

JAERI-Tech



JP0050819

2000-050



水銀ターゲットシステムにおける ソースタークムの予備的評価

2000年8月

小林 薫・神永 雅紀・羽賀 勝洋・木下 秀孝
麻生 智一・粉川 広行・日野 竜太郎

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

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

日本原子力研究所東海研究所中性子科学研究センター
小林 薫・神永 雅紀・羽賀 勝洋・木下 秀孝
麻生 智一・粉川 広行・日野 竜太郎

(2000 年 7 月 3 日受理)

大強度陽子加速器計画において、MW クラスの陽子ビームが入射して核破碎中性子源となる水銀ターゲットは、既存の核破碎中性子源と比較して大量の放射性物質を生成するため、新しい安全概念の構築が求められる。安全概念構築の第 1 ステップとして、重大事故時において公衆被曝量の最大値を推定することが必要である。

本報告書では、核破碎反応で生成する放射性核種を推定し、そして、水銀ターゲットシステムのギロチン配管破断のもとでソースタームの輸送解析により最大公衆被曝量を推定する。重大事故であるギロチン配管破断は、システム内の放射化水銀をターゲットトローリーメンテナンス室へ漏洩する事象になる。実効的なソースタームとして、高い蒸気圧と放射能レベルを有する水銀、ヨウ素、臭素、及び希ガスを選定した。ターゲットトローリーメンテナンス室から大気への上記ソースタームの輸送量は水銀漏洩時の温度と蒸発率、そして放出時のフィルター効率や大気拡散率を考慮して解析した。漏洩水銀の温度変化は STAR-CD コードで、蒸発速度は 1 次元強制対流条件で利用される物質伝達の相関式で推定した。安全裕度を十分に見込んだ条件における予備的な解析結果では、水銀、ヨウ素、臭素、希ガスに対する公衆被曝量の最大レベルは約 $6.3 \times 10^{-2} \text{ mSv}$ であり、1 年間に自然界から受ける 1 mSv よりも一桁以上小さい。

Proposal of Source Term Methodologies for Mercury Target System

Kaoru KOBAYASHI, Masanori KAMINAGA, Katsuhiro HAGA, Hidetaka KINOSHITA,
Tomokazu ASO, Hiroyuki KOGAWA and Ryutaro HINO

Center for Neutron Science
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 3, 2000)

In the High-Intensity Proton Accelerator Project, a new safety concept for a mercury target which works as a spallation neutron source coupled with a proton beam of MW-class power is required, since the MW-class target generates much larger amounts of radioactive nuclides than existing spallation neutron sources. As a first step to construct the safety concept, it is necessary to estimate the maximum level of public exposure in the case of major accidents.

In this report, the radioactive nuclides generated by the spallation reaction are estimated, and then the maximum level of public exposure is estimated by using transportation analyses of the source term under guillotine breaks of pipelines of the mercury target system. This guillotine break of pipelines leads to the event that all the activated mercury possessed in the system flows into the target trolley maintenance room, which is the major accident. Based on the source term estimation, mercury, iodine, bromine and noble gas were selected as the effective source term because of their high vapor pressures and activation levels. The transportation amount of these source terms from the target trolley maintenance room to the atmosphere was analyzed in consideration of the leakage mercury conditions such as surface temperature, evaporation rates and spread area as well as the filtering efficiency and dispersion rates in the atmosphere. Then, the temperature change of the leakage mercury was estimated with the STAR-CD code, and the evaporation rates with a mass transport correlation available for the one-dimensional forced convection condition.

From the preliminary analytical results obtained under the conditions expecting

high safety margin, the maximum level of the public exposure was approximately 6.3×10^{-2} mSv, which is negligible in comparison with the 1mSv one-year natural radiation exposure.

Keywords: Mercury Target, Spallation Neutron Source, Proton Beam, Public Exposure, Radioactive Nuclides, Source Term, Guillotine Breaks, Transportation, Preliminary Analysis

This is a blank page.

目 次

1. まえがき	1
2. 水銀ターゲットシステムの概略	2
2.1 システム概略構成	2
2.2 安全上の特徴	2
2.3 安全確保の基本的考え方	3
3. ソースタームの予備的評価	4
3.1 放射性核種の移行経路	4
3.2 ソースターム	4
3.3 水銀の蒸発モデル	7
3.4 公衆被曝量のパラメータサーバイ	11
4. あとがき	14
謝辞	14
参考文献	15
付録	
A.1 水銀ターゲットの放射能と崩壊熱	31
A.2 1次元平板体系における水銀蒸発量の計算モデル	37

Contents

1. Introduction	1
2. Safety Design Concept of Mercury Target System	2
2.1 System Arrangement	2
2.2 Safety Design Concept	2
2.3 New Anticipated Events for Mercury Target System	3
3. Preliminary Estimation of Source Term	4
3.1 Transportation Path of Radioactive Nuclides	4
3.2 Concept of Source Term	4
3.3 Evaporation Model for Mercury	7
3.4 Parameter Survey of Public Exposure	11
4. Concluding Remarks	14
Acknowledgement	14
Reference	15
Appendix	
A.1 Radioactivity and Decay Heat of Mercury Target	31
A.2 Calculation Model of Mercury Evaporation	37

1. まえがき

日本原子力研究所(原研)の「中性子科学研究計画」と高エネルギー加速器研究機構(KEK)の「大型ハドロン計画」を統合した「大強度陽子加速器計画」を両機関共同プロジェクトとして進めている。同計画では、MW規模の陽子加速器からの極短パルス陽子ビームを重金属製のターゲットに入射して核破碎反応により大強度中性子ビームを発生させ、生命科学、物性物理、核物理等の広範囲な分野で先端的研究を行う中性子散乱施設を最も早期に建設する予定である⁽¹⁾。中性子散乱施設の中核となるターゲットシステムについては、平成9年度からシステム/機器設計及びR&Dに着手し、クロスフロー型水銀ターゲットなどMW規模のターゲットシステムに適用可能な新構造概念を考案するとともに、それを用いたシステム概念の構築を進めてきた^(2,3)。さらに、水銀流動基礎実験装置における異常事象時の過渡解析を実施して、その事象を早期に検出して安定に終息させるための安全保護系の検討等も並行して進め、各機器の安全性を十分に確保するように設計を進めている⁽⁴⁾。

これらの成果を踏まえて、システム全体の安全性をさらに高める設計検討に着手した。このとき、ターゲットシステムでは核破碎反応により生成する放射性物質を扱うことから、ターゲットベッセル等による放射性物質の閉じ込めや生体遮蔽体による被曝低減等の安全対策を施すことを、システムの基本構成概念とした⁽²⁾。

システム全体の安全性を検討するための第1ステップは、重大事故時におけるソーススターームを評価し、敷地境界における公衆被曝量が許容できるレベルにあることを示すことである。水銀ターゲットシステムでは、陽子ビームが直接当たる水銀の放射化量が大きいため、配管破断等による大規模水銀漏洩事象の発生による環境への移行経路を検討することが特に重要である。この検討では、水銀の崩壊熱、減速材容器破損による液体水素の気化による圧力上昇、火災、爆発による防護壁破損の可能性等も視野にいれておくことが不可欠である。

本報告では、重大事故として水銀がターゲットトローリーメンテナンス室に漏洩した事象を想定し、保守的に設定した条件で水銀の蒸発量を求め、この水銀が環境中に放出された場合の公衆被曝量を予備的に評価した。

2. 水銀ターゲットシステムの概略

2.1 システム概略構成

水銀ターゲットシステムの基本構成概念を Fig. 2.1 に示す。水銀ターゲットシステムでは、MWクラスの陽子ビームを水銀ターゲットに入射し、核破碎反応により高速中性子を発生させ、この高速中性子を液体水素や軽水で減速し、低速中性子を中性子ビームポートに供給する。このシステムで熱的に厳しい場所は、陽子ビームが直接当たる水銀ターゲット及びその周辺領域、すなわち、ターゲットケーシング、減速材、反射体等の主要機器が格納されているターゲットベッセル内である。水銀ターゲット内には核破碎反応によって生成される放射性物質が存在するため、ターゲットケーシングやターゲットベッセル等による物理的な障壁を設け、放射性物質を閉じ込める構造をしている。さらに、ターゲットベッセル内は、負圧に保つことで、万が一ターゲットケーシングからベッセル内に放射性物質が漏洩してもベッセルから外部に漏洩しないようにし、かつ、減速材容器破損による液体水素漏洩に伴う火災や爆発のポテンシャルもベッセル内に不活性ガス（ヘリウムガス）を循環することで排除する。

水銀ターゲットからの高速中性子や核破碎生成物等からのガンマ線は、生体遮蔽体（鉄、コンクリート）で減衰させて、周辺への漏洩を極力低減させ各区画の放射線量率を満足するようにしている。

水銀ターゲットで発生した熱はターゲット冷却系で除熱され、この熱は2次及び3次冷却系を経てシステム外部に放出される。このように多重の冷却系統構成にするのは、1次冷却系の水銀循環系には水銀ターゲットで生成された大量の放射性物質が含まれており、1次冷却系に故障が発生して2次冷却系に放射性物質が漏れても外部に直接漏洩するのを防ぐためである。また、このループの配管破断により水銀がターゲットトローリーメンテナンス室に漏洩する重大事故が発生しても、負圧管理等により公衆被曝量を極めて低くする構成としている。本報告は、この重大事故が発生した場合の公衆被曝量の推定方法を提案し、この被曝量を予備的に評価したものである。

2.2 安全上の特徴

ターゲットシステムの安全上の特徴は、Fig. 2.2 に示すように下記の4項目に分類できる。

(1) 放射性核種

- ・水銀の核破碎生成物
- ・陽子ビーム窓や Safety hull (以後、ターゲット格納容器と呼ぶ) の冷却水の核破碎生成物（主に H-3 と Be-7）
- ・反射体の冷却水の中性子捕獲反応によるトリチウム

(2) 崩壊熱

- ・水銀の崩壊熱

(3) 火災、爆発

- ・冷減速材として用いる液体水素の漏洩に伴う火災、爆発による防護壁の破損の可能性

(4) 圧力

- ・冷減速材として用いる液体水素の漏洩に伴う圧力上昇による防護壁の破損の可能性

2.3 安全確保の基本的考え方

MW クラスの大強度陽子加速器を用いた核破碎中性子源ターゲットシステムでは、従来に比べ1桁以上高い出力のため大量の放射性物質を扱うことになり、一般公衆や施設の従事者等に対して従来の核破碎中性子源システムとは質的に異なった安全確保が必要と考えられる。以下、Fig. 2.3 を参考にして、通常運転時及び事故時の安全確保の考え方（案）を記す。

(1) 通常運転時

ターゲットシステム内に放射能あるいは放射線を閉じ込めるとともに、異常事象に対して事故への拡大を防止するため、異常が一定の変動幅に納まるよう機器等を設計する。さらに、この設計では、ALARA(As Low As Reasonably Achievable)を適用してコスト一ベネフィットによる適切な技術を採用し、一般公衆の放射線被曝による影響を無視できる程度に低く抑えるよう閉じ込め等の安全設計を行う。さらに、運転・保守要員の資質を向上させるとともに、厳重な品質管理、入念な点検・検査を行うことにより安全確保をはかる。

(2) 事故時

ターゲットシステムの事故時の安全確保は、原子炉施設や化学プラントの火災・爆発の安全対策等に用いられている深層防護の概念

第1のレベル：異常の発生防止

第2のレベル：異常の拡大防止

第3のレベル：放射性物質の異常放出防止

に基づいて行う。ターゲットシステムの深層防護の考え方を Fig. 2.4 に示す。この概念をターゲットシステムに適用するに当っては、各機器等の特性に合わせて適切な安全対策を講じることが重要である。

3. ソースタームの予備的評価

3.1 放射性核種の移行経路

放射性核種の移行経路は事故時のシナリオに依存する。このシナリオとして、水銀ターゲットシステムにおける代表的な異常事象を Table 3.1 に示す。この表では、単一の異常事象の推移を示しており、複数の異常事象が同時に起った場合の推移は除外してある。ターゲットシステムの重大事故事象は、放射性物質の量が一番多い水銀循環系 (Fig. 3.1 参照) での水銀配管破断による全量漏洩事象を想定した。漏洩した水銀の大部分は、ターゲットトローリーメンテナンス室の床面に設置されたライナーにより集められダンプタンクに回収されるが、水銀の一部は機器やライナー等に付着し、ターゲットトローリーメンテナンス室内に残存する可能性がある。残存する割合は、破断箇所や漏洩状態により異なるため、以下の検討では、漏洩した水銀は全てターゲットトローリーメンテナンス室に存在すると保守的な想定をした。

ターゲットシステムから環境中への放射性核種の移行経路としては、Fig. 3.2 に概要を示すように下記のようになる。

(1) 水銀の蒸発

ターゲットトローリーメンテナンス室に 100 から 150°C 程度の高温の水銀が漏洩する。その後、水銀温度は、ライナー等への熱伝達により低下し、それに伴って蒸発量も減少する。

(2) 換気空調

ターゲットトローリーメンテナンス室は、通常運転時及び事故時ともに放射性物質の漏洩を防ぐため換気空調系により負圧に維持されている。そのため、水銀蒸気は換気空気とともにターゲットトローリーメンテナンス室から空調配管を通してフィルターへ移動する。

(3) フィルター

水銀や核破碎生成物は、高性能エアフィルター(HEPA)やチャコールフィルター等により捕獲される。

(4) 大気拡散

水銀蒸気は、排気筒から環境中へ放出され、大気拡散で希釈される。

3.2 ソースターム

ソースタームは、ターゲットシステムからの放出放射能による人の被曝線量を評価する際、環境中の移行経路の始点における放射性核種の種類とその量である。

(1) 放射性核種の量

現行のシステム設計では、施設の設計寿命として30年を想定していることから、ソースタームの評価に用いる水銀の核破碎反応等によって生成する放射性核種の量は、放射性核種の濃度が最も高くなるように3GeVの陽子ビームが1MWの出力で30年間連続運転した時の量を用いた。以下の検討は、この放射性核種の量に基づいている。

放射性核種の放射能と崩壊熱の計算は、NMTC/JAERI、MCNP-4A、DCHAIN-SP コードを用いた。なお、評価モデル等の詳細は付録 A.1 に示してある。

(2) 核破碎生成物のハザードポテンシャル

安全確保の目標は、一般公衆や施設の従事者等に対して安全を確保することである。水銀ターゲットにおいて、この安全を確保する上で主要な検討対象となる核種をハザードポテンシャルで評価する。本報では、ハザードポテンシャルは、

$$\text{ハザードポテンシャル} = \frac{\text{核種の放射能}(Bq)}{ALI_s(Bq)} \quad (3.1)$$

で定義した。ここで、 ALI_s は、確率的影響から決まる年摂取限度(ALI: Annual Limit of Intake)である。

吸入摂取における全ハザードポテンシャルに対する寄与割合が1%以上ある核種を Fig. 3.3 に示す。この図より、全ハザードポтенシャルに対する寄与割合の高い核種は、Gd-148, Hf-172, Hf-178, Au-195, Hg-203 である。特に Gd-148 は、 ALI_s が小さいため全ハザードポテンシャルに対する寄与が約90%と極めて高い。

全ハザードポテンシャルに対する寄与割合が0.1%以上ある核種としては上記核種に加えて Eu-154, Os-185, Ir-192m, Hg-194, Hg-197 の5核種がある。これらの0.1%以上ある核種の全ハザードポテンシャルに対する寄与割合は冷却開始直後で97.5%である。

(3) ソースタームで考慮する核種

核破碎反応で生成する元素の水銀中での挙動は不明な点が多い。水銀は、タリウム、カドミウム、鉛など低融点金属を良く溶解するが、タンクステン、鉄、ニッケルなどの高融点金属は融解しにくい性質がある。そのため、元素の挙動は水銀中へ溶解あるいはアマルガム化して析出する等、種々の形態があると考えている。これらの挙動に関しては、実験等により今後詳細な検討が必要である。

本報では、ソースタームとして考慮する核種は、水銀 Hg、ヨウ素 I、臭素 Br、希ガス(Ar, Kr, Xe)を仮定した。以下、この理由を Table 3.2 及び Fig. 3.4⁽⁵⁾に基づいて以下に記す。

(a) 水銀

水銀循環系の基本運転条件は水銀を沸騰させないことであり、水銀の最高温度は200°C以

下、平均温度は 150°C 以下である。常温より高い温度での水銀蒸気圧は高く、そのため、水銀がターゲットトローリーメンテナンス室に漏洩すると蒸発し、ソースタームとなる。

(b) ヨウ素(I)

水銀中のヨウ素の挙動は不明であるが、沸点温度はヨウ素の方が水銀より低いため、水銀漏洩時に蒸発する可能性がありソースタームの元素とした。ヨウ素の蒸発速度は下記の理由により水銀と同一と仮定した。

蒸発速度は、水銀の蒸気圧より高い場合と低い場合を検討すれば十分である。水銀中のヨウ素は、

- ・水銀中にヨウ素が溶解し水銀より蒸気圧が高い (Fig. 3.4 参照)
- ・ヨウ化水銀 Hg_2I_2 (融点 : 290°C), HgI_2 等の化合物を形成し蒸気圧が低い

の両方の可能性がある。蒸気圧が高い場合には、ターゲットシステムの運転中に、Fig. 3.1 に示したバージガス循環系で連続的に除去されるため、ヨウ素の蒸発速度は最大でも水銀と同程度と想定できる。一方、蒸気圧が低い場合には水銀より早くヨウ素が蒸発するとは考えにくい。そこで、保守的に評価するため、ヨウ素は全量が水銀中に存在し、漏洩時の蒸発速度は水銀と同一と仮定した。

(c) 臭素(Br)

水銀中の臭素の挙動は不明であるが、沸点温度は臭素の方が水銀より低いため、水銀漏洩時に蒸発する可能性がある。そこで、臭素もヨウ素と同様に全量が水銀中に存在し、かつ蒸発速度は水銀と同一と仮定した。なお、臭素と水銀の化合物としては $HgBr_2$ 等がある。

(d) 水銀の沸点より高い融点を持つ元素

水銀より沸点の高い元素に対しては、ソースタームへの寄与は無いと仮定した。これは、沸点の高い元素は、水銀の使用温度 150°C の条件では蒸気圧が極めて小さく、蒸発量は無視できると考えているからである。これは、下記の理由による。

核破碎反応で生成した元素は、アマルガム化するか、または水銀に溶解しているものと考えられる。例えば、ガドリニウム (Gd、融点 : 1310°C) は水銀に 0.009wt%(40°C) から 0.76wt%(340°C) の割合で溶解するため、核破碎反応で生成した Gd-148 は水銀中に溶解している可能性が高い⁽⁶⁾。

そこで、水銀の沸点温度より高い融点温度を持つ元素は水銀中に全て溶解し、理想溶液 (ideal solution) の状態であると仮定した。この理想溶液の全蒸気圧 P_t は各元素の蒸気圧を P_i とすると、Dalton の法則により、

$$P_t = \sum_i P_i = \sum_i P_0 x_i \quad (3.2)$$

ここで、

- P_0 : 各元素が単独に存在するときの蒸気圧
 x_i : モル分率

で表される。この場合には、核破碎反応で生成した元素の蒸気圧は、 P_0 と x_i の積で近似できる。

全ハザードポテンシャルに対する寄与が0.1%以上ある核種を持つ元素Eu, Gd, Hf, Os, Ir, AuはTable 3.2に示したように水銀の沸点より融点は高い。また、これらの元素の蒸気圧は、Fig. 3.4に示したように、水銀に比べて極めて低い。そこで、これらの元素については、蒸気圧の対数と温度の逆数が比例関係にあるアレニウスの式(Arrhenius' equation)が成り立つものと仮定する。この仮定の下で、上記の元素の中で蒸気圧の高いEuについて評価すると、温度が150°Cのときに水銀の蒸気圧よりも13.6桁低くなる。また、水銀中のEuのモル分率は1%以下なので、理想溶液状態ではEuの蒸気圧は水銀よりも15.6桁以上低くなる。蒸気圧の差は温度が低くなるほど拡大する傾向にある。これらのことから、水銀より沸点の高い元素の蒸発量は無視できるものと考えられ、ソースタームへの寄与は無視できるものとした。

(e) 希ガス

水銀中の希ガスの挙動は不明であるが、通常運転時にバージガス循環系で連続的に除去される可能性が高いと考えている。本報では、保守的な設定として、希ガスもヨウ素と同様に全量が水銀中に存在し、かつ蒸発速度は水銀と同一と仮定した。

3.3 水銀の蒸発モデル

水銀が漏洩し蒸発する形態は種々の形態が考えられるが、代表的な水銀漏洩形態を仮定して基準ケースを設定し、このケースに基づき水銀蒸発量の推定を行った。

(1) 基準ケース

ターゲットトローリーメンテナンス室に漏洩した水銀は、蒸発量を保守的に評価するために均一に広がると仮定した。このとき、ターゲットトローリーメンテナンス室にはターゲット台車等が設置されているため、取扱い室の半分の面積に温度150°Cの水銀が厚さ1mの床コンクリート上に漏洩するのを基準ケースとした。水銀インベントリーを2m³（現行の設計条件）とすると、水銀厚さは約3.6cmとなる。ターゲットトローリーメンテナンス室は、負圧維持等を目的として換気空調系により4860m³/hの空気で換気する。この換気による室内空気の平均流速は約0.02m/sである。一方、コンクリートの下は使用済みターゲット取扱い施設であり、同様に換気空調系により換気する。

(2) 水銀の質量流速モデル

水銀の漏洩に伴う蒸発を、Fig. 3.5 に示す 1 次元平板モデルで近似的に評価する。このモデルでは、

- ・界面における空気中の水銀は平衡濃度
- ・物質対流は強制対流の相関式
- ・空気は理想気体
- ・空気の流れは一様
- ・空気の温度は一定

とした。水銀表面と空気の間の物質伝達係数 α_D は次式⁽⁷⁾で与えた。

$$m_A = -D_{AB} \left(\frac{\partial \rho_{A0}}{\partial y} \right)_{y=0} = \alpha_D (\rho_{A0} - \rho_{A\infty}) \quad (3.3)$$

ここに、

D_{AB}	: 2 成分系気体の拡散係数 (空気中を拡散する水銀の拡散係数)
m_A	: 界面における分子拡散による質量流速
ρ_{A0}	: 界面における質量濃度
$\rho_{A\infty}$: 液体中の質量濃度

である。質量濃度は、界面で一番大きく、界面から離れるに従い減少する。式(3.3)において、 $\rho_{A\infty}$ をゼロと仮定すると

$$m_A = \alpha_D \times \rho_{A0} \quad (3.4)$$

になる。この仮定は質量流速 m_A を過大評価、すなわち水銀蒸発量を多く見積もるため、安全評価上は保守的な想定したことになる。

物質伝達係数 α_D は、1 次元平板体系を仮定し、無限平板における強制対流の相関式、すなわちコルバーン(Colburn)のアナロジーより、層流、乱流それぞれに対して

(a) 層流

$$\alpha_D = \frac{0.664 \times Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}} D_{AB}}{L} \quad (3.5)$$

(b) 乱流

$$\alpha_D = \frac{0.037 Re^{\frac{4}{5}} Sc^{\frac{1}{3}} D_{AB}}{L} \quad (3.6)$$

ここで、

- Re : レイノズル数(Reynolds number)
- Sc : シュミット数(Schmidt number)
- L : 代表寸法

で評価する。なお、DAB の計算には、Reid と Sherwood が物質伝達の計算に利用することを推奨している 2 成分系気体の拡散係数

$$D_{AB} = \frac{0.0018583 T^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{\frac{1}{2}}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_{D,AB}} \quad (3.7)$$

ここで、

- T : 温度 (K)
- M_A, M_B : 分子量 (例えば、空気 : 28.8、水銀 : 200.59)
- P : 壓力 (atm)
- σ_{AB} : collision diameter (\AA)
- $\Omega_{D,AB}$: 衝突積分 (collision integral)

を用いる⁽⁸⁾。

一方、界面における質量濃度 ρ_{A0} は、水銀と空気の濃度が平衡した状態（そのときの濃度は平衡濃度 C_g^* ）であるとした。このとき、水銀中に溶解している不揮発性の核破碎生成物により、ラウールの法則(Raoult's law)から水銀の蒸気圧は減少、すなわち平衡濃度は減少するため、上記の平衡濃度の仮定は水銀の蒸発量に関して保守的な評価を与える。本報で用いた 2 成分系気体の拡散係数と質量濃度の計算方法を付録 A.2 に示す。

(3) 水銀表面温度

水銀表面温度は、蒸発量を決める重要な要因のひとつである。この水銀表面温度は、Fig. 3.6 に示すモデルを用いて STAR-CD コードで解析評価した。Fig. 3.6 に示す解析モデルは 2 次元体系で、水銀表面温度の算定に当っては、換気空調系による空気の流れと水銀からコンクリートへの熱移動を考慮した。なお、天井コンクリートは断熱条件とした。

解析評価した水銀漏洩時の水銀表面最高温度と冷却時間の関係を Fig. 3.7 に示す。図より、水銀表面の最高温度は 1 日経過すれば 32°C に低下する。なお、基準ケースである空気の流速 0.02m/s を 100 倍の 2m/s にした場合には 32°C に低下する時間は約 8 時間と温度低下の速度は速くなる。また、漏洩した水銀の厚さを薄くした場合には床コンクリートを介して

の熱移動により温度低下の速度はさらに早くなる。温度低下は蒸発量の減少に関係しているため、本基準ケースは保守的な評価といえる。

(4) 水銀崩壊熱の影響

水銀の崩壊熱は、Fig. 3.8 に示すように最大で 2.4kW であり、時間とともに減少する。基準ケースを対象に、この崩壊熱が水銀表面温度に及ぼす効果を STAR-CD コードで解析評価した。その結果、水銀の表面温度に及ぼす影響は 1°C 以下と小さいことが分った。これは、次の単純な評価結果の傾向と一致する。すなわち、水銀 2 トンの周囲が断熱された体系で、

水銀インベントリー	: 2.0 ton
崩壊熱	: 2.4 kW
水銀の密度	: 13.6 g/cm ³
水銀の比熱	: 0.138 kJ/kg K

の条件で温度上昇を計算すると、水銀温度は 1 時間でわずかに 2.3°C 程度の上昇でしかない。このため、床コンクリート等への熱移動により Fig. 3.7 に示したように 1 時間で 150°C から 71°C に低下するような状況下では、水銀の崩壊熱が水銀表面温度に及ぼす効果は小さい。

(5) 水銀の蒸発量

基準ケースにおける単位時間当りの水銀蒸発量を Fig. 3.9 に示す。水銀蒸発量は漏洩初期で 10g/m²hr 程度であるが、水銀表面の温度の低下とともに減少し、1 日 (8.64×10^4 秒) 経過すると約 3 衍小さくなっている。Fig. 3.10 に基準ケースにおける水銀累積蒸発量を示す。水銀累積蒸発量は、水銀が漏洩してから 1 日経過後は単位面積当り約 1.25g/m² であり、本ケースでは漏洩面積 55m² を仮定しているので、計 69g と極めて小さい。また、1 ヶ月経過後でも約 5.03 g/m² であり、水銀累積蒸発量は 277g (20°C の液体換算で 20cm³) 程度である。

(6) 水銀酸化皮膜の影響

水銀が漏洩し空気に触れると表面に酸化皮膜が形成される。気体分子運動論からの理論計算によると、水銀が真空中に蒸発するときの蒸発量は 20°C で約 2100g/m²h である。一方、水銀を空气中において酸化皮膜を形成させた後の真空中への蒸発量は酸化皮膜の厚さに依存するが 10³ のオーダーで小さくなるという実験結果が報告されている⁽⁹⁾。Fig. 3.9 に示したように、水銀の単位面積/時間当りの蒸発量は、酸化皮膜のない基準ケースで温度が 20°C の場合 0.0041g/m²h である。一方、酸化皮膜を形成した水銀の真空中への蒸発量は、酸化皮膜がない場合の 1/1000 と仮定すると約 2.1g/m²h である。この値は基準ケースと比較して約 500 倍も大きい値であり、空气中に漏洩した水銀に酸化皮膜が形成されても水銀と空気の界面に十分に水銀蒸気が供給される可能性がある。そのため、本報告で検討している

水銀漏洩条件下では酸化皮膜形成が水銀蒸発量の減少に及ぼす効果は小さいと考えられ、水銀蒸発量に及ぼす酸化皮膜の効果は無視することとした。

3.4 公衆被曝量のパラメータサーベイ

(1) 水銀蒸発量のパラメータ

水銀蒸発量は水銀漏洩形態に依存するため、水銀蒸発量に影響する主要パラメータを対象にパラメータサーベイ計算を実施した。Table 3.3 に解析ケースと主要パラメータを示す。パラメータは、水銀漏洩時の形状（長さ、幅、深さ）とターゲットトローリーメンテナンス室の空気の速度である。水銀の形状は長さを一定にし、幅と深さを変化させた。また、ターゲットトローリーメンテナンス室内の空気の平均流速は、換気空調系の換気量より 0.02m/s 程度であるが、局所的には流速の早い領域が発生する可能性が考えられるため、0.2m/s 及び 2m/s の流速条件を与えた。なお、漏洩時の水銀温度は 150°C 一定とした。

上記のパラメータは、基準ケースと比較して、

- ・水銀蒸発面積 : 0.125 ~ 2.0
- ・水銀厚さ : 0.5 ~ 8.0
- ・空気の平均流速 : 10 ~ 100

の範囲で変化させており、種々の水銀漏洩形態を包絡しているものと考えられる。

(2) 水銀等の放出に伴う吸入による公衆被曝量

蒸発した水銀、ヨウ素、臭素が外部に放出にされるときの実効線量当量は、

$$D_{inh} = (\chi / Q) \times Q \times B \times H \quad (3.8)$$

で与えられる。ここで、

(χ / Q) : 敷地境界での相対濃度 (hr/m^3)

Q : 放出率 (Bq)

B : 呼吸率 (m^3/hr)

H : 1Bq 吸入時の実効線量当量(Sv/Bq)

であり、これらパラメータについては次のように与えた。

- ・敷地境界での相対濃度

敷地境界での相対濃度は、排気筒から放出された放射性物質が敷地境界で大気拡散により希釈される割合である。研究炉の評価に利用されている相対濃度を Table 3.4 に示す。この表より、相対濃度は 10^{-7} から 10^{-9} 程度である。そこで、保守的な設定として、敷地境

界での相対濃度は 10^{-7} とした。

・放出率

ターゲットトローリーメンテナンス室から蒸発した水銀はフィルターで 95%除去され、排気筒より放出されたとした。このフィルター効率 95%は研究炉の評価で利用されている値を用いた。また、蒸発した水銀は壁や配管等に付着せず、全量がフィルターを経て排気筒より放出されるものとした。また、放出率の評価に必要な放出時間は、下記の 2 つを仮定した。

- (a) 水銀が漏洩したあと 10 日間あれば復旧及び清掃作業が完了
- (b) 1 年間連続放出

特に、上記(b)は復旧及び清掃作業に対するシナリオとしては、極めて保守的な設定であるが、放出量の上限を押さえるという観点から 1 年間連続放出の条件を与えた。このとき、放射性核種が崩壊する効果を考慮した。

・呼吸率

成人男性が 1 時間に呼吸する代表的な値 $1.2\text{m}^3/\text{h}$ を用いた。

・ 1Bq 吸入時の実効線量当量

ICRP が Publication 30 で勧告している値を用いた⁽¹⁰⁾。

Fig. 3.11 に 10 日間連続放出による公衆被曝量のパラメータサーベイの結果を示す。図より、公衆被曝量は水銀蒸発面積 110m^2 、水銀厚さ 0.0181m 、空気平均流速 2m/s のときに最大となり $5.8 \times 10^{-3}\text{mSv}$ である。この値は人間一人が自然界から受ける放射能の $1/170$ 程度と極めて小さい。また、図に見られるように、水銀厚さが 0.0181m から 0.1448m の範囲で変化させても公衆被曝量は 30%程度の変化でしかない。これは、水銀の厚さが薄くなると蒸発面積は増加するが、逆に、コンクリートへの熱移動により水銀表面温度が急速に低下するため蒸発速度が小さくなり、10 日間では両者の効果はほぼキャンセルして公衆被曝量に顕著な差は生じないためと考えられる。

Fig. 3.12 に 1 年間連続放出による公衆被曝量のパラメータサーベイの結果を示す。このように極めて保守的に設定したシナリオでも、公衆被曝量の最大値は水銀蒸発面積 110m^2 、水銀厚さ 0.0181m 、空気平均流速 2m/s のときに $6.3 \times 10^{-2}\text{mSv}$ であり、人間一人が自然界から受ける放射能の $1/15$ 以下である。

(3) 希ガスの放出に伴う公衆被曝量

希ガスの実効線量当量は、

$$D_{\gamma} = (D/Q) \times Q \times (E_{\gamma} + E_X) \quad (3.9)$$

で与えられる。ここで、

- | | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| (D/Q) | : 敷地境界での相対線量 (Gy/(Bq MeV)) |
| Q | : 放出率 (Bq) |
| $(E_X + E_{\gamma})_{\text{eff}}$ | : X 線及び γ 線の実効エネルギー (MeV/dis) |

であり、これらパラメータについては次のように与えた。

・敷地境界での相対線量

研究炉の評価に利用されている敷地境界での相対線量を Table 3.5 に示す。この表より、相対線量は 10^{-17} から 10^{-19} 程度である。そこで、保守的な設定として、敷地境界での相対線量は 10^{-17} とした。なお、式(3.9)で計算した実効線量当量の単位はグレイ(Gy)であるが、X線や γ 線では線質係数が 1.0 なので、式(3.9)で計算した値はシーベルト(Sv)と等価である。

・放出率

希ガスは水銀とともに排気筒から 100% 放出されると仮定した。なお、放出時間は、10 日と 1 年の条件で評価した。

・X 線及び γ 線の実効エネルギー

希ガスの X 線及び γ 線の実効エネルギーは Table 3.6 に示す値を用いた。

Fig. 3.13 に 10 日間連続放出による公衆被曝量のパラメータサーバイの結果を示す。図より、公衆被曝量は水銀蒸発面積 110m^2 、水銀厚さ 0.0181m 、空気平均流速 2m/s のときに最大となり $1.7 \times 10^{-5}\text{mSv}$ である。この値は人間一人が自然界から受ける放射能の $1/59000$ 程度と水銀等の公衆被曝量に比べ 2 枠以上小さい。また、1 年間連続放出による公衆被曝量のパラメータサーバイの結果も Fig. 3.14 に示すように 2 枠以上小さくなっている。

これらの評価結果より、水銀がターゲットトローリーメンテナンス室に漏洩した場合の水銀、ヨウ素、臭素、希ガスによる公衆被曝量の予備的な解析結果は約 $6.3 \times 10^{-2}\text{mSv}$ であり、1 年間に自然放射能で公衆が被曝する量 1mSv に比べて一桁以上小さい。

4. あとがき

水銀ターゲットシステムのソースタームの評価モデルを提案し、このモデルに基づき水銀漏洩の種々の形態を包絡するようにパラメータを設定し公衆被曝量の予備的評価を行った。本報では、ソースタームとして考慮する元素は、蒸気圧の観点から融点の低い水銀、ヨウ素、臭素、希ガスを選定した。これらの元素は水銀とともに蒸発し、換気空調系の空気で輸送されフィルターを通して外部に放出され、大気拡散により希釈されると仮定した。この仮定に基づいて公衆被曝量の予備的な評価を実施した。その結果、水銀温度の変化、漏洩水銀の厚さ及び面積、換気空調空気の流速などについて極めて保守的な値を用いて評価しても公衆被曝量は $6.3 \times 10^{-2} \text{ mSv}$ 程度であり、人間が 1 年間に自然界から受ける線量の $1/15$ 以下と小さいことを明らかにした。なお、本報では、ソースタームとして単元素を評価したが、今後は水銀化合物まで拡張してソースタームの評価を行い、公衆被曝量のより詳細な検討を行う予定である。

謝　　辞

本検討を進めるにあたり、核熱利用研究部 稲垣嘉之氏、ITER 開発室 羽田一彦、大川慶直両氏、中性子科学研究所 中野秀機氏から貴重な助言を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所、高エネルギー加速器研究機構共同推進チーム、“大強度加速器計画”、JAERI-Tech 2000-003 (2000)
- (2) 中性子科学研究計画施設検討グループ、“中性子科学研究計画における研究施設（第1次案）”、JAERI-Tech 99-030 (1999)
- (3) M. Kaminaga, et al., “Mercury Target Development for JAERI Spallation Neutron Source”, Proc. of the 7th Int. Conf. on Nucl. Eng. (ICON-E-7), Tokyo, Japan, Paper No. 7123, JSME No. 99-201 (1999)
- (4) 木下秀孝、神永雅紀、日野竜太郎、“RELAP5 コードによる水銀流動基礎実験装置の過渡解析（第3報） 水銀物性値を用いた過渡解析”、JAERI-Tech 2000-007(2000)
- (5) A. N. Nesmeyanov, “Vapor Pressure of the Chemical Elements”, Elsevier Publishing Company (1963)
- (6) A. F. Messing, O. C. Dean, “Solubilities of Selected Metals in Mercury”, ORNL-2871, (1960)
- (7) 西川兼康、藤田恭伸、“伝熱学”、理工学社、(1982)
- (8) T. K. Sherwood, R. L. Pigford and C. R. Wilke, “Mass Transfer”, McGraw-Hill (1975)
- (9) D. J. Benjamin, Mat. Res. Bill., 19,443 (1984)
- (10) 河合勝雄他、“ICRP Publication 30 に基づく単位摂取量当りの預託実効線量当量等の一覧表”、JAERI-M 87-172 (1987)

Table 3.1 Typical abnormal events for mercury target system

	設計基準異常事象	設計基準事故事象	最大想定事故事象* (放射性物質の 最大外部放出事象)
共通項目 (循環系)	流量低下 ポンプトリップ 商用電源喪失	— — —	— — —
水銀循環系	共通項目と同一	小規模配管破断	大規模配管破断 (ターゲットローリーメンテナンス室 の放射化水銀全量漏洩)
	ターゲット容器破損	セイフティーハル破損+ ターゲット容器同時破損	同左(ターゲットベッセル内 に放射化水銀、重水の一部 漏洩)
	陽子ビームの異常な 出力上昇	同上	同上
水素循環系 冷減速材	異常発熱による温度上昇	水素の沸騰、圧力上昇、 火災 小規模配管破断 (容器破損含む)	大規模配管破断、 圧力上昇、火災 (ターゲットベッセル内に 放射化水素漏洩)
軽水循環系 陽子ビーム窓	陽子ビームの異常な 出力上昇	陽子ビーム窓破損	大規模配管破断 (ターゲットベッセル、 BT内に放射化軽水漏洩)
	共通項目と同一	小規模配管破断	大規模配管破断 (遮蔽体内等に 放射化軽水漏洩)
プリモデレータ	共通項目と同一 異常発熱による温度上昇	小規模配管破断 (容器破損含む)	大規模配管破断 (ターゲットベッセル内に 放射化軽水漏洩)
水減速材	共通項目と同一 異常発熱による温度上昇	小規模配管破断 (容器破損含む)	大規模配管破断 (ターゲットベッセル内に 放射化軽水漏洩)
遮蔽体	共通項目と同一 異常発熱による温度上昇	小規模配管破断 (容器破損含む)	大規模配管破断 (ターゲットベッセル内に 放射化軽水漏洩)
重水循環系 セイフティーハル	共通項目と同一 異常発熱による温度上昇	セイフティーハル破損	大規模配管破断 (ターゲットベッセル内に 放射化重水漏洩)
	共通項目と同一	小規模配管破断	大規模配管破断 (ターゲットベッセル内に 放射化重水漏洩)

*) 原子炉との対応では立地評価に関わる仮想事故に相当

Table 3.2 Physical properties of major elements

Element	Symbol	Melting point °C	Boiling point °C	Density g/cm ³
Bromine	Br	-7.2	58.8	3.10
Iodine	I	113.5	184.4	3.71
Europium	Eu	822.	1600.	5.24
Gadolinium	Gd	1310.	3300.	7.9
Hafnium	Hf	2230.	4600.	13.31
Osmium	Os	3045.	5027.	22.57
Iridium	Ir	2410.	4100.	22.42
Gold	Au	1064.	2800.	19.32
Mercury	Hg	-39.	357.	13.5

Table 3.3 Analytical cases and their major parameters

Case No.	Spilled Mercury				Air velocity (m/s)	Remarks
	Length (m)	Width (m)	Depth (m)	Temp. (°C)		
1	15.75	7.0	0.018	150	0.02	
2	15.75	7.0	0.018	150	0.20	
3	15.75	7.0	0.018	150	2.00	
4	15.75	3.5	0.036	150	0.02	Base case
5	15.75	3.5	0.036	150	0.20	
6	15.75	3.5	0.036	150	2.00	
7	15.75	1.75	0.072	150	0.02	
8	15.75	1.75	0.072	150	0.20	
9	15.75	1.75	0.072	150	2.00	
10	15.75	0.875	0.144	150	0.02	
11	15.75	0.875	0.144	150	0.20	
12	15.75	0.875	0.144	150	2.00	

Table 3.4 Comparison of typical atmospheric dispersion factor
to evaluate public exposure for research reactors

Research reactor	Height of stack m	Atmospheric dispersion factor χ/Q h/m^3
JRR-3	40	2.2×10^{-9}
HTTR	0	1.2×10^{-7}
	80	1.0×10^{-9}
STACY	0	7.3×10^{-8}
	50	4.2×10^{-9}
MONJU	0	3.0×10^{-8}

Table 3.5 Comparison of typical relative dose factor to evaluate
public exposure for research reactors

Research reactor	Height of stack m	Relative dose factor D/Q $Gy/(Bq MeV)$
JRR-3	40	7.5×10^{-19}
HTTR	0	3.7×10^{-18}
	80	3.6×10^{-19}
STACY	0	3.2×10^{-18}
	50	7.6×10^{-19}
MONJU	0	2.1×10^{-18}

Table 3.6 Effective energy of noble gas

Nuclide	Effective energy $(E_x+E_\gamma)_{\text{eff}}$ MeV/dis	Nuclide	Effective energy $(E_x+E_\gamma)_{\text{eff}}$ MeV/dis	Nuclide	Effective energy $(E_x+E_\gamma)_{\text{eff}}$ MeV/dis
Ar-35*	0.500	Kr-75*	0.500	Xe-118*	0.500
Ar-37	0.815	Kr-76*	0.500	Xe-119*	0.500
Ar-39*	0.500	Kr-77*	0.500	Xe-120	0.370
Ar-41	1.284	Kr-79	0.179	Xe-121	0.245
Ar-42*	0.500	Kr-79m*	0.500	Xe-122	0.0464
Ar-43*	0.500	Kr-81*	0.500	Xe-123	0.388
Ar-44	1.899	Kr-81m*	0.500	Xe-125	0.237
Ar-45*	0.500	Kr-83m	0.0025	Xe-125m*	0.500
Ar-46*	0.500	Kr-85	0.0022	Xe-127	0.253
Ar-47*	0.500	Kr-85m	0.159	Xe-127m*	0.500
Ar-48*	0.500	Kr-87	0.793	Xe-129m*	0.500
		Kr-88	1.95	Xe-131m	0.020
		Kr-89	2.067	Xe-133	0.045
		Kr-90	1.325	Xe-133m	0.042
		Kr-91*	0.500	Xe-134m*	0.500
		Kr-92*	0.500	Xe-135	0.250
		Kr-93*	0.500	Xe-135m	0.432
		Kr-95*	0.500	Xe-137	0.181
				Xe-138	1.183
				Xe-139	0.850
				Xe-140*	0.500

*) 実効エネルギー(Effective energy)は 0.5MeV を仮定

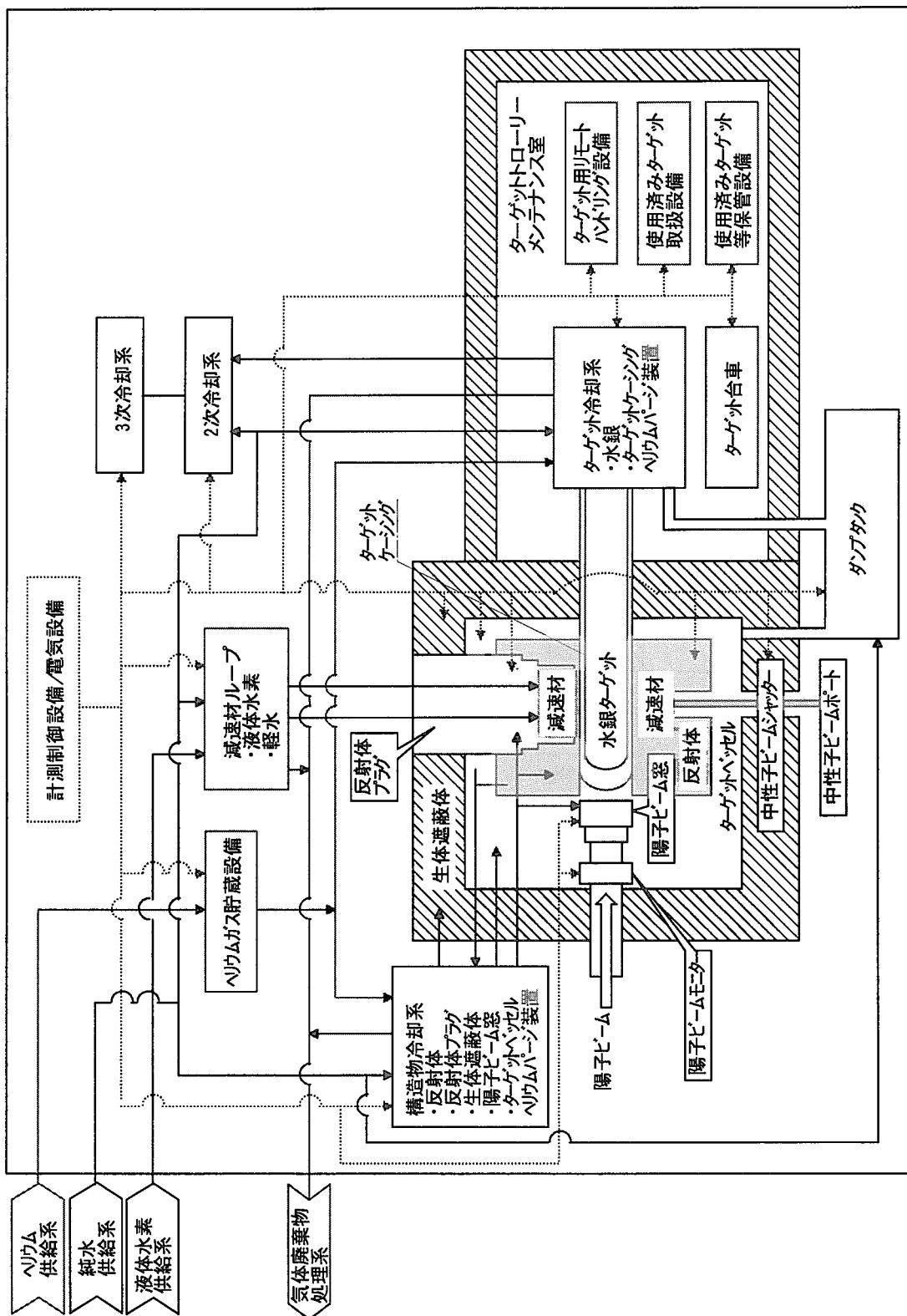


Fig. 2.1 Concept of mercury target system

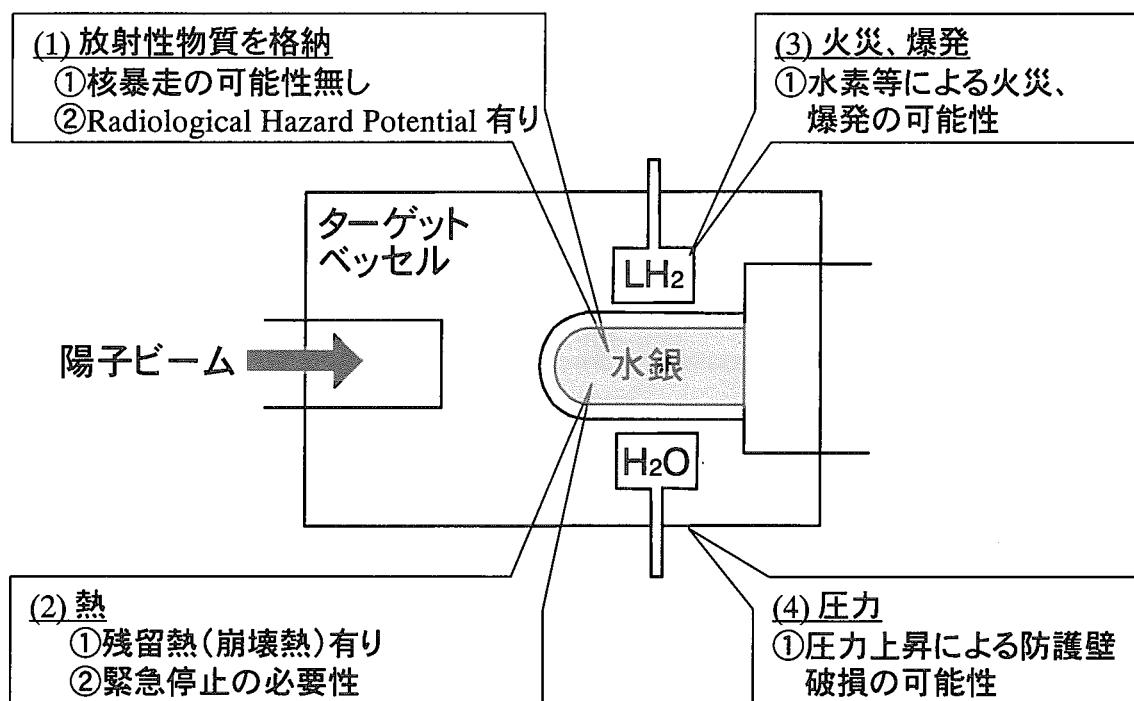


Fig. 2.2 Safety characteristic of mercury target system

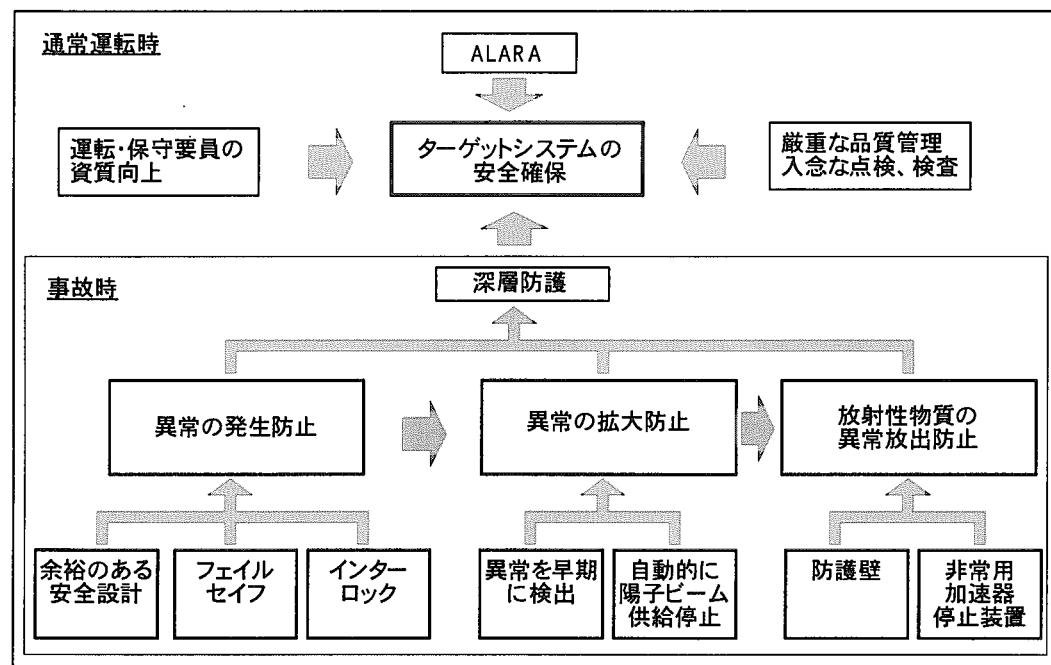


Fig. 2.3 Safety concept of mercury target system

異常の発生防止	
余裕のある安全設計	多重性 ターゲット内部の温度、圧力等複数の信号を計測、異常信号が1つでも出たらシステム停止
	独立性 運転制御システムと安全保護システムはそれぞれ独立した設計とし、一方の故障が他方への影響無
	外部要因 地震、台風などの自然災害対策、電力系統の異常対策を十分に検討
フェイルセーフ	システムの一部に故障が生じた場合でも常に安全状態に向かうという考えに基づき設計し、軽微な故障でも陽子ビームの供給を停止
インター ロック	誤った運転操作に対して、機器作動無

異常の拡大防止	
異常を早期に検出	ピンホールや小規模亀裂による漏洩が初期の段階で検出できるように、各種の自動監視装置を設置
自動的に陽子ビーム供給停止	早期の異常に対して、自動的に陽子ビームの供給停止

放射性物質の異常放出防止	
防護壁	内部及び外部ケーシング、ヘリウムベッセル、ターゲットステーション室による防護壁で外部への放射能漏洩の防止
非常用加速器停止装置	非常事態時、手動による加速器停止装置で加速器ビームの緊急停止

Fig. 2.4 Concept of defense-in-depth for mercury target system

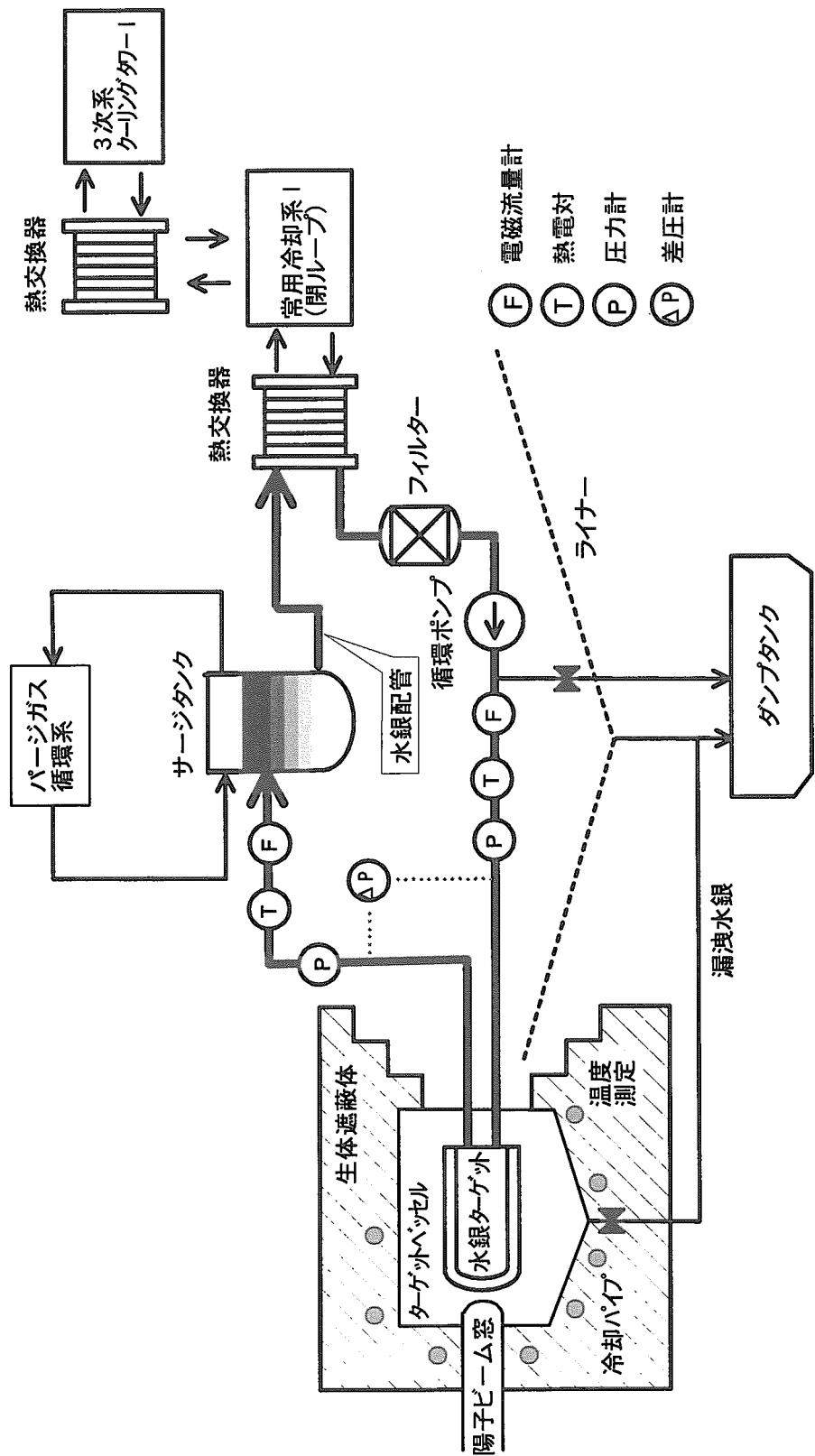


Fig. 3.1 Schematic drawing of mercury loop for mercury target system

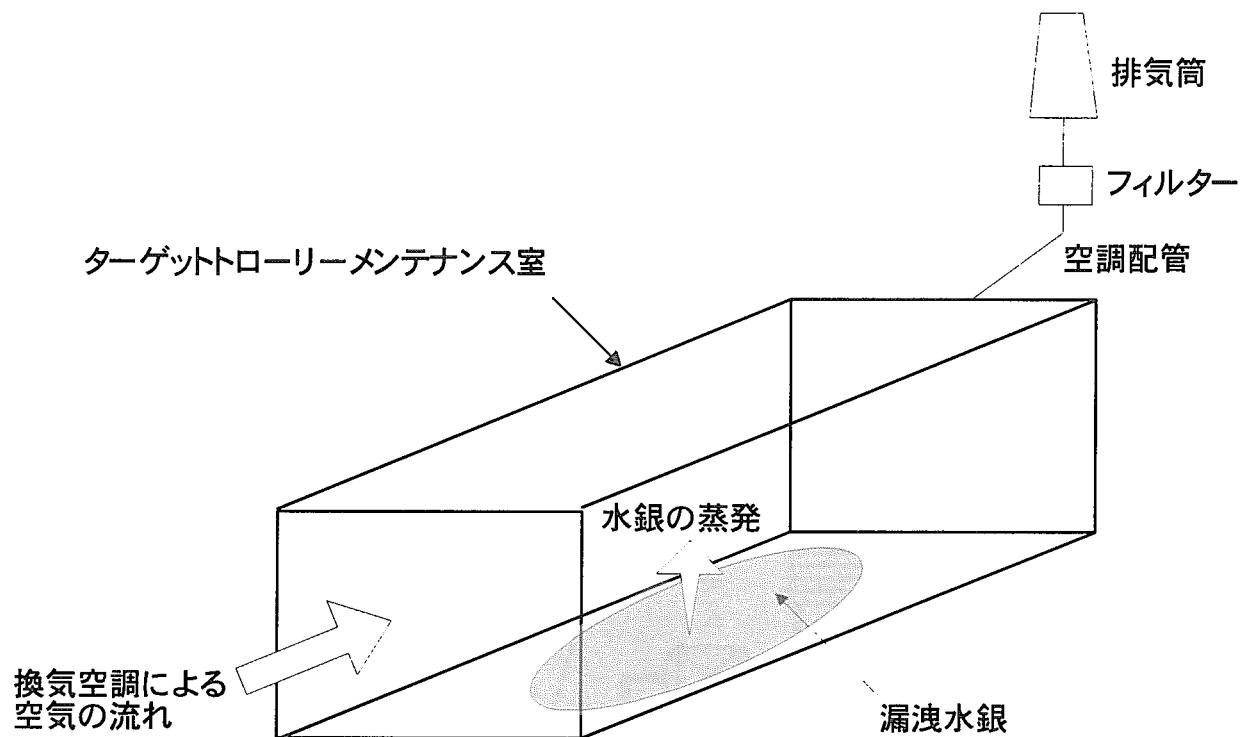


Fig. 3.2 Release concept of radioactive mercury at the accident

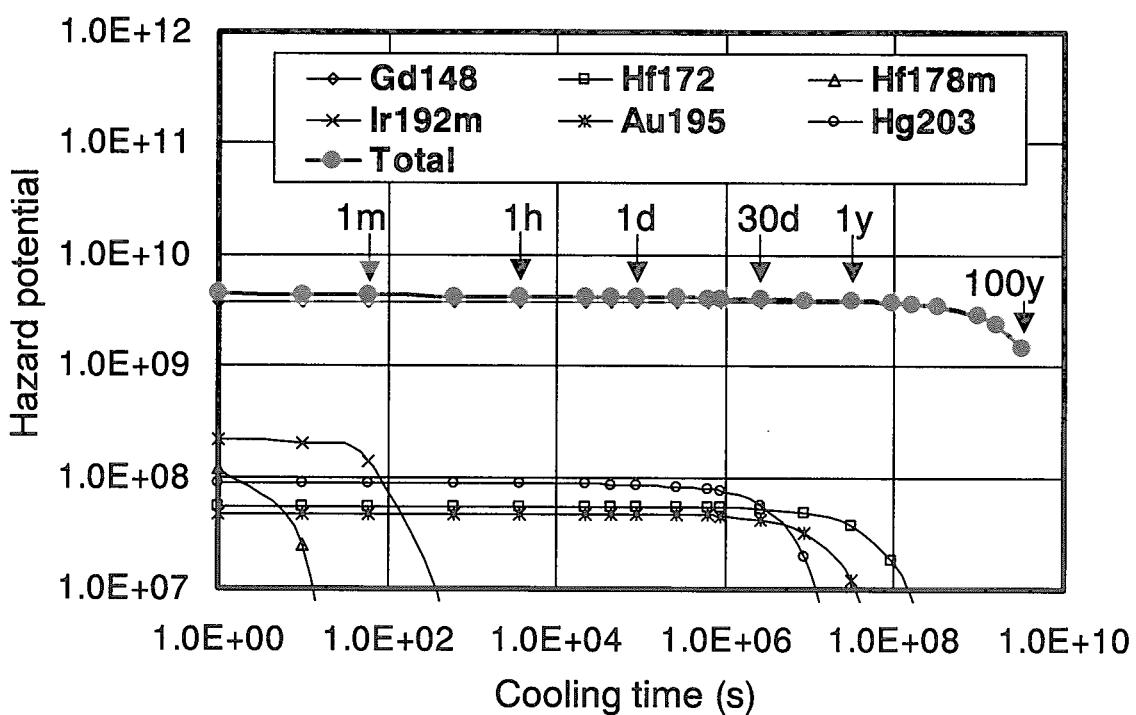


Fig. 3.3 Radioactive nuclides of one percent contribution to total hazard potential of inhalation after mercury target operation of 1MW power for 30 years

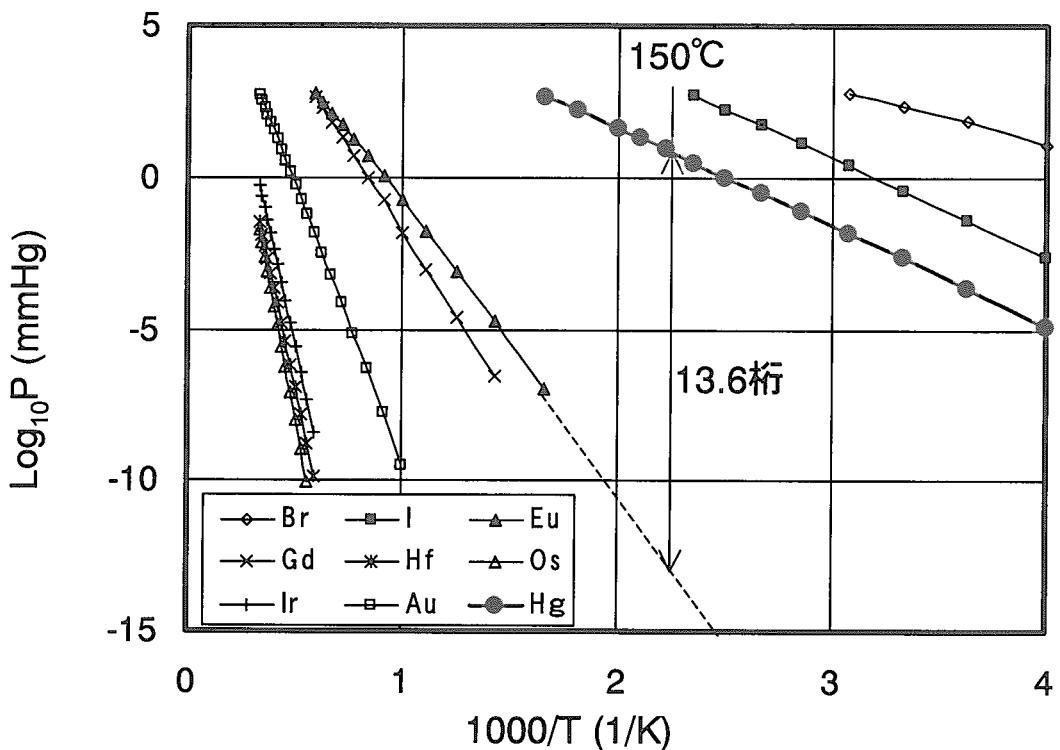


Fig. 3.4 Vapor pressure of elements for large contribution to total hazard potential

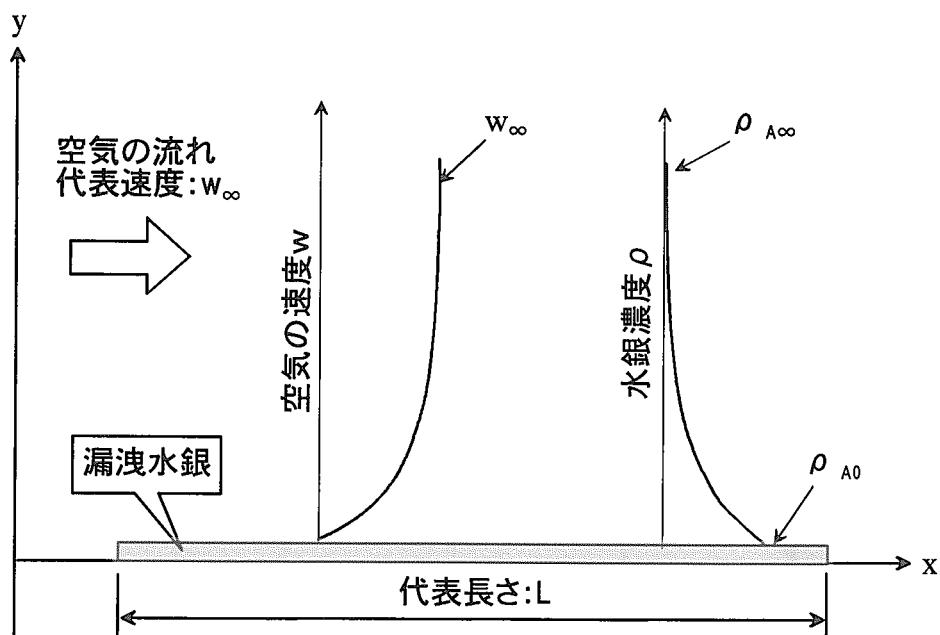


Fig. 3.5 Concept of mercury evaporation model for flat plate geometry

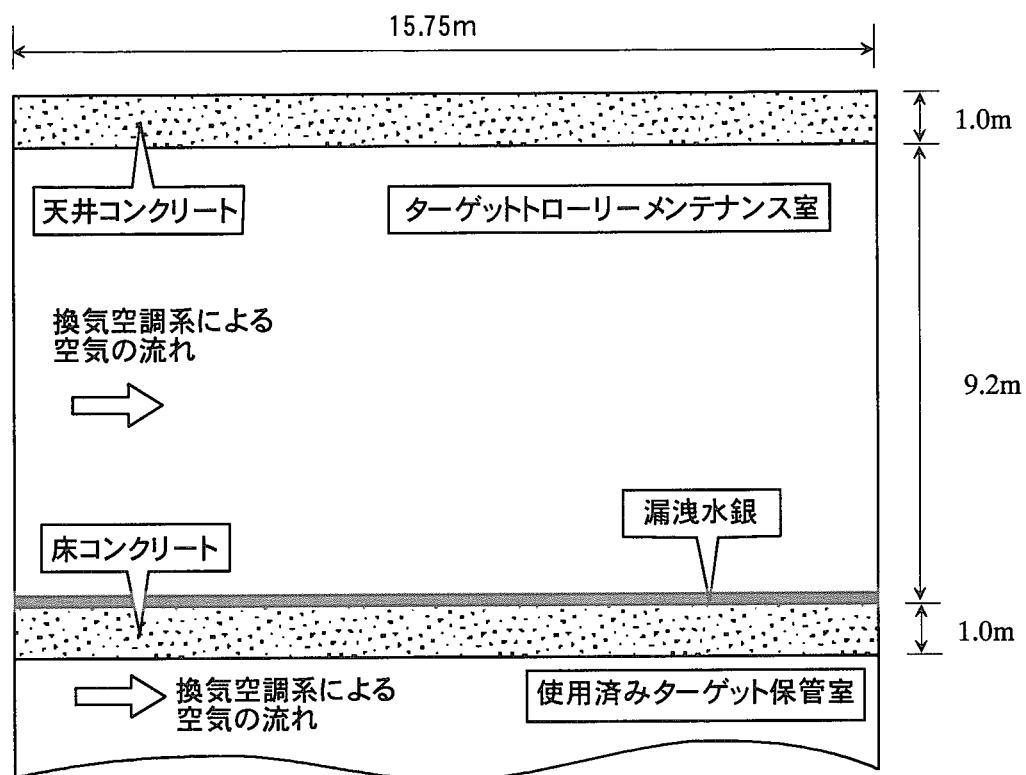


Fig. 3.6 Two-dimensional calculation model of mercury surface temperature

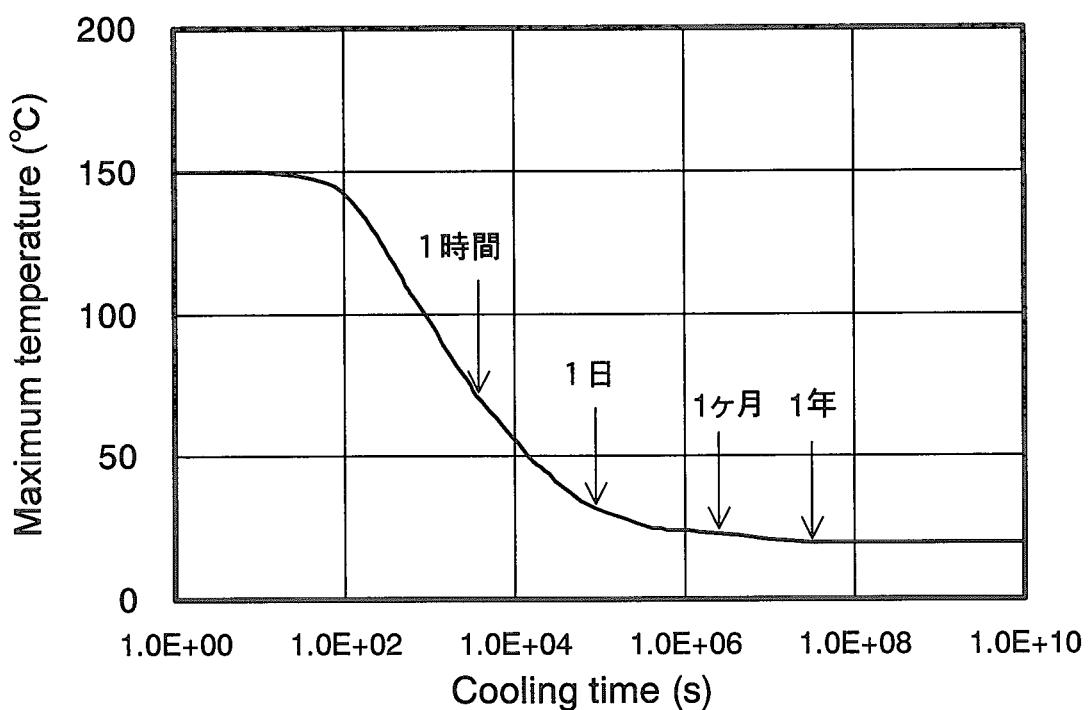


Fig. 3.7 Maximum temperature on mercury surface for base case as a function of cooling time

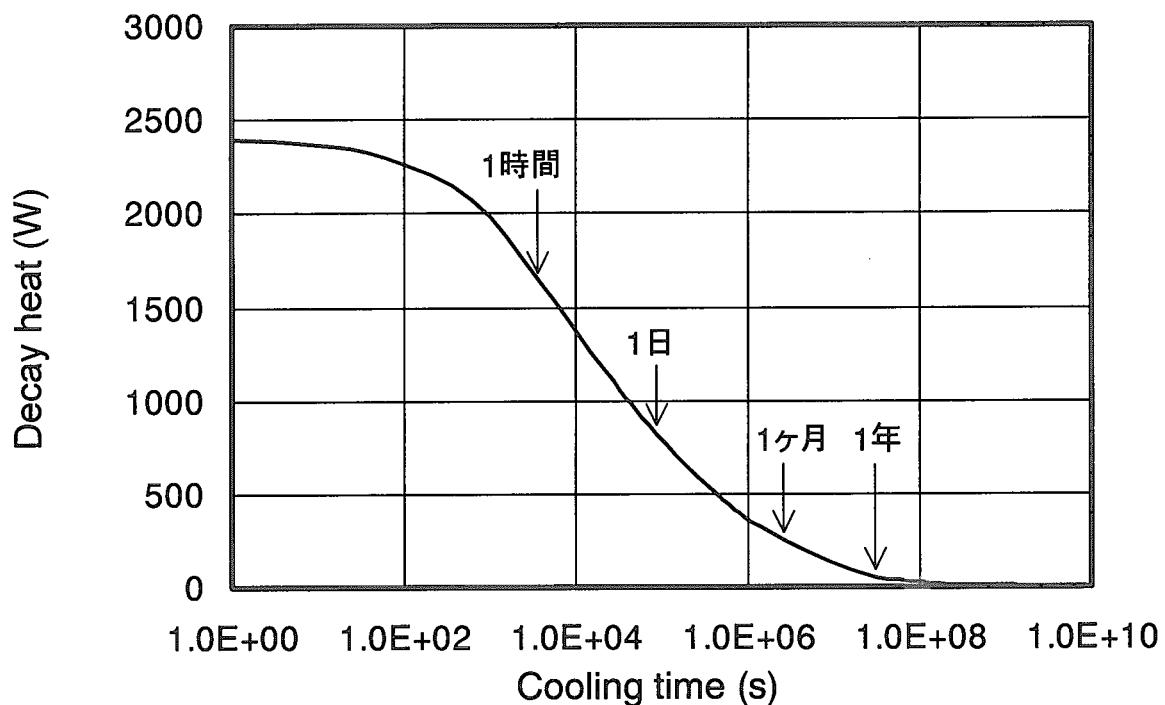


Fig. 3.8 Decay heat of mercury target after mercury target operation of 1MW power for 30 years

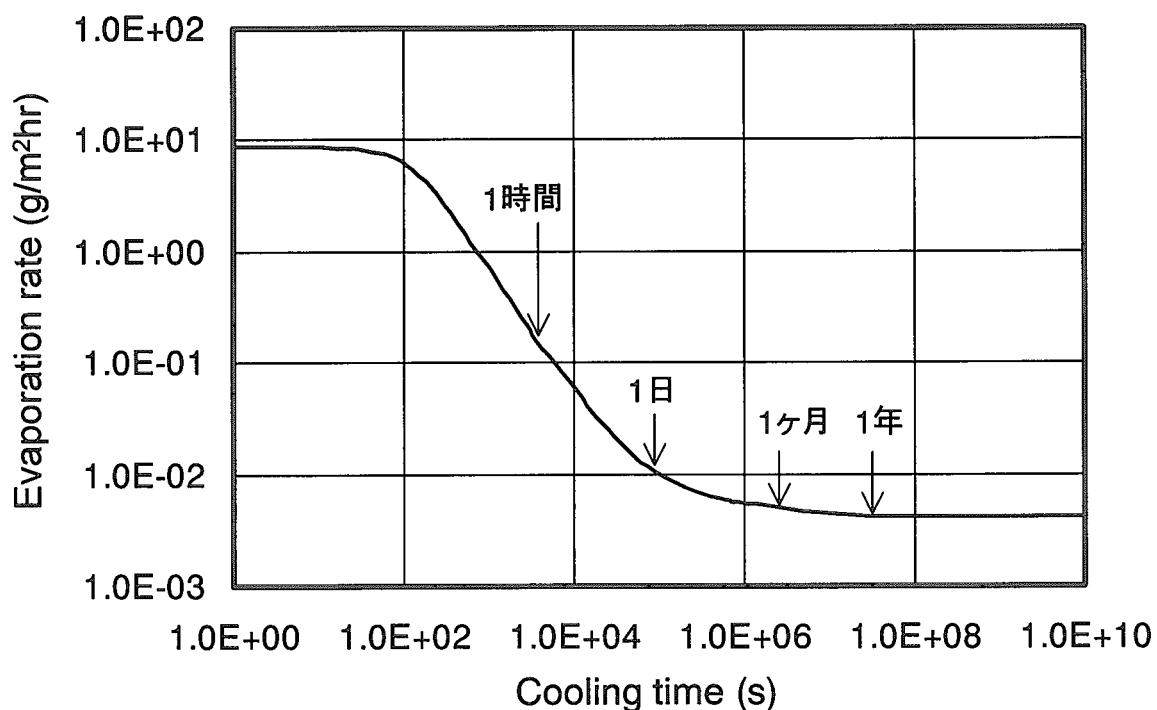


Fig. 3.9 Evaporation rate of mercury for base case as a function of cooling time

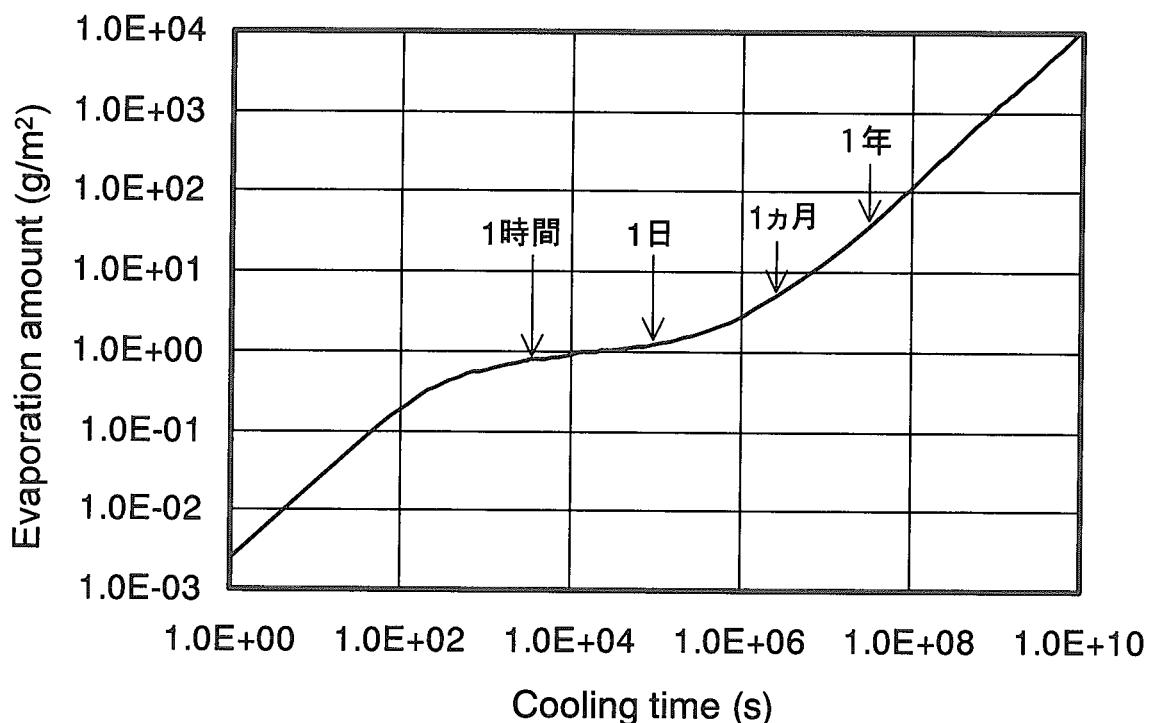


Fig. 3.10 Cumulative amount of mercury evaporation for base case as a function of cooling time

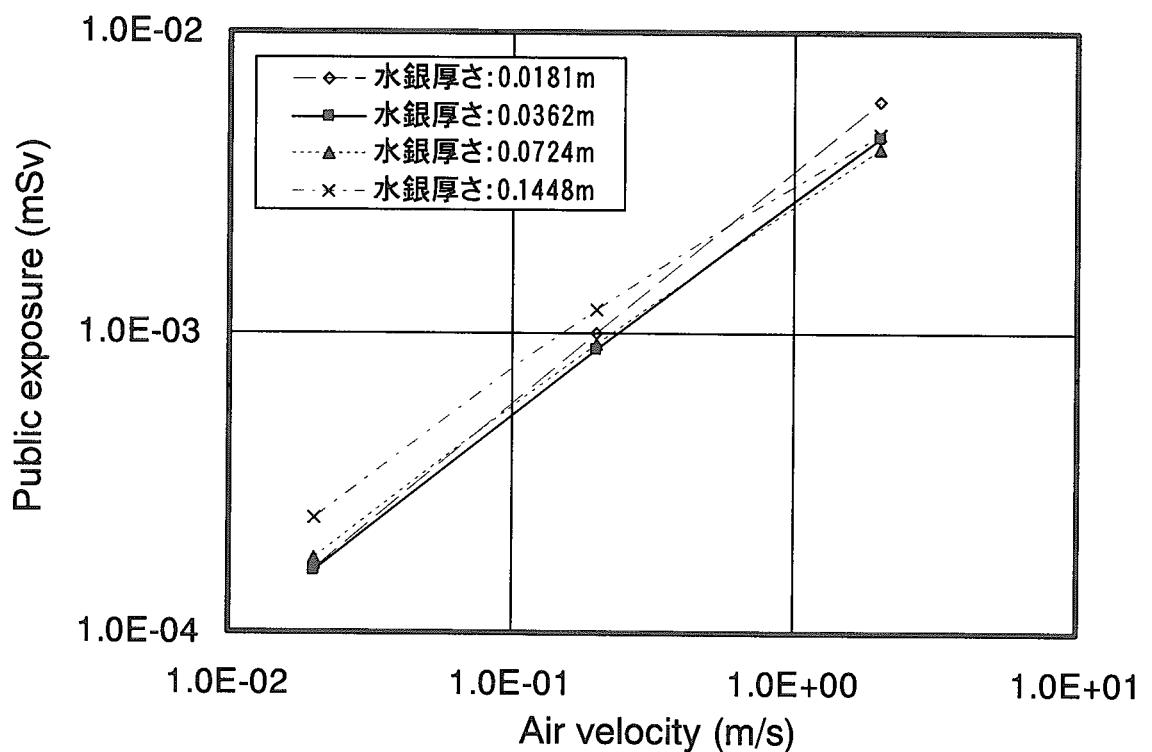


Fig. 3.11 Parameter survey results of public exposure by mercury, iodine and bromine for 10 days

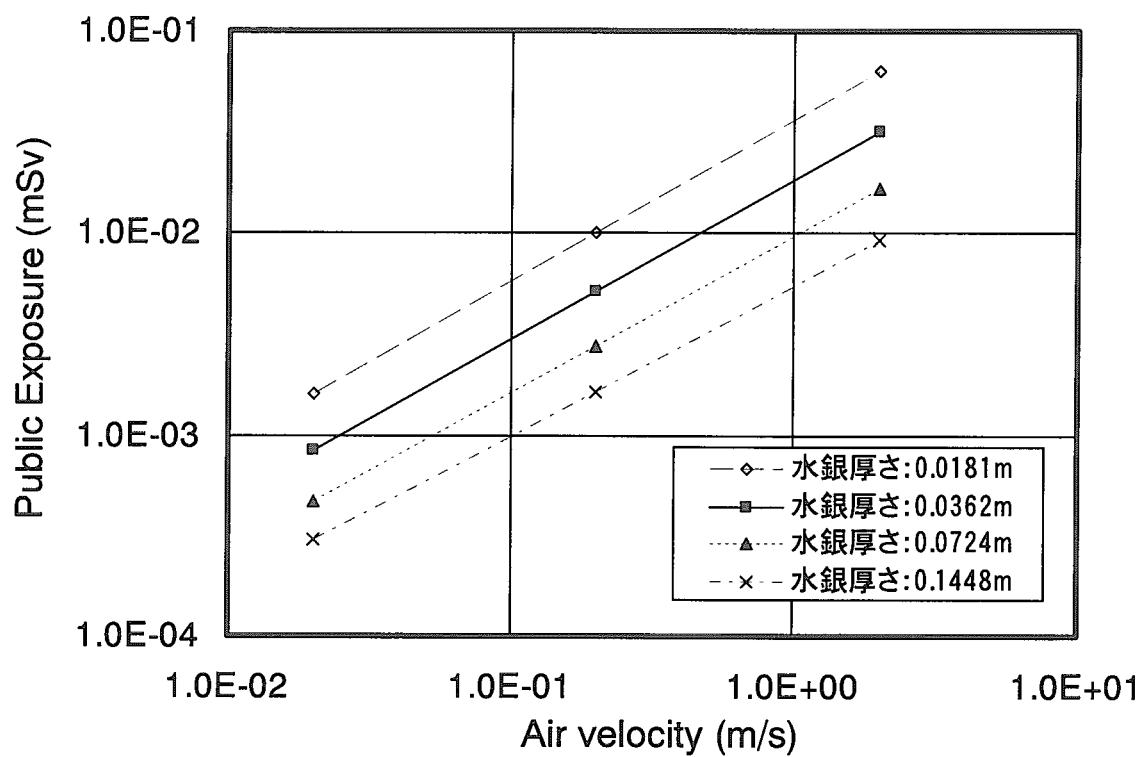


Fig. 3.12 Parameter survey results of public exposure by mercury, iodine and bromine for 1 year

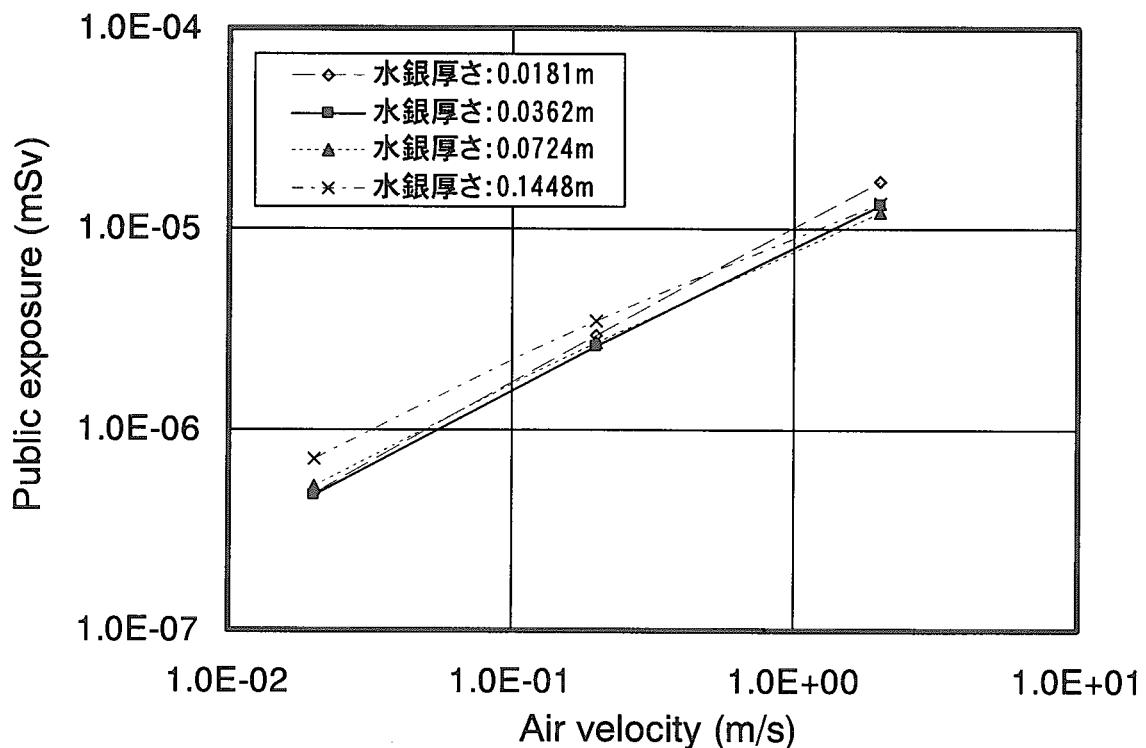


Fig. 3.13 Parameter survey results of public exposure by noble gas for 10 days

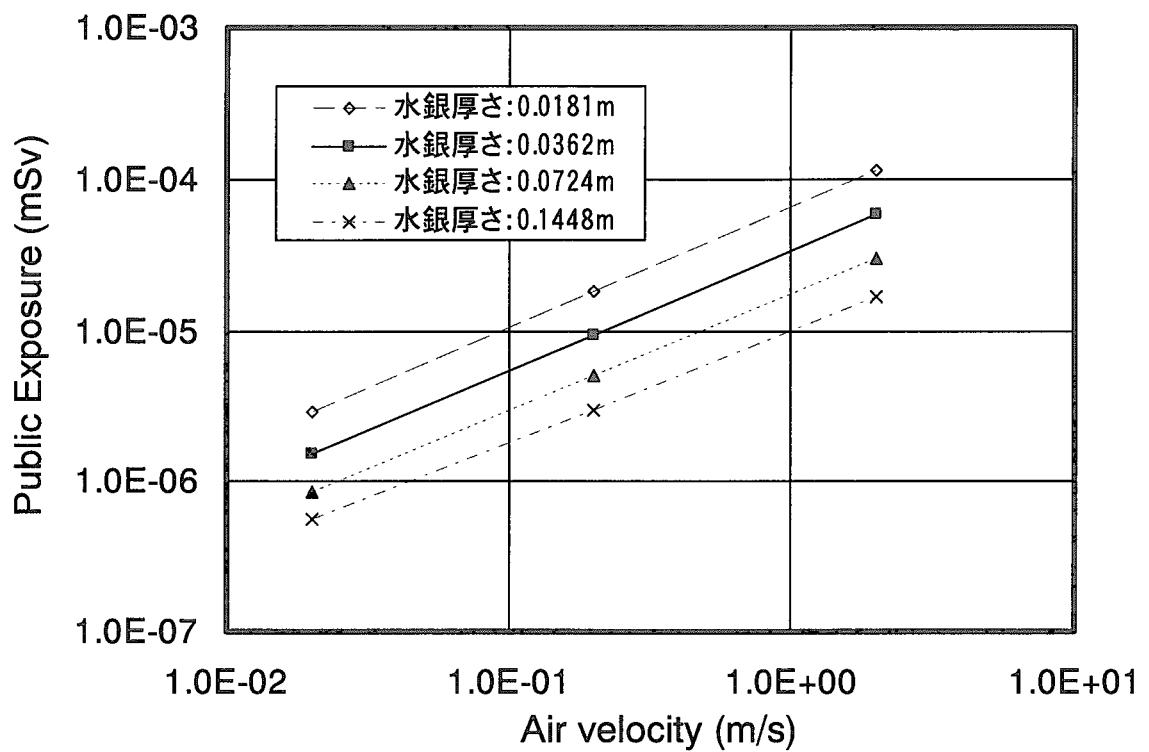


Fig. 3.14 Parameter survey results of public exposure by noble gas for 1 year

付録 A.1 水銀ターゲットの放射能と崩壊熱

水銀ターゲットの水銀内で生成する放射性物質を対象に、安全確保を検討する上で重要な放射能、崩壊熱を予備的に評価した結果についてまとめる。さらに、これらの評価値を具体的にイメージするため、同出力の研究炉用燃料中の核分裂生成物(FP)と比較するとともに、この結果に基づき、水銀ターゲットの特徴を安全確保の観点から整理した。

(1) 水銀ターゲットの計算モデル

水銀ターゲットの水銀内の放射性核種は、主に

- ・ 陽子ビームによる核破碎反応
- ・ 中性子捕獲反応等

によって生成される。陽子ビームによる核破碎反応で生成する放射性核種の量は、陽子ビームエネルギーと出力に依存する。一方、中性子捕獲反応等によって生成する放射性核種の量は、水銀内の中性子束レベルに依存するため、ターゲットベッセル内の機器、すなわち減速材容器や反射体等の構造や配置の影響を受ける。これらの機器は、予備概念設計を実施している最中であり、今後、概念/基本/詳細設計と進む段階で最適化が実施され、機器構造や配置が変更になる可能性がある。そこで、計算モデルの設定に当たっては、特に中性子捕獲反応等によって生成される放射性核種の生成量が過小評価にならないように配慮することが重要である。

水銀ターゲットの主要諸元を Table A.1.1 に、計算モデルを Fig. A.1.1 に示す。陽子ビーム (3.0GeV, 1MW) は、陽子ビームラインを通って水銀に入射される。水銀の周囲は、ターゲットケーシングとターゲット格納容器を模擬した SUS316、その外周を水銀内の中性子束レベルを高める反射体で全て囲っている。実際のターゲットベッセル内は、減速材や反射体等で構成されているが、この計算モデルでは、中性子の捕獲反応等で生成される水銀内の放射性物質の量を保守的に、すなわち過大評価するように、ベッセル内は全て反射体で構成されていると仮定した。

放射性核種の放射能と崩壊熱の計算は、NMTC/JAERI、MCNP-4A、DCHAIN-SP コードを用いた^(A.1.1)。

(2) 研究炉の計算モデル

研究炉の主要諸元を Table A.1.2 に示す。この炉心の設定に当たっては、研究炉 JRR-3 (炉心熱出力 : 20MW) を参考にして設定した。設定した炉心は、燃料や炉心形状等は JRR-3 と同一であるが、熱出力は水銀ターゲットシステムの陽子ビーム出力と同じ 1 MW に変更している。これは、水銀ターゲットと研究炉を同一の出力で規格化して比較するためである。計算は、Origen-2 version86^(A.1.2)を用いて計算した

(3) 放射能の特徴

水銀ターゲットと研究炉の放射能と質量数の関係を Fig. A.1.2 に示す。水銀ターゲットは 30 年、研究炉は 1 年連続運転した直後の放射能である。水銀ターゲットの放射能は、水銀の質量数 200 近傍を頂点として、質量数とともに単調減少する傾向にある。一方、研究炉は、核分裂反応で見られる 2 つのピークを持った分布である。水銀ターゲットと研究炉では、この分布の違い、すなわち生成される核種の種類と量が異なるため、放射能、ハザードポテンシャル、崩壊熱に有意な差を生じる。水銀ターゲットと研究炉における放射能と冷却時間の関係を Fig. A.1.3 に示す。この図より、水銀ターゲットの放射能は、冷却開始直後から 1 年までは研究炉より小さく、それ以降は大きくなる。一般に、安全確保の検討では、冷却直後の放射能レベルの高い期間が重要である。その観点からは、水銀ターゲットは研究炉に比べ約 1 衍低く、好ましい特徴を持っていると考えてよい。

(4) 崩壊熱の特徴

水銀ターゲットと研究炉における崩壊熱と冷却時間の関係を Fig. A.1.4 に示す。この図より、水銀ターゲットの崩壊熱は、研究炉に比べ一桁程度小さい値である。水銀ターゲットの崩壊熱の発熱密度は、水銀体積は $1 \sim 2\text{m}^3$ (ターゲット領域 : 0.05m^3 、循環系 $1 \sim 2\text{m}^3$)、崩壊熱の発熱量は最大で 2.4kW (運転停止直後) なので、 $1.2 \sim 2.4\text{mW/cm}^3$ である。一方、研究炉では、発熱量は最大 56kW と大きく、炉心体積は 0.21m^3 (Table A.1.2 参照) と小さいので、崩壊熱の発熱密度は 0.27W/cm^3 程度になる。すなわち、水銀ターゲットの発熱密度は、同出力の研究炉に比べ 2 衍程度小さい値であり、自然放熱で崩壊熱を除去できる可能性を示唆している。

参考文献

- (A.1.1) 甲斐哲也、私信
- (A.1.2) A. G. Croff, “ORIGEN2: A versatile computer code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials”, Nuclear Technology, vol. 62, (1983)

Table A.1.1 Major specification of mercury target

項目	主要諸元
陽子ビーム	
ビームエネルギー	3.0 GeV
ビーム出力	1.0 MW
ビーム半径	4.55 cm
水銀ターゲット	
ターゲット半径	6.05 cm
ターゲット長さ	60.0 cm
ターゲット容器	
材質	SUS316
半径	8.05 cm
反射体	
材質	Pb
反射体半径	80.0 cm
高さ	160.0 cm
運転期間	30.0 年

Table A.1.2 Major specification of research reactor

項目	主要諸元
熱出力	1.0 MW
燃料	
種類	ウランシリコンアルミニウム分散型合金
U-235 濃縮度	20.0 wt%
U-235 装荷量	14.0 kg
U-238 装荷量	56.0 kg
燃料芯材のウラン密度	4.8 g/cm ³
炉心形状	
高さ	75.0 cm
炉心等価半径（反射体含む）	30.0 cm
運転期間	1.0 年

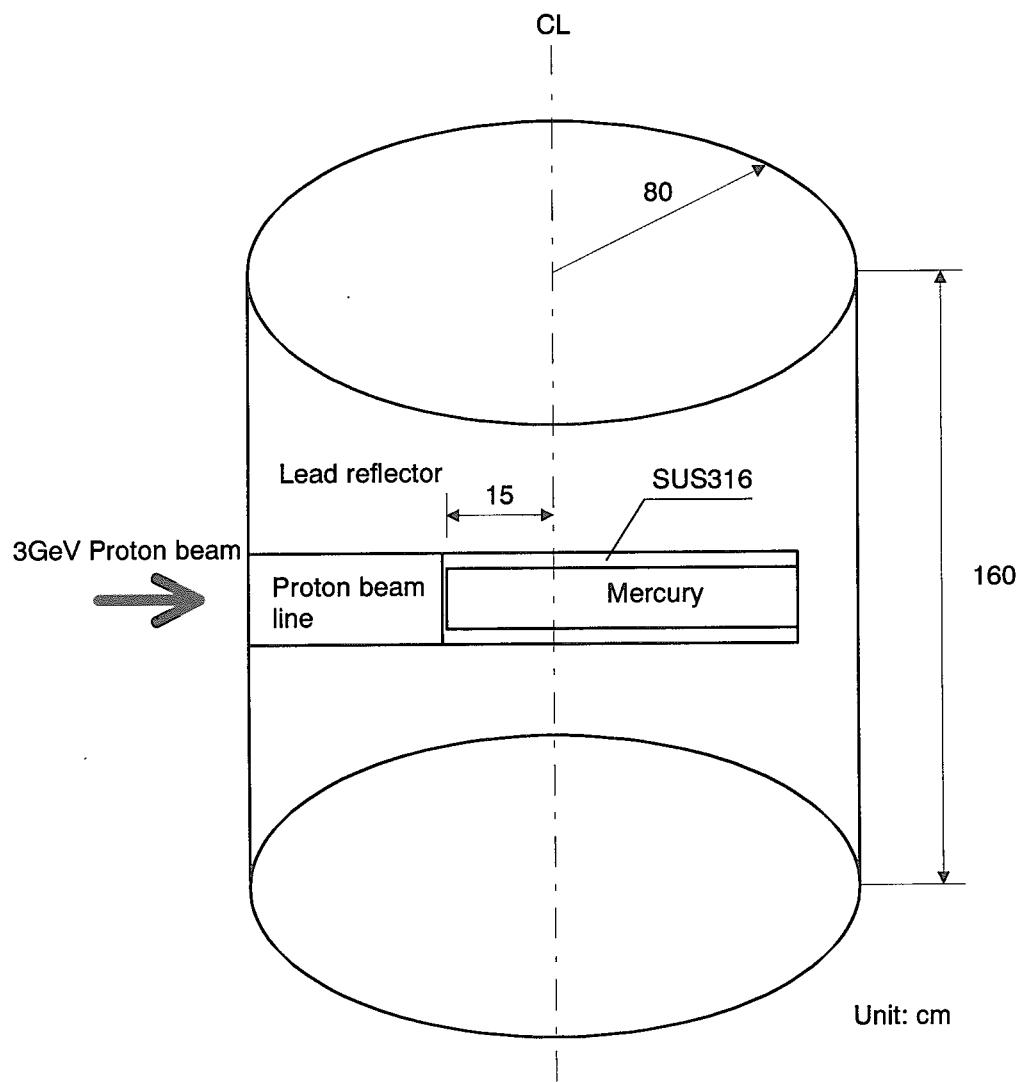


Fig. A.1.1 Calculation model of mercury target for radioactivity and decay heat

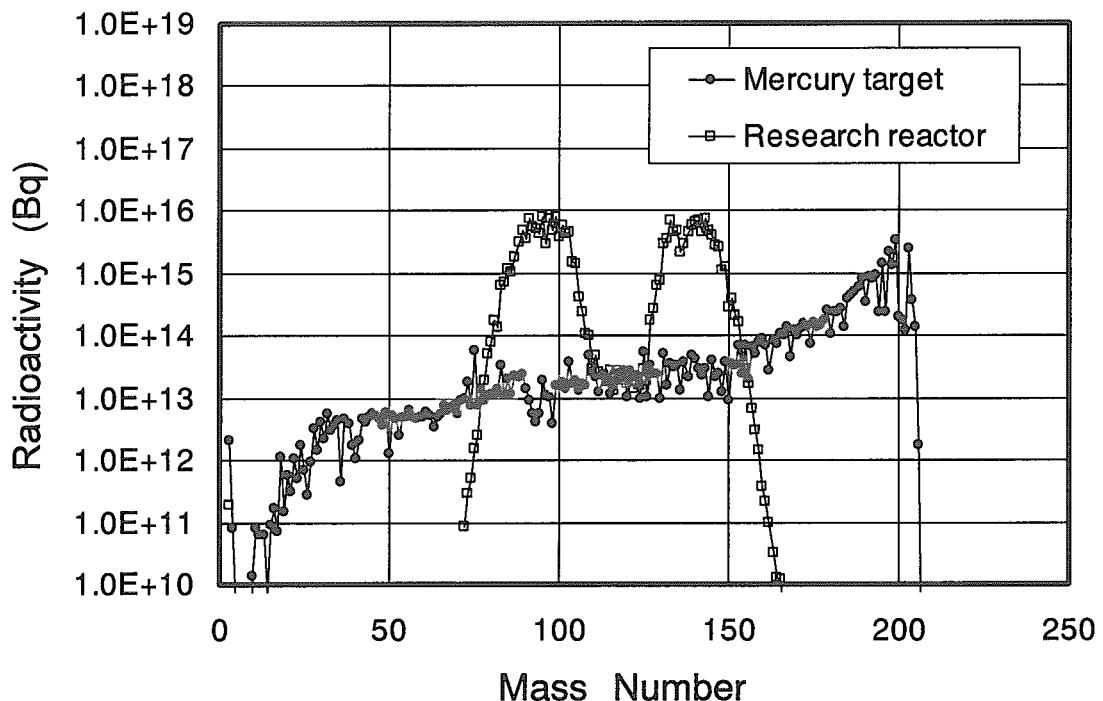


Fig. A.1.2 Comparison of radioactivity between mercury target and research reactor

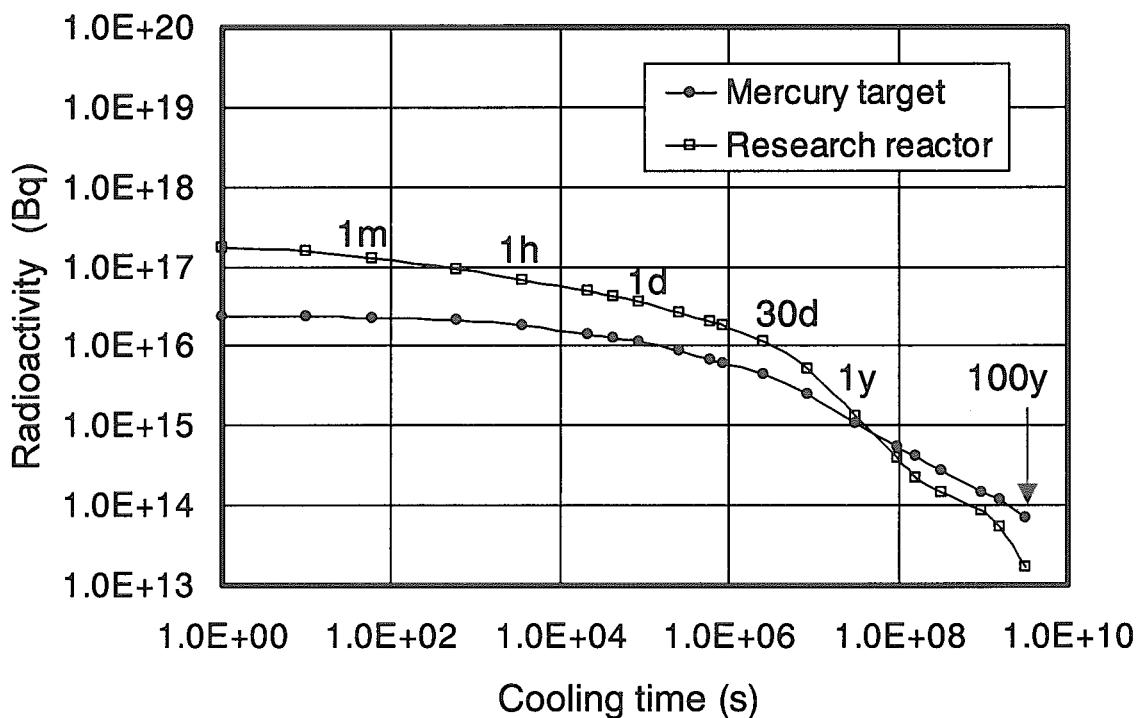


Fig. A.1.3 Relationship between radioactivity and cooling time for mercury target and research reactor of 1MW power

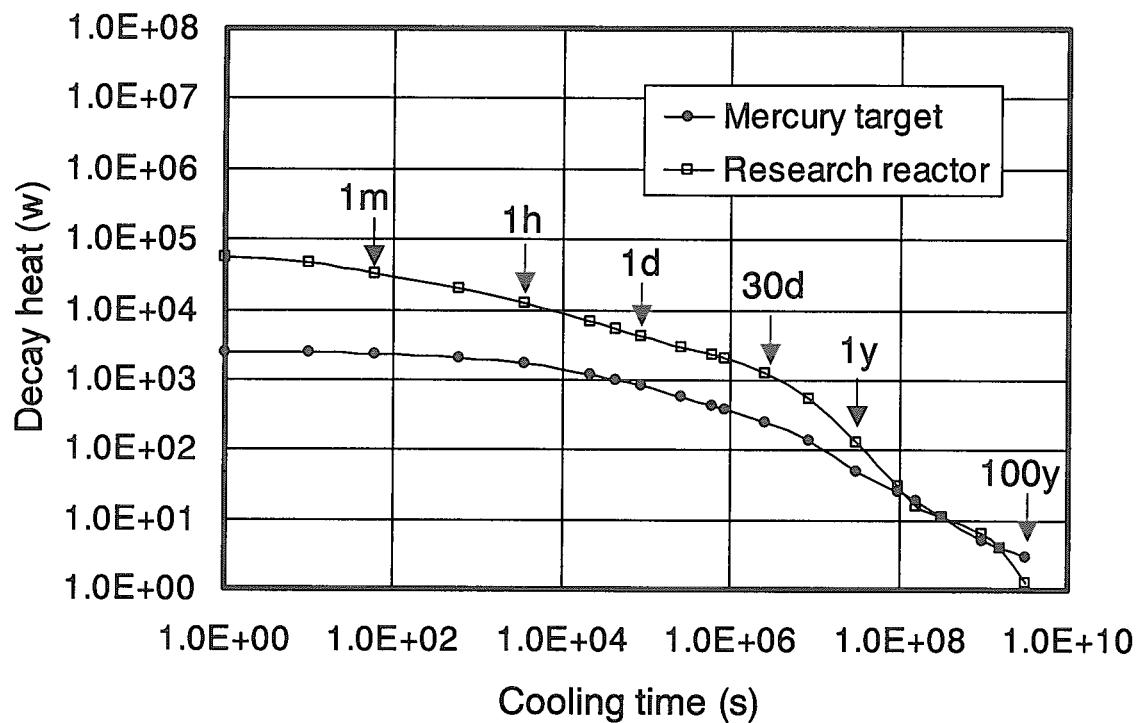


Fig. A.1.4 Relationship between decay heat and cooling time for mercury target and research reactor of 1MW power

付録 A.2 1次元平板体系における水銀蒸発量の計算モデル

1次元平板体系における水銀蒸発量の計算モデルについて記す。水銀の蒸発量は、本文で述べたように、単位時間、単位面積あたりに蒸発する水銀の量、すなわち質量流束 m_a を、物質伝達係数 α_D と界面における質量濃度の ρ_{A0} の積

$$m_a = \alpha_D \times \rho_{A0} \quad (\text{A.2.1})$$

で近似的に計算する。以下、 α_D と ρ_{A0} の計算モデルを記す。

(1) 物質伝達係数

対流物質伝達に関する無次元数には、以下のものがある。

$$\text{シャーウッド数(Sherwood number)} \quad Sh = \frac{\alpha_D \times L}{D_{AB}} \quad (\text{A.2.2})$$

$$\text{レイノズル数(Reynolds number)} \quad Re = \frac{w \times L}{\nu} \quad (\text{A.2.3})$$

$$\text{シュミット数(Schmidt number)} \quad Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (\text{A.2.4})$$

ここで、

L : 代表寸法

D_{AB} : 拡散係数

w : 代表速度

ν : 動粘性係数

である。本報では、水銀蒸発量の計算モデルとして1次元平板体系を仮定しているため、 Sh 数は無限平板における強制対流の相関式、すなわちコルバーン(Colburn)のアナロジーより、 Re 数及び Sc 数を用いて層流、乱流それぞれに対して次のように与えられる(A.2.1)。

(a) 層流

$$Sh = \frac{\alpha_D L}{D_{AB}} = 0.664 Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}} \quad (0.6 < Sc < 15) \quad (\text{A.2.5})$$

(b) 乱流

$$Sh = \frac{\alpha_D L}{D_{AB}} = 0.037 Re^{\frac{4}{5}} Sc^{\frac{1}{3}} \quad (A.2.6)$$

上式より、L、D_{AB}、w、νが決まればα_Dを求めることができる。これらのパラメータの中で、水銀蒸気と空気の拡散係数、すなわち2成分系気体の拡散係数が求めることが問題となり、種々のモデルが提案されている。2種類の気体AとBの拡散係数は、これらの気体の分子が真球で弾性散乱すると仮定した場合には、気体分子運動論より

$$D_{AB} = \frac{bT^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{\frac{1}{2}}}{Pd^2} \quad (A.2.7)$$

と理論的に求められている。ここで、

- D_{AB} : 2成分系気体の拡散係数 (cm²/sec)
- b : 定数
- T : 温度 (K)
- M_A, M_B : 分子量 (例えば、空気: 28.8、水銀: 200.59)
- P : 圧力 (atm)
- d : 分子間の距離 (cm)

である。上式の定数bを求めるため、Maxwell、Jeans、Chapman、Sutherland他により種々の研究が実施されている。ReidとSherwoodは、種々の温度に対する114の物質伝達に関する実験値との比較を行い、Chapman-Enskogの気体分子運動論で分子間の引力と斥力をLennard-Jonesポテンシャル、及び理想気体を仮定して導出した拡散係数

$$D_{AB} = \frac{0.0018583 T^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{\frac{1}{2}}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_{D,AB}} \quad (A.2.8)$$

ここで、

σ_{AB} : collision diameter (Å)
 $\Omega_{D,AB}$: 衝突積分 (collision integral)

を用いることを推奨している(A.2.2)。20 気圧以下では、この拡散係数を用いた場合の平均誤差が 7.5%と良好であるためである。なお、上式の Lennard-Jones の定数 σ_{AB} と $\Omega_{D,AB}$ は下記の方法により計算できる(A.2.2)。

Lennard-Jones ポテンシャルは、希ガス原子のように中性で球状とみなせる原子あるいは分子の間の力は、分子間の距離 r が小さいと斥力、大きいと引力（ファン・デル・ワース力）となる場 $U(r)$ を

$$U(r) = \frac{C_m}{r^m} + \frac{C_n}{r^n} \quad (\text{A.2.9})$$

という形で近似的に表したものである。 C_m 、 C_n は定数で、これを Lennard-Jones の(n,m)ポテンシャルと呼び、気体分子運動論、統計力学などで用いられる。特に、(6, 12)ポテンシャルが良く使われ、

$$U(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (\text{A.2.10})$$

という形に書き直したときの定数 σ と ϵ は、それぞれ、分子の代表的な直径(characteristic diameter of the molecule)、分子間の代表的なエネルギー(characteristic energy of interaction between the molecules)である。式(A.2.8)は、この(6, 12)ポテンシャルを仮定して求められたものである(A.2.3)。

σ_{AB} は、2 種類の気体 A と B の定数 σ をそれぞれ σ_A 、 σ_B とすると、

$$\sigma_{AB} = \frac{1}{2}(\sigma_A + \sigma_B) \quad (\text{A.2.11})$$

で求められる。Table A.2.1 に定数 σ の値を示す。一方、衝突積分 $\Omega_{D,AB}$ は $k_b T / \epsilon_{AB}$ の関数であり、Table A.2.2 から内挿によって求めることができる。 k_b は Boltzmann 定数である。なお、 ϵ_{AB} は

$$\frac{\varepsilon_{AB}}{k_B} = \sqrt{\frac{\varepsilon_A}{k_B} \frac{\varepsilon_B}{k_B}} \quad (\text{A.2.12})$$

で計算できる。 ε/k_B はTable A.2.1に示した。

拡散係数は、式(7)より温度と圧力の関数である。温度 T_1 の拡散係数 D_{T1} が測定等によって得られた場合、同じ圧力条件のもとでは温度 T_2 の拡散係数 D_{T2} は

$$D_{T2} = D_{T1} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{(\Omega_{D,AB})_{T_1}}{(\Omega_{D,AB})_{T_2}} \quad (\text{A.2.13})$$

で推定できる。

濃度境界層(concentration boundary layer)の厚さ δ_c は通常行われているように、物質Aの質量濃度(mass concentration) ρ_{Ay} が

$$\rho_{Ao} - \rho_{Ay} = 0.99(\rho_{Ao} - \rho_{A\infty}) \quad (\text{A.2.14})$$

になるまでの距離として定義した。プロファイル法による近似では、濃度境界層は、

$$\frac{\delta_c}{x} = \sqrt{\frac{280}{13}} \left(\frac{13}{14} \right)^{\frac{1}{3}} \text{Re}^{-\frac{1}{2}} \text{Sc}^{-\frac{1}{3}} = 4.528 \text{Re}^{-\frac{1}{2}} \text{Sc}^{-\frac{1}{3}} \quad (\text{A.2.15})$$

で近似的に計算できる。

(2) 界面における質量濃度

界面における質量濃度は、水銀と空気の平衡濃度 C_g^* であると仮定する。平衡濃度は、蒸気圧 P_{Hg} (kPa)から決定できる。水銀の蒸気圧(1気圧の場合)は、1%の精度で

$$\log_{10} P_{Hg} = 7.150 - \frac{3212.5}{T}, T < 423 \text{ K} \quad (\text{A.2.16})$$

で近似できる(A.2.4)。理想気体を想定すれば、平衡濃度は、

$$C_g^* = \frac{n}{V} = \frac{P_{Hg}}{RT} \quad (\text{A.2.17})$$

ここで、

R : 気体定数(8.31451 J/K mol)

である。

参考文献

- (A.2.1) 西川兼康、藤田恭伸、“伝熱学”、理工学社 (1982)
- (A.2.2) A. H. P. Skelland, “Diffusional Mass Transfer” John Wiley & Sons (1974)
- (A.2.3) R. B. Bird, et al., “Transport Phenomena”, p511, John Wiley & Sons (1960)
- (A.2.4) “Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology,” , 4th Ed. Vol. 16, John Wiley & Sons (1991)

Table A.2.1 Lennard-Jones force constants

Molecule	Compound	σ Å	ϵ/k_b K	Molecule	Compound	σ Å	ϵ/k_b K	Molecule	Compound	σ Å	ϵ/k_b K
Ar	Argon	3.542	93.3	C_2H_6	Ethane	4.443	215.7	HCl	Hydrogen chloride	3.339	344.7
4He	Helium	2.551	10.22	C_2H_5Cl	Ethyl chloride	4.898	300	HF	Hydrogen fluoride	3.148	330
Kr	Krypton	3.655	178.9	C_2H_5OH	Ethanol	4.530	362.6	Hl	Hydrogen iodine	4.211	288.7
Ne	Neon	2.820	32.8	C_2N_2	Cyanogen	4.361	348.6	H2	Hydrogen	2.827	59.7
Xe	Xenon	4.047	231.0	CH_3OCH_3	Methyl ether	4.307	395.0	H_2O	Water	2.641	809.1
Air	Air	3.711	78.6	CH_2CHCH_3	Propylene	4.678	298.9	H_2O_2	Hydrogen peroxide	4.196	289.3
AsH_3	Arsine	4.145	259.8	CH_3CCH	Methylacetylene	4.761	251.8	H_2S	Hydrogen sulfide	3.623	301.1
BCl_3	Boron chloride	5.127	337.7	C_3H_6	Cyclopropane	4.807	248.9	Hg	Mercury	2.969	750
BF_3	Boron fluoride	4.198	186.3	C_3H_8	Propane	5.118	237.1	$HgBr_2$	Mercuric bromide	5.080	686.2
$B(COCH_3)_3$	Methyl borate	5.503	396.7	$n-C_3H_7OH$	n -Propyl alcohol	4.549	576.7	$HgCl_2$	Mercuric chloride	4.55	750
Br_2	Bromine	4.296	507.9	CH_3COCH_3	Acetone	4.600	560.2	HgI_2	Mercuric iodide	5.625	695.6
CCl_4	Carbon tetrachloride	5.947	322.7	CH_3COOCH_3	Methyl acetate	4.936	469.8	I_2	Iodine	5.160	474.2
CF_4	Carbon tetrafluoride	4.662	134.0	$n-C_4H_{10}$	n -Butane	4.687	531.4	NH_3	Ammonia	2.900	558.3
$CHCl_3$	Chloroform	5.389	340.2	$iso-C_4H_{10}$	Isobutane	5.278	330.1	NO	Nitric oxide	3.492	116.7
CH_2Cl_2	Methylene chloride	4.898	356.3	$C_2H_5OC_2H_5$	Ethyl ether	5.678	313.8	NOCl	Nitrosyl chloride	4.112	395.3
CH_3Br	Methyl bromide	4.118	449.2	$CH_3COOC_2H_5$	Ethyl acetate	5.205	521.3	N_2	Nitrogen	3.798	71.4
CH_3Cl	Methyl chloride	4.182	350	$n-C_5H_{12}$	n -pentane	5.784	341.1	N_2O	Nitrous oxide	3.828	232.4
CH_3OH	Methanol	3.626	481.8	$C(CH_3)_4$	2,2-Dimethylpropane	6.464	193.4	O_2	Oxygen	3.467	106.7
CH_4	Methane	3.758	148.6	C_6H_6	Benzene	5.349	412.3	PH_3	Phosphine	3.981	251.5
CO	Carbon monoxide	3.680	91.7	C_6H_{12}	Cyclohexane	6.182	297.1	SF_6	Sulfur hexafluoride	5.128	222.1
COS	Carbonyl sulfide	4.130	336.0	$n-C_6H_{14}$	n -Hexane	5.949	399.3	SO_2	Sulfur dioxide	4.112	335.4
CO_2	Carbon dioxide	3.941	195.2	Cl_2	Chlorine	4.217	316.0	SiF_4	Silicon tetrafluoride	4.880	171.9
CS_2	Carbon disulfide	4.483	467	F_2	Fluorine	3.357	112.6	SiH_4	Silicon hydride	4.084	207.6
C_2H_2	Acetylene	4.033	231.8	HBr	Hydrogen bromide	3.353	449	$SnBr_4$	Stannic bromide	6.388	563.7
C_2H_4	Ethylen	4.163	224.7	HCN	Hydrogen cyanide	3.630	569.1	UF_6	Uranium hexafluoride	5.967	236.8

(A. H. P. Skelland, 'Diffusional Mass Transfer', John Wiley & Sons, 1974 の Appendix より引用)

Table A.2.2 Values of collision integral based on the Lennard-Jones potential

$k_b T / \varepsilon_{AB}$	$\Omega_{D,AB}$	$k_b T / \varepsilon_{AB}$	$\Omega_{D,AB}$	$k_b T / \varepsilon_{AB}$	$\Omega_{D,AB}$
0.30	2.662	1.65	1.153	4.00	0.8836
0.35	2.476	1.70	1.140	4.10	0.8788
0.40	2.318	1.75	1.128	4.20	0.8740
0.45	2.184	1.80	1.116	4.30	0.8694
0.50	2.066	1.85	1.105	4.40	0.8652
0.55	1.966	1.90	1.094	4.50	0.8610
0.60	1.877	1.95	1.084	4.60	0.8568
0.65	1.798	2.00	1.075	4.70	0.8530
0.70	1.729	2.10	1.057	4.80	0.8492
0.75	1.667	2.20	1.041	4.90	0.8456
0.80	1.612	2.30	1.026	5.00	0.8422
0.85	1.562	2.40	1.012	6.00	0.8124
0.90	1.517	2.50	0.9996	7.00	0.7896
0.95	1.476	2.60	0.9878	8.00	0.7712
1.00	1.439	2.70	0.9770	9.00	0.7556
1.05	1.406	2.80	0.9672	10.00	0.7424
1.10	1.375	2.90	0.9576	20.00	0.6640
1.15	1.346	3.00	0.9490	30.00	0.6232
1.20	1.320	3.10	0.9406	40.00	0.5960
1.25	1.296	3.20	0.9328	50.00	0.5756
1.30	1.273	3.30	0.9256	60.00	0.5596
1.35	1.253	3.40	0.9186	70.00	0.5464
1.40	1.233	3.50	0.9120	80.00	0.5352
1.45	1.215	3.60	0.9058	90.00	0.5256
1.50	1.198	3.70	0.8998	100.00	0.5130
1.55	1.182	3.80	0.8942	200.00	0.4644
1.60	1.167	3.90	0.8888	400.00	0.4170

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	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
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
ト	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーソル	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際量衡局1985年刊行による。ただし、1および1uの値はCODATAの1986年版によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ペールも含まれているが日常の単位のところでは省略した。
- barは、JISでは液体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類される。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barndi「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁶ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気) 仕事率 1 PS (仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS (仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
3.7 × 10 ¹⁰	1	

吸収線量	Gy	rad
	1	100
0.01	1	

照射線量	C/kg	R
	1	3876
2.58 × 10 ⁻⁴	1	

線量当量	Sv	rem
	1	100
0.01	1	

