γ}^i 核種 i のγ線換算放出量 (Bq·MeV)

D/Q_{γ} 相対線量

である。γ線換算放出量 Q_{γ}^i については、以下の式で計算した。

$$Q_{\gamma}^i = \sum A^i E_{\text{eff}}^i \quad (3.24)$$

A^i 核種 i の放出量 (Bq)

E_{eff}^i 核種 i のγ線実効エネルギー (MeV)

表 3.2.8 排気筒から放出されるセシウム、タリウム、鉛、ビスマスおよびポロニウム核種の放射能

核種	半減期	放射能 (Bq)	核種	半減期	放射能 (Bq)
Cs-127	6.25 h	1.2E+06	Pb-200	21.5 h	1.1E+05
Cs-128	3.66 m	2.0E+06	Pb-201	9.331 h	1.3E+05
Cs-129	1.336 d	5.0E+06	Pb-201m	1.017 m	4.8E+04
Cs-130	29.22 m	3.2E+06	Pb-202m	3.531 h	5.2E+04
Cs-130m	3.46 m	1.6E+06	Pb-203	1.161 d	2.0E+05
Cs-131	9.689 d	7.0E+06	Pb-204m	1.12 h	9.2E+04
Cs-132	6.479 d	2.3E+06	Pb-209	3.253 h	1.9E+03
Cs-134m	2.93 h	8.0E+05	Bi-195	3.05 m	1.5E+03
Cs-135m	53 m	5.5E+05	Bi-195m	1.45 m	1.5E+03
Tl-189	2.3 m	9.7E+02	Bi-196	5.13 m	4.6E+03
Tl-189m	1.4 m	7.6E+02	Bi-197	9.33 m	1.1E+04
Tl-190	2.6 m	3.5E+03	Bi-197m	5.04 m	1.0E+04
Tl-190m	3.7 m	2.6E+03	Bi-198	10.3 m	1.5E+04
Tl-191	5.22 m	2.5E+04	Bi-198m	11.6 m	2.5E+04
Tl-192	9.6 m	3.2E+04	Bi-199	27 m	4.6E+04
Tl-192m	10.8 m	2.0E+04	Bi-199m	24.70 h	3.8E+04
Tl-193	21.6 m	1.0E+05	Bi-200	36.4 m	8.4E+04
Tl-193m	2.11 m	6.0E+04	Bi-200m	31 m	3.3E+04
Tl-194	33 m	1.2E+05	Bi-201	1.72 h	1.2E+05
Tl-194m	32.8 m	5.2E+04	Bi-201m	57.5 m	8.4E+04
Tl-195	1.16 h	2.8E+05	Bi-202	1.71 h	2.3E+05
Tl-196	1.84 h	2.9E+05	Bi-203	11.76 h	3.0E+05
Tl-196m	1.41 h	7.6E+04	Bi-204	11.22 h	3.8E+05
Tl-197	2.839 h	4.4E+05	Bi-205	15.31 d	6.7E+05
Tl-198	5.3 h	5.2E+05	Bi-206	6.243 d	7.9E+05
Tl-198m	1.87 h	8.3E+04	Bi-207	31.55 y	1.1E+04
Tl-199	7.419 h	6.4E+05	Bi-210	5.012 d	3.6E+04
Tl-200	1.087 d	7.6E+05	Po-198	1.76 m	1.2E+03
Tl-201	3.038 d	8.3E+05	Po-199	5.48 m	9.1E+02
Tl-202	12.23 d	1.7E+05	Po-199m	4.17 m	9.1E+02
Tl-204	3.78 m	1.7E+04	Po-200	11.5 m	4.0E+03
Tl-206	4.198 m	1.0E+05	Po-201	15.3 m	3.9E+03
Tl-206m	3.74 m	5.2E+04	Po-201m	8.9 m	2.6E+03
Tl-207	4.77 m	3.7E+04	Po-202	44.7 m	9.8E+03
Tl-208	3.053 m	5.3E+03	Po-203	36.7 m	9.8E+03
Pb-192	3.5 h	1.9E+03	Po-204	3.531 h	1.3E+04
Pb-193	2 m	3.8E+03	Po-205	1.66 h	1.4E+04
Pb-194	12 m	1.2E+04	Po-206	8.8 d	2.2E+04
Pb-195	15 m	8.8E+03	Po-207	5.8 h	1.6E+04
Pb-195m	15 m	8.5E+03	Po-208	2.898 y	1.4E+03
Pb-196	37 m	3.5E+04	Po-209	102.0 y	8.3E+00
Pb-197	8 m	2.6E+04	Po-210	4.614 m	4.2E+03
Pb-197m	43 m	1.9E+04			
Pb-198	24 h	6.7E+04			
Pb-199	1.5 h	7.5E+04			
Pb-199m	12.2 h	2.9E+04			

γ 線実効線量エネルギー E_{eff}^i については、核種の崩壊データ¹²⁾ から以下の式を使って求めた。

$$E_{\text{eff}}^i = \sum_j \varepsilon_j^i f_j^i \quad (3.25)$$

ε_j^i 核種 i の j 番目の γ 線エネルギー (MeV)

f_j^i 核種 i の j 番目の γ 線放出率

である。**表 3.3.1** に核種ごとの γ 線実効エネルギーを示す。 D/Q_γ の評価については後述する。

表 3.3.1 γ 線実効エネルギー

核種	半減期	E_{eff} (MeV)	核種	半減期	E_{eff} (MeV)	核種	半減期	E_{eff} (MeV)
T	12.32 y	—	Hg-197m	23.8 h	0.067	Bi-195m	1.45 m	—
Ar-41	1.822 h	1.284	Hg-199m	42.67 m	0.134	Bi-196	5.13 m	4.336
Ar-43	5.37 m	1.490	Hg-203	46.612 d	0.228	Bi-197	9.33 m	—
Ar-44	11.87 m	1.909	Tl-189	2.3 m	—	Bi-197m	5.04 m	—
Br-76	16.2 h	2.726	Tl-189m	1.4 m	—	Bi-198	10.3 m	—
Br-77	2.38 d	0.307	Tl-190	2.6 m	1.029	Bi-198m	11.6 m	0.098
Br-77m	4.28 m	0.015	Tl-190m	3.7 m	2.140	Bi-199	27 m	—
Br-78	6.46 m	1.033	Tl-191	5.22 m	—	Bi-199m	24.70 h	1.779
Br-80	17.68 m	0.075	Tl-192	9.6 m	—	Bi-200	36.4 m	2.227
Br-80m	4.4205 h	0.015	Tl-192m	10.8 m	—	Bi-200m	31 m	1.473
Br-82	1.47 d	2.659	Tl-193	21.6 m	—	Bi-201	1.72 h	1.582
Br-83	2.40 h	0.007	Tl-193m	2.11 m	0.247	Bi-201m	57.5 m	—
Br-84	6.13 d	1.757	Tl-194	33 m	1.033	Bi-202	1.71 h	2.396
Br-84m	6.0 m	2.768	Tl-194m	32.8 m	2.178	Bi-203	11.76 h	3.124
Br-85	2.9 m	0.061	Tl-195	1.16 h	1.168	Bi-204	11.22 h	5.478
Kr-79	1.46 d	0.286	Tl-196	1.84 h	1.424	Bi-205	15.31 d	1.686
Kr-85m	4.480 h	0.157	Tl-196m	1.41 h	1.827	Bi-206	6.243 d	3.185
Kr-87	1.27 h	0.791	Tl-197	2.839 h	0.384	Bi-207	31.55 y	3.329
Kr-88	2.84 h	1.950	Tl-198	5.3 h	1.928	Bi-210	5.012 d	0.252
I-119	19.1 m	0.927	Tl-198m	1.87 h	1.376	Po-198	1.76 m	—
I-120	53 m	2.099	Tl-199	7.419 h	0.179	Po-199	5.48 m	—
I-121	2.12 h	0.379	Tl-200	1.087 d	0.453	Po-199m	4.17 m	0.012
I-122	3.63 m	0.957	Tl-201	3.038 d	0.862	Po-200	11.5 m	—
I-123	13.27 h	0.148	Tl-202	12.23 d	0.406	Po-201	15.3 m	1.063
I-124	4.1760 d	1.101	Tl-204	3.78 y	—	Po-201m	8.9 m	0.235
I-125	59.408 d	0.002	Tl-206	4.198 m	< 0.001	Po-202	44.7 m	0.001
I-126	13.11 d	0.424	Tl-206m	3.74 m	2.397	Po-203	36.7 m	1.292
I-128	24.98 m	0.066	Tl-207	4.77 m	0.002	Po-204	3.531 h	1.162
I-130	12.36 h	2.136	Tl-208	3.053 m	3.375	Po-205	1.66 h	1.385
I-130m	8.84 m	0.104	Pb-192	3.5 h	0.902	Po-206	8.8 d	1.062
I-131	8.021 d	0.380	Pb-193	2 m	1.052	Po-207	5.8 h	1.204
Xe-121	40.1 m	0.974	Pb-194	12 m	0.953	Po-208	2.898 y	< 0.001
Xe-122	20.1 h	0.068	Pb-195	15 m	—	Po-209	102.0 y	0.005
Xe-123	2.08 h	0.410	Pb-195m	15 m	1.445	Po-210	4.614 m	< 0.001
Xe-125	16.9 h	0.269	Pb-196	37 m	0.412	At-203	7.4 m	0.541
Xe-127	36.4 d	0.279	Pb-197	8 m	1.349	At-205	26.9 m	1.217
Cs-127	6.25 h	0.407	Pb-197m	43 m	1.078	At-206	30.6 m	2.293
Cs-128	3.66 m	0.883	Pb-198	24 h	0.362	At-207	1.81 h	1.843
Cs-129	1.336 d	0.247	Pb-199	1.5 h	0.956	At-208	1.63 h	2.730
Cs-130	29.22 m	0.490	Pb-199m	12.2 h	0.085	At-209	5.41 h	2.141
Cs-135m	53 m	1.597	Pb-200	21.5 h	0.126			
Cs-130m	3.46 m	0.041	Pb-201	9.331 h	0.682			
Cs-131	9.689 d	—	Pb-201m	1.017 m	—			
Cs-132	6.479 d	0.691	Pb-202m	3.531 h	1.949			
Cs-134m	2.93 h	0.016	Pb-203	1.161 d	0.144			
Hg-195	9.9 h	0.142	Pb-204m	1.12 h	2.081			
Hg-195m	23.8 h	0.262	Pb-209	3.253 h	—			
Hg-197	2.67 d	0.016	Bi-195	3.05 m	—			

3.3.1.2 内部被ばくによる実効線量

放射性物質の吸入摂取による実効線量は、以下の式から求めた。

$$H_I = \sum_i K_I^i \cdot M \cdot Q^i \cdot \frac{\chi}{Q} \quad (3.26)$$

H_I 呼吸による実効線量 (mSv)

K_I^i 核種 i の吸入摂取による実効線量係数 (mSv/Bq)

M 成人呼吸率 (= 1.2 m³/h)

Q^i 核種 i の大気放出量 (Bq)

χ/Q 相対濃度 (h/m³)

表 3.3.2 および表 3.3.3 に核種ごとの吸入摂取による実効線量係数⁷を示す。 χ/Q の評価については後述する。

⁷実効線量係数は、「放射線を放出する同位元素の数量を定める件」(平成十二年科学技術庁告示第五号)

表 3.3.2 トリチウム、水銀、ハロゲン、セシウムおよびタリウム核種の吸入摂取による実効線量係数

核種	半減期	換算係数 (mSv/Bq)	核種	半減期	換算係数 (mSv/Bq)
T	12.32 y	1.8E-08	Cs-127	6.25 h	4.0E-09
Hg-195	9.9 h	1.4E-06	Cs-128	3.66 m	5.7E-09
Hg-195m	23.8 h	8.2E-06	Cs-129	1.336 d	8.1E-08
Hg-197	2.67 d	4.4E-06	Cs-130	29.22 m	1.5E-08
Hg-197m	23.8 h	5.8E-06	Cs-130m	3.46 m	—
Hg-199m	42.67 m	1.8E-07	Cs-131	9.69 d	4.5E-08
Hg-203	46.61 d	7.0E-06	Cs-132	6.48 d	3.8E-07
Br-76	16.2 h	5.8E-07	Cs-134m	2.93 h	2.6E-08
Br-77	2.38 d	1.3E-07	Cs-135m	53 m	2.4E-08
Br-77m	4.28 m	—	Tl-189	2.3 m	—
Br-78	6.46 m	1.4E-08	Tl-189m	1.4 m	—
Br-80	17.68 m	1.7E-08	Tl-190	2.6 m	—
Br-80m	4.421 h	1.0E-07	Tl-190m	3.7 m	—
Br-82	1.47 d	8.8E-08	Tl-191	5.22 m	—
Br-82m	6.13 m	—	Tl-192	9.6 m	—
Br-83	2.40 h	6.7E-08	Tl-192m	10.8 m	—
Br-84	31.8 m	6.2E-08	Tl-193	21.6 m	—
Br-84m	6.0 m	1.7E-08	Tl-193m	2.11 m	—
Br-85	2.90 m	—	Tl-194	33 m	8.9E-09
I-119	19.1 m	5.6E-08	Tl-194m	32.8 m	3.6E-08
I-120m	53 m	3.0E-07	Tl-195	1.16 h	3.0E-08
I-121	2.12 h	8.6E-08	Tl-196	1.84 h	5.7E-08
I-122	3.63 m	1.8E-08	Tl-196m	1.41 h	—
I-123	13.27 h	2.1E-07	Tl-197	2.84 h	2.7E-08
I-124	4.176 d	1.2E-05	Tl-198	5.3 h	1.2E-07
I-125	59.41 d	1.4E-05	Tl-198m	1.87 h	7.3E-08
I-126	13.11 d	2.6E-05	Tl-199	7.419 h	3.7E-08
I-128	24.98 m	9.6E-05	Tl-200	1.087 d	2.5E-07
I-130	12.36 h	1.9E-06	Tl-201	3.038 d	7.6E-08
I-130m	8.84 m	—	Tl-202	12.23 d	3.1E-07
I-131	8.021 d	2.0E-05	Tl-204	3.78 y	6.2E-07
At-203	7.4 m	—	Tl-206	4.20 m	8.5E-09
At-205	26.9 m	6.7E-07	Tl-206m	3.74 m	—
At-206	30.6 m	—	Tl-207	4.77 m	6.2E-09
At-207	1.81 h	1.9E-06	Tl-208	3.05 m	8.5E-09
At-208	24.35 m	3.7E-07			
At-209	5.42 h	2.6E-06			

表 3.3.3 鉛、ビスマスおよびポロニウム核種の吸入摂取による実効線量係数

核種	半減期	換算係数 (mSv/Bq)	核種	半減期	換算係数 (mSv/Bq)
Pb-192	3.5 h	—	Bi-202	1.71 h	1.0E-07
Pb-193	2 m	—	Bi-203	11.76 h	4.5E-07
Pb-194	12 m	—	Bi-204	11.22 h	5.7E-07
Pb-195	15 m	—	Bi-205	15.31 d	1.0E-06
Pb-195m	15 m	3.0E-08	Bi-206	6.243 d	2.1E-07
Pb-196	37 m	3.1E-08	Bi-207	31.55 y	3.2E-06
Pb-197	8 m	6.8E-09	Bi-210	5.012 d	6.0E-05
Pb-197m	43 m	4.6E-08	Po-198	1.76 m	—
Pb-198	24 h	8.7E-08	Po-199	5.48 m	—
Pb-199	1.5 h	4.8E-08	Po-199m	4.17 m	—
Pb-199m	12.2 h	—	Po-200	11.5 m	—
Pb-200	21.5 h	2.6E-07	Po-201	15.3 m	—
Pb-201	9.331 h	1.2E-07	Po-201m	8.9 m	—
Pb-201m	1.017 m	—	Po-202	44.7 m	—
Pb-202m	3.531 h	1.2E-07	Po-203	36.7 m	6.1E-08
Pb-203	1.161 d	1.6E-07	Po-204	3.531 h	4.8E-07
Pb-204m	1.12 h	4.1E-07	Po-205	1.66 h	8.9E-08
Pb-209	3.253 h	3.2E-08	Po-206	8.8 d	3.9E-05
Bi-195	3.05 m	—	Po-207	5.8 h	1.5E-07
Bi-195m	1.45 m	—	Po-208	2.898 y	2.6E-03
Bi-196	5.13 m	—	Po-209	102.0 y	2.5E-03
Bi-197	9.33 m	—	Po-210	4.614 m	2.2E-03
Bi-197m	5.04 m	—			
Bi-198	10.3 m	—			
Bi-198m	11.6 m	—			
Bi-199	27 m	—			
Bi-199m	24.70 h	—			
Bi-200	36.4 m	5.6E-08			
Bi-200m	31 m	—			
Bi-201	1.72 h	1.1E-07			
Bi-201m	57.5 m	—			

3.3.2 大気拡散の評価

相対濃度 χ/Q および相対線量 D/Q_γ の評価は、「発電用原子炉の安全解析に関する気象指針」の「VI. 想定事故時の大気拡散の解析方法」に従った。計算では、放出源からの距離をパラメータにとり、異なる大気拡散条件（気象条件）で相対濃度、相対線量が最大となる値を採用した。図 3.3.1 に核変換実験施設の周辺図を示すように、放出源から事業所境界までの最短距離は200 mである。以下に、具体的な評価法、評価条件および評価結果などについて述べる。

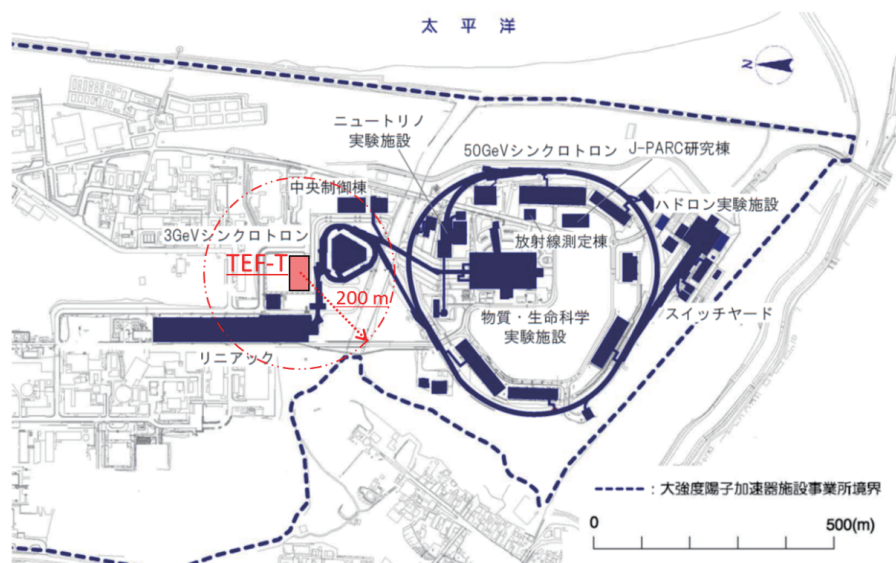


図 3.3.1 核変換実験施設周辺図

3.3.2.1 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⁸。

$$\frac{\chi}{Q} = \frac{1}{\pi \cdot 3600 \cdot \Sigma_y \Sigma_z U} \exp\left(-\frac{y^2}{2\Sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{H^2}{2\Sigma_z^2}\right) \quad (3.27)$$

χ/Q 評価地点の相対濃度 (h/m^3)

Σ_y 建家の影響を考慮した y 方向の拡がりパラメータ (m)

Σ_z 建家の影響を考慮した z 方向の拡がりパラメータ (m)

H 放出源の有効高さ (m)

U 風速 (m/s)

⁸ここでは、風向、風速、その他の気象条件が全て一様に定常であって、放射性物質が放出源から定常的に放出され、かつ地形が平坦であるとした場合に、放射性物質の空間濃度分布が水平方向、鉛直方向ともに正規分布になることを仮定している。

座標軸については、排気筒の地上に対する接地面を原点とし、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 $H = 0$ m とした。したがって、評価点の座標は $(x, y, 0)$ となる。また、 Σ_y と Σ_z は以下の式から求めた。

$$\begin{aligned}\Sigma_y &= \sqrt{\sigma_y^2 + cA/\pi} \\ \Sigma_z &= \sqrt{\sigma_z^2 + cA/\pi}\end{aligned}\tag{3.28}$$

σ_y 濃度分布の y 方向の拡がりパラメータ (m)

σ_z 濃度分布の z 方向の拡がりパラメータ (m)

A 建物当の風向方向の投影面積 (m^2)

c 形状係数

σ_y と σ_z は、大気安定度ごとに以下の式より算出した。

$$\begin{aligned}\sigma_y &= 0.67775 \theta_0 x(5 - \log x) \\ \sigma_z &= \sigma_0 x^{a_0 + a_1 \log x + a_2 (\log x)^2}\end{aligned}\tag{3.29}$$

ここで、 x km は風下距離である。また、 σ_0 、 θ_0 、 a_0 、 a_1 および a_2 は、大気安定度によって決まる定数である。その値を表 3.3.4 に示す。ただし、 σ_z が 1000 m を超える場合はすべて 1000 m とした。なお、大気安定度は、表 3.3.5 に示すように、敷地を代表する地上風の当該時刻の風速並びに日射量および放射収支量をもとに A から F の 6 種類に区分される。図 3.3.3 および図 3.3.4 に、それぞれ σ_y および σ_z の値を各大気安定度について x の関数として示す。

表 3.3.4 定数 θ_0 、 σ_0 、 a_1 、 a_2 および a_3 の大気安定度ごとの値

大気安定度	σ_y, θ_0	$\sigma_z, x > 0.2$ km				$\sigma_z, x < 0.2$ 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	1.4132	0.49523	0.12772	83.7	0.894
C	30	58.1	0.8916	-0.001649	0.0	58.0	0.891
D	20	31.7	0.7626	-0.095108	0.0	33.0	0.854
E	15	22.2	0.7117	-0.12697	0.0	24.4	0.854
F	10	13.8	0.6582	-0.1227	0.0	15.5	0.822

放出源の有効高さ H は、排気筒の地上高さ、吹き上げ高さ、建家および地形による影響等を総合的に考慮して定める必要がある。本施設の排気筒高さは 40 m、接地面標高は TP8.9 m である。周辺境界外で最も高い地点の標高は 38 m であるため、10 m の吹き上げ高さ⁹を考慮すると、排気筒の有効高さは 21 m となるが、本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プルームが建家の風下方向に巻き込まれる可能性がある。そこで本報告書では、安全側の条件として地上放出（排気筒の有効高さを 0 m）を評価条件とした。

⁹吹き上げ高さ ΔH については、吹き出し速度 $W = 4.5$ m/s、風速 $U = 2.6$ m/s、排気筒出口直径 $D = 2$ m とし、次の式から計算した。 $\Delta H = 3(W/U)D$

表 3.3.5 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		
	$T \geq 0.60$	$0.60 > T$ ≥ 0.30	$0.30 > T$ ≥ 0.15	$0.15 > T$	$Q \geq -0.020$	$-0.020 > Q$ ≥ -0.040	$-0.040 > Q$
$U < 2$	A	A-B	B	D	D	G	G
$2 < U < 3$	A-B	B	C	D	D	E	F
$3 < U < 4$	B	B-C	C	D	D	E	F
$4 < U < 6$	B	C-D	C	D	D	E	F
$6 < U$	C	D	D	D	D	D	D

建家投影面積 A は、保守的に評価するために風向によらず 417 m² (建家の西側および北側の面積) とした。 c については 1/2 とした¹⁰。このとき、参考文献 13) を参考に、静穏時の風速を便宜上 1.0 m/s とした¹¹。

これらの式を使って風下方向の距離の関数として求めた相対濃度を図 3.3.2 に示す。被ばく評価に用いる相対濃度の値として、排気筒から 200 m の距離で相対濃度が最も高くなる大気安定度 F のときの値 8.61×10^{-7} h/m³ を用いた。

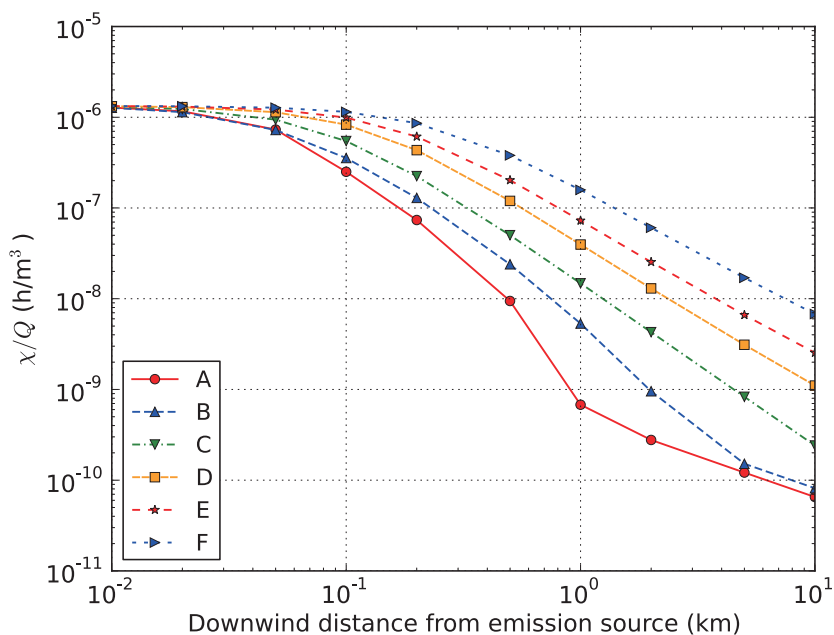


図 3.3.2 風速 1 m/s 時の地上放出での風下方向の相対濃度分布

¹⁰参考文献 13) の「解説」、「V. 平常時の大気拡散の解析方法」、「1. 空間濃度の分布の計算」を参照

¹¹静穏時における拡散に関して、参考文献 13) の「解説」、「VII. 静穏時の取扱い」には、以下の記述がある。「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ことが多く、また、静穏時における放射性雲からの γ 線被ばくも極端に高い実測値が得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。」

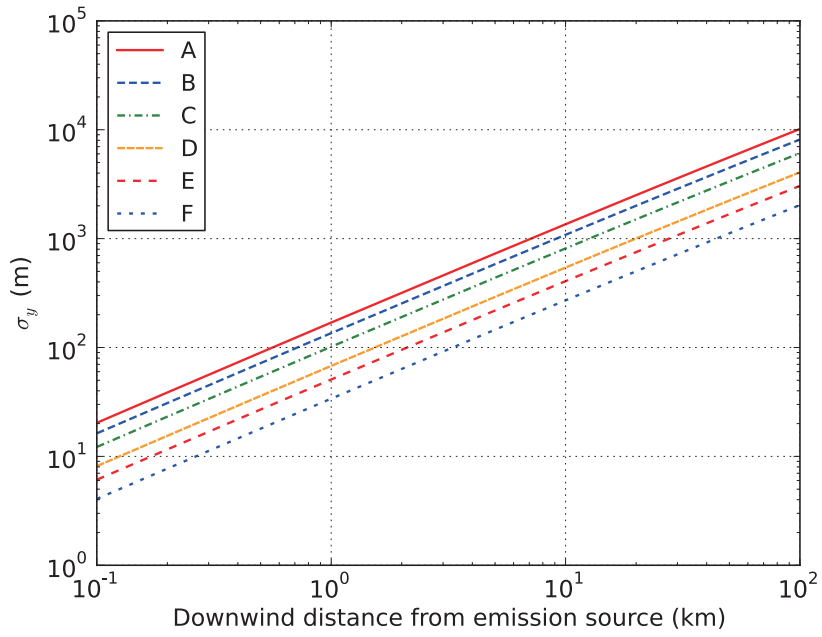


図 3.3.3 y 方向の拡がりパラメータ

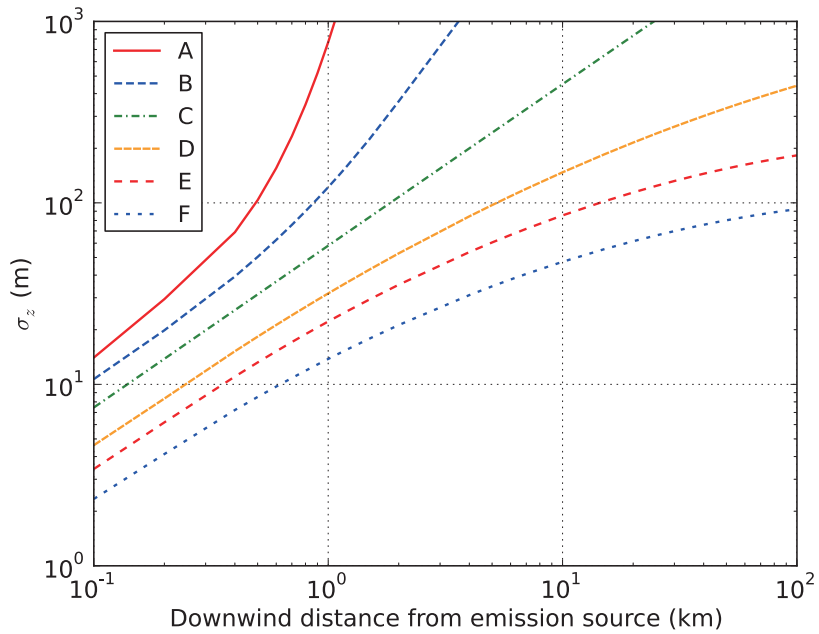


図 3.3.4 z 方向の拡がりパラメータ

3.3.2.2 相対線量 D/Q_γ の評価

放射性雲による地表付近 γ 線量率の評価には、次式から求めた D/Q_γ を用いた（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）。

$$\frac{D}{Q_\gamma} = K_1 \mu_a \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_0^\infty \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} B(\mu r) \frac{\chi}{Q(x', y', z')} dx' dy' dz' \quad (3.30)$$

D/Q_γ 評価地点における相対線量 ($\mu\text{Gy}\cdot\text{MeV}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$)

K_1 空気吸収線量率への換算係数 ($\text{m}^3\cdot\mu\text{Gy}\cdot\text{MeV}^{-1}\cdot\text{Bq}\cdot\text{h}$)

$$K_1 = 4.46 \times 10^{-4} (= 1.602 \times 10^{-13} \times 3600 / 1.293 \times 10^6)$$

μ_a 空気に対する γ 線の真吸収係数 (m^{-1})

μ 空気に対する γ 線の全吸収係数 (m^{-1})

r 放射性雲中の点 (x', y', z') から評価地点 $(x, y, 0)$ までの距離 (m)

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

$B(\mu r)$ 空気に対する γ 線のビルドアップ係数

χ/Q 放射性雲中の点 (x', y', z') における相対濃度 (h/m^3)

ここで、 $B(\mu r)$ は次式から求めた。

$$B(\mu r) = 1 + \alpha(\mu r) + \beta(\mu r)^2 + \gamma(\mu r)^3 \quad (3.31)$$

ただし、 μ_a 、 μ 、 α 、 β 、 γ については、0.5 MeV の γ 線に対する値を用い、以下の通りとした。

$$\mu_a = 3.84 \times 10^{-3}$$

$$\mu = 1.05 \times 10^{-2}$$

$$\alpha = 1.00$$

$$\beta = 0.4492$$

$$\gamma = 0.0038$$

また、 $\chi/Q(x', y', z')$ は次式から求めた。

$$\frac{\chi}{Q} = \frac{1}{2\pi \cdot 3600 \cdot \Sigma_y \Sigma_z U} \exp\left(-\frac{y^2}{2\Sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z' - H)^2}{2\Sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z' + H)^2}{2\Sigma_z^2}\right) \right\} \quad (3.32)$$

ここでは地上放出を仮定するため H の値は 0 であり、この式は式 (3.27) と同じになる。これらの式を使って風下方向の距離の関数として求めた相対線量を **図 3.3.5** に示す。被ばく評価に用いる相対濃度の値として、排気筒から 200 m の距離で相対線量が最も高くなる 大気安定度 F のときの値 $1.36 \times 10^{-11} \mu\text{Gy}\cdot\text{MeV}^{-1}\cdot\text{Bq}^{-1}$ を用いた。

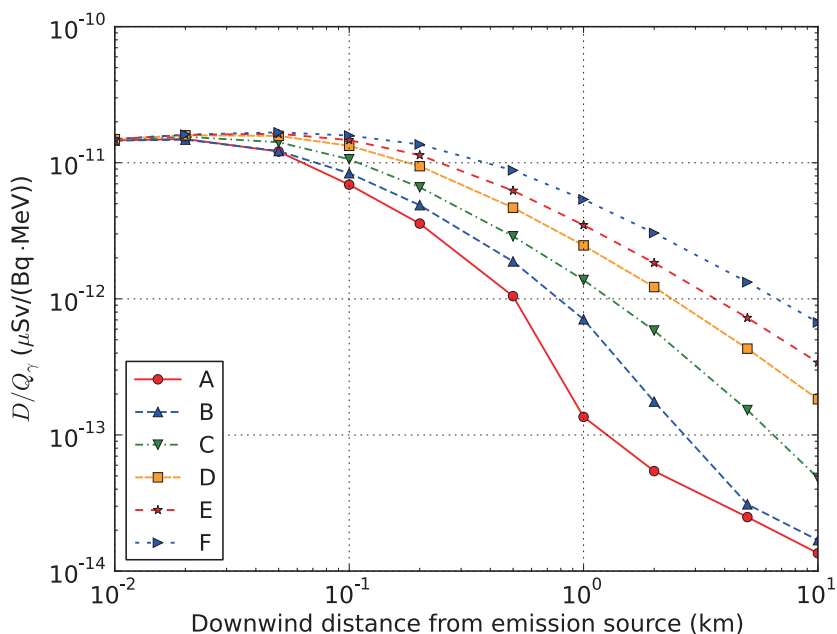


図 3.3.5 風速 1 m/s 時の地上放出での風下方向の相対線量分布

3.3.3 評価結果

以上の考察から、鉛ビスマス漏洩事象時の事業所境界における公衆の最大被ばく線量を求めた。評価結果は、

内部被ばく

水銀	580 μSv
ヨウ素	5.3 μSv
トリチウム (HTO)	$5.6 \times 10^{-1} \mu\text{Sv}$

外部被ばく

希ガス	67 μSv
水銀	$1.8 \times 10^{-1} \mu\text{Sv}$

となり、総被ばく量は 660 μSv であった。内部被ばくおよび外部被ばくの核種別内訳（上位 10 核種）をそれぞれ表 3.3.6 および表 3.3.7 に示す。

実際は、漏洩した鉛ビスマスがキャッチパン上で保持されることはなく、台車下の鉛ビスマス捕集タンクに集められること、鉛ビスマスの温度は低下すること、漏洩検知後直ちに空調ダンプの閉止が可能であること、さらに解析では冷却時間を考慮していないことなどを考慮すると、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低いものと考えられる。

表 3.3.6 内部被ばく核種別内訳（上位 10 核種）

順位	核種	半減期	実効線量 (μSv)	割合 (%)
1	Hg-197	64.14 h	410	70.2
2	Hg-195	10.53 h	95	16.3
3	Hg-195m	41.6 h	73	12.5
4	I-128	24.99 m	3.8	0.7
5	Hg-203	46.594 d	3.4	0.6
6	Hg-197m	23.8 h	8.7E-01	0.1
7	Hg-199m	42.67 m	8.7E-01	0.1
8	I-126	12.93 d	7.1E-01	0.1
9	T (HTO)	12.32 y	5.6E-01	0.1
10	I-125	59.407 d	4.5E-01	0.1

表 3.3.7 外部被ばく核種別内訳（上位 10 核種）

順位	核種	半減期	実効線量 (μSv)	割合 (%)
1	Kr-88	2.825 h	33	50.1
2	Kr-87	76.3 m	26	39.1
3	Kr-85m	4.48 h	6.1	9.2
4	Xe-125	16.9 h	5.8E-01	0.9
5	Kr-79	1.46 d	3.1E-01	0.5
6	Hg-195	10.53 h	1.3E-01	0.2
7	Xe-127	36.345 d	3.9E-02	0.1
8	Hg-195m	41.6 h	3.1E-02	< 0.1
9	Xe-121	40.1 m	2.9E-02	< 0.1
10	Hg-197	64.14 h	1.9E-02	< 0.1

4. 結言

ADS ターゲット試験施設において、鉛ビスマス循環系からの全鉛ビスマス漏洩事象を想定し、それによる事業所境界における被ばく線量評価を行った。評価では、漏洩した鉛ビスマスから水銀蒸気、放射性希ガス、トリチウム及びその他の核反応生成物が気中に移行し、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。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線量は約 660 μSv である。
- それらの大部分は、水銀蒸気による内部被ばくである。

かなり保守的な事象想定にもかかわらず、本事象に伴う事業所境界における被ばく線量は一般公衆が自然から受ける線量よりも低い値であり、本施設が放射性物質の漏洩に対して十分な安全裕度を持つことが示された。

謝辞

本研究の成果をまとめるにあたり、有益な助言を賜りました J-PARC センター放射線安全セクションの春日井好己セクションリーダーおよび増川史洋研究副主幹、ならびに J-PARC センターターゲット技術開発セクションの大林寛生研究副主幹に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 春日井好己、甲斐哲也「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」 JAEA-Technology 2009-010, (2009), 46p.
- 2) Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, 2015 Edition, Nuclear Energy Agency, Organisation Economic Co-operation and Development, No. 7268, (2015).
- 3) Sato T, Niita K, Matsuda T, et al. “Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52,” Journal of Nuclear Science and Technology 50:9, 913–923 (2013).
- 4) Kai T, Maekawa F, Kosako K, et al. “DCHAIN-SP 2001: High energy particle induced radioactivity calculation code,” JAERI-Data/Code 2001-016 (2001).
- 5) Bertini H.W. “Intranuclear-Cascade calculation of the secondary nucleon spectra from nucleon-nucleus interactions in the energy range 340 to 2900 MeV and comparisons with experiment,” Physical Review 188, 1711 (1969), 82p.
- 6) Furihata S. “Statistical analysis of light fragment production from medium energy proton-induced reactions,” Nuclear Instruments and Method in Physics Research B 171 251–258 (2000).
- 7) Shibata K, Iwamoto O, Nakagawa N, et al. “JENDL-4.0: A new library for nuclear science and engineering,” Journal of Nuclear Science Technology 48:1, 1–30 (2011).
- 8) Langmuir I. “The vapour pressure of metallic tungsten,” Physical Review Second Series, 2, pp. 329–342, (1913).
- 9) Paula J. Atkins. P, 千原秀明 (翻訳)、中村亘男 (翻訳) (2009), 「アトキンス物理化学」東京化学同人；第 8 版.
- 10) McNeese LE. “Considerations of low pressure distillation and its application to processing of molten-salt breeder reactor fuels,” ORNL-TM-1730, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, (1967).
- 11) Neuhausen J. “Gas phase concentrations of volatile nuclear reaction products in the MEGAPIE expansion tank,” PSI Report TM-18-05-02, Paul Scherrer Institut, Villigen, Switzerland, (2005).

- 12) IAEA Nuclear Data Section, Live Chart of Nuclides, nuclear structure and decay data, <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>, (Nov. 1, 2017).
- 13) 原子力安全委員会：「発電用軽水型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、一部改訂 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) 日本産業衛生学会：「許容濃度等の勧告（2015 年度）」、産業衛生学会誌、57 巻、pp 146–217, 2015.
- 15) Audouin L, Tassan-Got L, Armbruster P, et al. “Evaporation residues produced in spallation of ^{208}Pb by protons at 500 A MeV,” Nuclear Physics A 768, 1–21 (2006).
- 16) Fernandez-Dominguez B, Armbruster P, Audouin L, et al. “Nuclide cross-sections of fission fragments in the reaction $^{208}\text{Pb}+p$ at 500 A MeV,” Nuclear Physics A 747, 227–267 (2005).
- 17) Boudard A, Cugnon J, David J.-C, et al. “New potentialities of the Liège intranuclear cascade model for reactions induced by nucleons and light charged particles,” Physical Review C 87, 014606 (2013).

付録 A 揮発性物質の蒸発速度

真空中における純物質の蒸発速度は、理想気体の分子運動論より次式で与えられる (Langmuir の式⁸⁾)¹。

$$R_m = \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} p^* \quad (\text{A.1})$$

R_m : 質量蒸発率 [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]
 M : 平均分子量 [$\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$]
 T : 絶対温度 [K]
 R : 気体定数 8.314 [$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$]
 p^* : 純物質の蒸気圧 [Pa]

液体中に溶質 A が低濃度で存在すると仮定すると溶質 A の蒸気圧は Henry の法則⁹⁾

$$p_A = x_A K_{H,A} \quad (\text{A.2})$$

に従う。ここで x_A は溶質 A のモル分率、 $K_{H,A}$ は溶質 A の Henry 定数 (圧力の次元) である。式 (A.1) の純物質の蒸気圧 p^* を p_A で代用することにより、溶質 A が蒸発する最大速度は

$$R_m = \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} K_{H,A} x_A \quad (\text{A.3})$$

で評価できる²。ここで、揮発性核種のモル分率 x_A はモンテカルロ粒子輸送計算コード PHITS により得られる。Henry 定数 K_H は、参考文献 2) に記載の推奨関数を用いて評価した。表 A.1.1 に Henry 定数の推奨関数を示す。臭素及びアスタチンの関数は参考文献 2) で評価されていないが、同族元素のヨウ素と同程度と考えられるため、本評価ではヨウ素と同じ推奨関数を用いた。表 A.1.2 に、物質の原子量、モル分率、表面温度 550° における Henry 定数および蒸発速度を示し、図 A.1.1 に、蒸発速度を鉛ビスマス表面温度の関数として示す。

¹この式は、液体表面に衝突する気体分子がすべて凝縮し、かつ単位時間内に凝縮する分子数と蒸発する分子数が等しいことを仮定している。

²実際は、蒸気相の存在により蒸発分子の再凝縮が生じるが、式 (A.3) はこれを考慮していない。また、鉛ビスマス中に高濃度で存在する鉛 (44.5%) 及びビスマス (55.5%) は Henry の法則に従わない。しかしながらいずれも、式 (A.3) で得られた結果は安全側の評価値となるため、本報告書では式 (A.3) による評価を採用する。

表 A.1.1 表面温度に対する Henry 定数の推奨関数

元素	Henry 定数 K_H に対する推奨関数 (Pa)	ノミナル幅
ビスマス	$K_{H(\text{Bi,LBE})} = 10^{-\frac{9656.4}{T}+9.9272}$	約 423°C
鉛	$K_{H(\text{Pb,LBE})} = 10^{-\frac{10130}{T}+12.8163-0.985 \log T}$	約 423°C
ポロニウム	$K_{H(\text{Po,LBE})} = 10^{-\frac{6790 \pm 1840}{T}+8.46 \pm 1.26}$	500–750°C
水銀	$K_{H(\text{Hg,LBE})} = 10^{-\frac{3332.7}{T}+12.9716-0.848 \log T}$	約 330°C
カドミウム	$K_{H(\text{Cd,LBE})} = 10^{-\frac{5711}{T}+14.38-1.0867 \log T}$	約 500°C
タリウム	$K_{H(\text{Tl,LBE})} = 10^{-\frac{9463}{T}+13.264-0.892 \log T}$	約 500°C
ヨウ素	$K_{H(\text{I,LBE})} = 10^{-\frac{9087}{T}-6.16 \log T+31.897}$	424–847°C
臭素	ヨウ素と同程度	未評価
セシウム	$K_{H(\text{Cs,Pb})} = 10^{-\frac{4980}{T}-9.323 \log T+0.004473T-8.684 \cdot 10^{-7}T^2+33.07}$	370–660°C

表 A.1.2 物質の原子量、モル分率、表面温度 550°C における Henry 定数および蒸発速度

元素	原子量 M (g·mol ⁻¹)	モル分率 x_A (-)	Henry 定数 $K_{H,A}$ (Pa)	蒸発速度 R_m (kg·m ⁻² ·s ⁻¹)
ビスマス	208.98	5.53E-01	1.57E-02	1.92E-05
鉛	207.20	4.47E-01	4.35E-03	4.27E-06
ポロニウム	(209.00)	1.39E-07	1.63E+00	4.98E-10
水銀	200.59	3.18E-05	2.82E+06	1.94E-02
カドミウム	112.41	7.18E-07	1.88E+04	2.18E-06
タリウム	204.38	1.44E-06	1.47E-01	4.60E-10
ヨウ素	126.90	1.84E-08	7.91E+02	2.50E-08
臭素	79.90	1.57E-08	7.91E+02	1.70E-08
アスタチン	(210.00)	7.78E-09	7.91E+02	1.36E-08
セシウム	132.91	1.06E-09	8.56E+02	1.60E-09

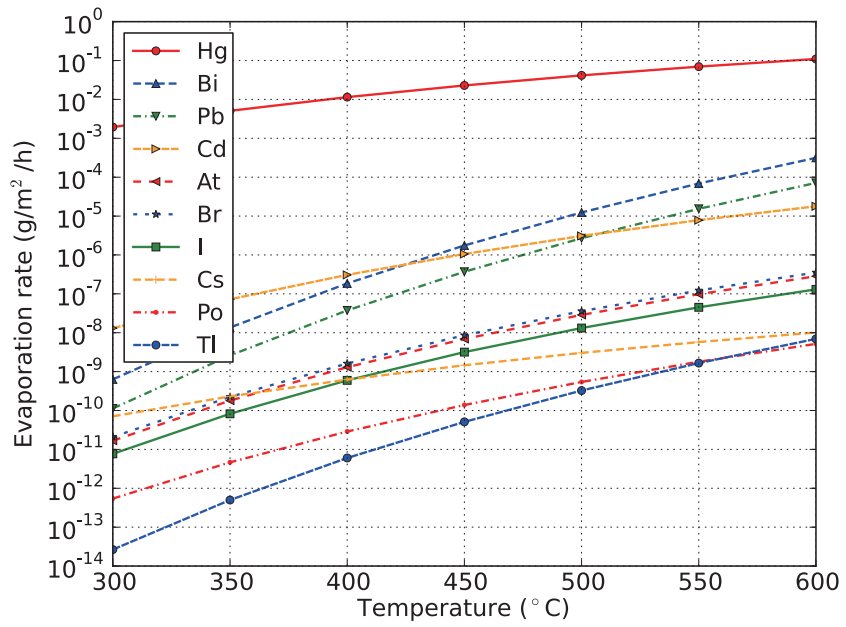


図 A.1.1 鉛ビスマス表面温度に対する蒸発速度

付録B 濃度分布式の導出

拡散方程式

$$\frac{\partial C_A(x,t)}{\partial t} = \mathcal{D}_{AB} \frac{\partial^2 C_A(x,t)}{\partial x^2} \quad (\text{B.1})$$

を、初期条件

$$t = 0: \quad C_A = C_0 \quad (\text{B.2})$$

および境界条件

$$\begin{aligned} x = 0: \quad C_A &= 0 \\ x = \infty: \quad C_A &= C_0 \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

のもとで解く。

まず、次のように無次元量 η を導入する。

$$\eta = \frac{x}{\sqrt{4\mathcal{D}_{AB}t}} \quad (\text{B.4})$$

このとき、 x および t はそれぞれ

$$x = \eta \sqrt{4\mathcal{D}_{AB}t} \quad (\text{B.5})$$

$$t = \frac{1}{4\mathcal{D}_{AB}} \frac{x^2}{\eta^2} \quad (\text{B.6})$$

となる。したがって、濃度 C_A の時間微分および位置 x に対する二重微分はそれぞれ

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{dC_A}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (\text{B.7})$$

および

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} = \frac{1}{4\mathcal{D}_{AB}t} \frac{d^2 C_A}{d\eta^2} \quad (\text{B.8})$$

と書ける。これらを式 (B.1) に代入すると

$$\frac{d^2 C_A}{d\eta^2} + 2\eta \frac{dC_A}{d\eta} = 0 \quad (\text{B.9})$$

となる。さらに $\zeta = dC_A/d\eta$ とおくと、式 (B.9) は

$$\frac{d\zeta}{d\eta} + 2\eta\zeta = 0 \quad (\text{B.10})$$

となり、これを解くと

$$\zeta = C_1 e^{-\eta^2} \quad (\text{B.11})$$

となる。この式を η について積分すると

$$C_A = C_1 \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta + C_2 \quad (\text{B.12})$$

が得られる。 $x = 0$ のとき $\eta = 0$ であるから、これを上式に代入すると、境界条件により

$$C_2 = 0 \quad (\text{B.13})$$

となる。さらに、 $x = \infty$ のとき $\eta = \infty$ であるから、これを上式に代入して積分公式

$$\int_0^\infty e^{-\eta^2} d\eta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (\text{B.14})$$

を用いると、境界条件により

$$C_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} C_0 \quad (\text{B.15})$$

となる。すなわち、濃度 C_A は次のように表せる。

$$C_A = C_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta \quad (\text{B.16})$$

$t = 0$ のとき $\eta = \infty$ であるから、上式は初期条件も満たすことがわかる。ここで $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\eta e^{-\eta^2} d\eta$ は誤差関数であり、 $\text{erf}(\eta)$ で表記される。したがって、最終的に次の濃度分布式が得られる。

$$\frac{C_A}{C_0} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\mathcal{D}_{AB} t}} \right) \quad (\text{B.17})$$

付録C 水銀の空气中濃度許容値

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持つ。水銀蒸気の許容濃度として、日本産業衛生学会が定めた値¹⁴⁾を示す。

日本産業衛生学会許容濃度：0.025 mg/m³（提案年度：'98）

ここで定められている許容濃度とは、労働者が1日8時間、週間40時間程度、肉体的に激しくない労働強度で有害物質に曝露される場合に、当該有害物質の平均曝露濃度がこの数値以下であれば、ほとんどすべての労働者に健康上の悪い影響が見られないと判断される濃度であって、許容濃度の数値を労働の場以外での一般公衆に対する許容濃度あるいは許容限界値として用いることはできない。ここでは、これを一つの目安として、鉛ビスマス漏洩事象時の事業所境界での水銀濃度を評価し、比較した。

事故時の事業所境界の濃度は、下記のとおりである。

$$\begin{aligned}
 (\text{事業所境界での水銀濃度}) &= (1 \text{ 時間当たりの排気筒からの水銀放出量}) \times (\text{相対濃度}) \\
 &= (0.0042 \text{ g/h}) \times (8.61 \times 10^{-7} \text{ h/m}^3) \\
 &= 3.6 \times 10^{-9} \text{ g/m}^3
 \end{aligned}$$

ここで、水銀放出量および相対濃度は、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比べて4桁低く、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。

付録 D 核反応モデルの妥当性検証

入射エネルギー及び標的原子核が TEF-T のものに近い 500 MeV 陽子入射鉛 (^{208}Pb) 標的からの核種生成断面積の実験データ^{15,16)}を用いて、PHITS に組み込まれている核反応モデルの妥当性を検証した¹⁾。ここでは、本解析で採用した Bertini INC/GEM および PHITS 標準仕様の核反応モデルである INCL4.6¹⁷⁾/GEM の二つのモデルについて検証を行った。

図 D.1.1 に、500 MeV 陽子入射鉛 (^{208}Pb) 標的核反応による核種生成断面積の C/E (計算値対実験値の比) 値を示す。ここでは、鉛ビスマス漏洩事象で注意すべき 4 元素 (水銀、キセノン、ヨウ素およびクリプトン) について比較している。図より、これらの 4 元素については Bertini

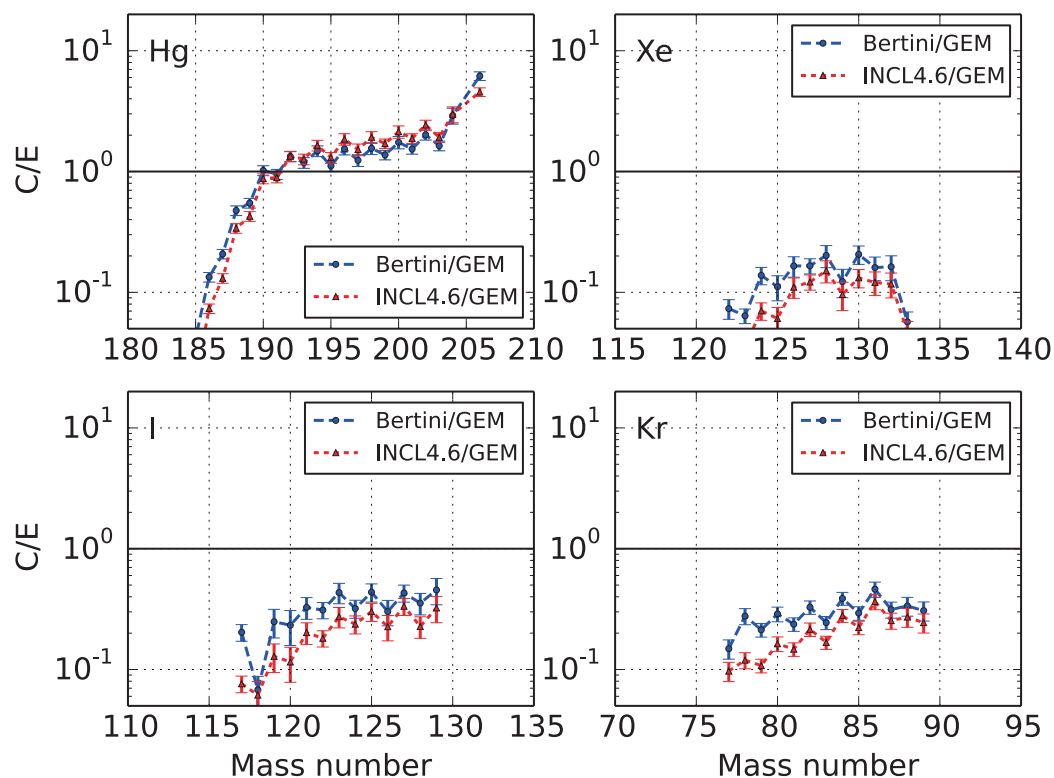


図 D.1.1 500 MeV 陽子入射による ^{208}Pb 標的からの核破砕生成物核種 (水銀、キセノン、ヨウ素およびクリプトン) 生成断面積の C/E 値

INC/GEM の方が INCL4.6/GEM よりも実験値の再現性がよいことがわかる。しかしながら、両モデルとも実験値をよく再現しているとは言えず、総被ばく量の大部分を占める水銀については

¹⁾実験データは、ドイツ・重イオン研究所 GSI において ^{208}Pb イオンビームを用いて液体水素標的に入射し、核破砕反応による核種生成断面積を逆運動学により求めたものである。

質量数が 192 以上の同位体に対して実験値を過大評価している。すなわちこれは、**表 3.3.6** および**表 3.3.7** に示された水銀による被ばく量が安全側の評価となることを示している。一方、外部被ばくで考慮すべき希ガス（クリプトンおよびキセノン）、および内部被ばくで水銀に次いで考慮すべきヨウ素は実験値を過小評価しており、**表 3.3.6** および**表 3.3.7** で示されたそれらの値は非安全側の評価である。そこで本検討では、より安全側の評価となるように C/E 値が 1 未満の核種に対してのみ、C/E 値の逆数 (E/C 値) を乗じることで補正を行った。

This is a blank page.

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량	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 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (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 ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	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
光照射量	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射線当量, 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

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加減	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	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エントロピー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射線輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	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=60 s
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/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, 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=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ¹² cm ²) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=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=4.1858 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	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

