

大洗原子力工学研究所ホットラボ施設における ローカルサンプリングシステム一部停止の影響評価 －放射性物質の拡散に関する気流解析－

Effect Evaluation of Partial Termination of Local Sampling System in
Hot Laboratory at Oarai Nuclear Engineering Institute
– Airflow Analysis on Diffusion of Radioactive Material –

福井 誠 千頭和 慎吾 菊地 紀宏 田中 正暁
橋本 周

Makoto FUKUI, Shingo CHIZUWA, Norihiro KIKUCHI, Masaaki TANAKA
and Makoto HASHIMOTO

大洗原子力工学研究所
放射線管理部

Radiation Protection Department
Oarai Nuclear Engineering Institute

JAEA-Review

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。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒 319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 番地 49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section,
Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

**大洗原子力工学研究所ホットラボ施設における
ローカルサンプリングシステム一部停止の影響評価
—放射性物質の拡散に関する気流解析—**

日本原子力研究開発機構
大洗原子力工学研究所 放射線管理部

福井 誠、千頭和 慎吾*、菊地 紀宏⁺¹、田中 正暁⁺¹、橋本 周⁺²

(2025 年 9 月 2 日受理)

大洗原子力工学研究所ホットラボ施設（以下、「HL 施設」という）は、ホットセル内で燃料試料や原子炉材料の照射後試験を行う施設である。作業環境中の空気中放射性物質濃度を評価するための放射線管理設備として、管理区域内の空気を捕集するローカルサンプリングシステム（以下、「LSS」という）が設置されている。本施設の LSS には、ローカルサンプリング端（以下、「LSE」という）と呼ばれるサンプリング箇所が 23 箇所ある。そのうち一部の LSEにおいて、サンプリングを行わない状態が継続し、空気中放射性物質濃度の測定が規定どおりに行われていなかった。そこで、本報告では、LSS 一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりにより、空気中放射性物質濃度の管理に対してどのような影響を及ぼすのかについて、HL 施設の管理区域内にあるホットセルからの放射性物質の拡散を想定した気流解析を用いて評価した。

評価に当たっては、広いエリアに 10 箇所の LSE が設置されているサービスエリアを評価領域とした。評価領域に対して仮想汚染粒子の拡散を含む気流解析を実施した。ホットセルからの仮想汚染粒子の拡散状況や LSE によるサンプリング状況について、LSS が全稼働している場合と 4 箇所停止している場合の結果を比較した。これらの評価結果は、空気中放射性物質濃度の管理に対して、LSS 一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりの影響が小さいことを示した。

大洗原子力工学研究所：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 番地

+1 高速炉研究開発部

+2 安全・核セキュリティ統括本部 安全管理部

* 量子科学技術研究開発機構

**Effect Evaluation of Partial Termination of Local Sampling System
in Hot Laboratory at Oarai Nuclear Engineering Institute
- Airflow Analysis on Diffusion of Radioactive Material -**

Makoto FUKUI, Shingo CHIZUWA*, Norihiro KIKUCHI⁺¹, Masaaki TANAKA⁺¹ and
Makoto HASHIMOTO⁺²

Radiation Protection Department, Oarai Nuclear Engineering Institute
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 2, 2025)

Hot laboratory (HL) at Oarai Nuclear Engineering Institute is a facility that conducts post-irradiation testing of fuel samples and reactor materials in hot cells. A set of local sampling system (LSS) is installed as a radiation control equipment to monitor the concentration of radioactive materials in the air in work environment. The LSS of HL equipped 23 sampling points, which are called as local sampling ends (LSE). It was recognized that air sampling had not operated at some of the LSE, and the concentration of radioactive materials in the air was not measured as prescribed. In this report, we evaluated the effect of partial termination of the LSS and the resulting increase in sampling intervals on the control of radioactive material concentrations in the air using airflow analysis assuming the diffusion of radioactive materials from hot cells in the controlled area of HL.

The Service Area of the HL, where 10 LSEs were set in a wide area, was selected as an evaluation area. Airflow analysis including the diffusion of virtual contaminant particles was conducted on the evaluation area. Diffusion of virtual contaminants from hot cells and sampling of virtual contaminants at LSEs are simulated in the case of LSS in fully working and LSS with termination of 4 LSEs. The evaluation results showed that the effect of the partial termination of LSS and the resulting increase in sampling intervals on the control of the concentration of radioactive materials in the air are small.

Keywords: Local Sampling System, Flow Analysis, Diffusion of Radioactive Material, Radiation Control, Air Monitoring, Hot Laboratory

+1 Fast Reactor Research and Development Department

+2 Safety Administration Department, Safety and Nuclear Security Administration Head Office

* National Institutes for Quantum Science and Technology

目 次

1. 序論 -----	1
2. HL 施設サービスエリアの概要 -----	3
2.1 HL 施設サービスエリアの概要 -----	3
2.2 各設備の配置図・寸法-----	3
2.3 給気量・排気量-----	3
2.4 LSS のサンプリング状態 -----	3
3. 放射性物質の拡散を含む気流解析条件 -----	4
3.1 気流解析の方法及び手順-----	4
3.2 解析モデルの対象範囲とメッシュ分割-----	4
3.3 拡散シナリオ、解析ケース、解析条件-----	5
3.4 空気の流出・流入に関する境界条件-----	5
4. 放射性物質の拡散を含む気流解析の結果 -----	7
4.1 LSE 周辺及びサービスエリア全体における流速及び気流 -----	7
4.2 グループ A における仮想汚染粒子の拡散状況 -----	9
4.3 グループ A における仮想汚染粒子流出量の時間変化 -----	10
4.4 グループ B における仮想汚染粒子の拡散状況 -----	11
4.5 グループ B における仮想汚染粒子流出量の時間変化 -----	11
4.6 仮想汚染粒子累積流出量の比較による LSS 一部停止の影響評価 -----	12
5. 結論 -----	16
謝辞 -----	19
参考文献 -----	19

Contents

1. Introduction	1
2. Outlines of Service Area in Hot Laboratory	3
2.1 Outlines of Service Area in Hot Laboratory	3
2.2 Layouts and Dimensions of Each Equipment	3
2.3 Capacity of Air Supply/Exhaust	3
2.4 LSS Sampling Status	3
3. Conditions of Flow Analysis Including Diffusion of Radioactive Material	4
3.1 Method and Procedure of Airflow Analysis	4
3.2 Analysis Model and Mesh Splitting	4
3.3 Diffusion Scenarios, Analysis Cases and Analysis Conditions	5
3.4 Boundary Conditions for the Air Outflow and Inflow	5
4. Results of Flow Analysis Including Diffusion of Radioactive Material	7
4.1 Velocity and Airflow around LSE and in the Service Area	7
4.2 Diffusion of Virtual Contaminant Particles in Group A	9
4.3 Time Variation of Virtual Contaminant Particles Outflow in Group A	10
4.4 Diffusion of Virtual Contaminant Particles in Group B	11
4.5 Time Variation of Virtual Contaminant Particles Outflow in Group B	11
4.6 Effect Evaluation of Partial Shutdown of LSS by Comparison of the Cumulative Virtual Contaminant Particles Outflow	12
5. Concluding Remarks	16
Acknowledgements	19
References	19

表リスト

Table 2.1	HL 施設サービスエリア内における給気量及び排気量（定格量） -----	23
Table 2.2	LSS のサンプリング流量-----	24
Table 3.1	仮想汚染粒子の放出条件 -----	28
Table 3.2	解析ケース -----	28
Table 3.3	解析条件 -----	29
Table 3.4	解析モデル対象範囲への空気の流入・流出に関する境界条件 -----	30
Table 4.1	C-2 セルと各境界面の位置関係-----	36
Table 4.2	C-8 セルと各境界面の位置関係-----	40
Table 4.3	24 時間後における各境界面からの仮想汚染粒子の累積流出量-----	41
Table 4.4	仮想汚染粒子の累積流出量から算出した放射能量 -----	42

図リスト

Fig. 2.1	HL 施設の断面図 -----	20
Fig. 2.2	サービスエリア 1 階の配置図 -----	21
Fig. 2.3	各設備の配置図と寸法 -----	22
Fig. 3.1	気流解析の実施手順 -----	25
Fig. 3.2	解析モデルの対象範囲及び解析モデル（全景） -----	26
Fig. 3.3	床面から 1.21 m の高さにおける解析モデルの断面図-----	27
Fig. 4.1	LSE 周辺の流速と気流-----	31
Fig. 4.2	サービスエリア全体の気流の向き -----	32
Fig. 4.3	仮想汚染粒子の拡散状況（グループ A） -----	33
Fig. 4.4	排気グリル及びホットセルへの仮想汚染粒子流出量の時間変化（グループ A） ---	34
Fig. 4.5	LSE への仮想汚染粒子流出量の時間変化（グループ A） -----	35
Fig. 4.6	仮想汚染粒子の拡散状況（グループ B） -----	37
Fig. 4.7	排気グリル及びホットセルへの仮想汚染粒子流出量の時間変化（グループ B） ---	38
Fig. 4.8	LSE への仮想汚染粒子流出量の時間変化（グループ B） -----	39

This is a blank page.

1. 序論

大洗原子力工学研究所ホットラボ施設（以下、「HL 施設」という）は、ホットセル内において、燃料試料や原子炉材料の照射後試験を行う施設である。本施設では、作業環境中の空气中放射性物質濃度モニタリングのための放射線管理設備として、大洗原子力工学研究所（北地区）核燃料物質使用変更許可申請書（施設編）ホットラボ（施設番号 2）（以下、「許可書」という）において、23 箇所のローカルサンプリング端（以下、「LSE」という）で構成されるローカルサンプリングシステム（以下、「LSS」という）を設置することとしている。本施設の LSS では、管理区域内に浮遊した汚染粒子等を含む塵埃を捕集するためのろ紙（以下、「フィルタ」という）を各 LSE の先端にそれぞれ 1 枚ずつ装着し、1 週間単位で継続的なサンプリングを実施した後、フィルタの回収・交換を行う管理方法をとっている。回収したフィルタは、法令に基づく作業環境中の空气中放射性物質濃度を評価するための放射線管理用試料として用いることとなる。

HL 施設の使用許可上、本施設に設置している 23 箇所すべての LSE において、サンプリングの実施及び回収したフィルタ 23 枚の測定を行い、法令に基づいた作業環境中の空气中放射性物質濃度の監視及び評価が必要である。しかし、2022 年 6 月の原子力規制検査において、施設内に設置されている 23 箇所の LSE のうち、8 箇所のサンプリングを実施していなかったことが確認された。その後、過去の経緯も含めて放射線管理状況について記録等の調査を行ったところ、許可書に記載された 23 箇所すべての LSE において、同時にサンプリングを実施した実績がないことが判明した。この事実から、これまでの管理方法が大洗原子力工学研究所（北地区）核燃料物質使用施設等保安規定に基づく空気中の放射性物質濃度に係る測定の要求事項を満足しておらず、作業環境中の空气中放射性物質濃度のモニタリングに係る放射線管理の不備とされた。なお、本件に関しては、不適合管理及び是正処置に基づき、サンプリングを実施していなかった 8 箇所の LSE を含む、許可書に記載された 23 箇所すべての LSE を用いたサンプリングを 2022 年 8 月から開始している。

LSS 一部停止に伴う作業環境中の空气中放射性物質濃度の監視・評価の不備を受け、LSE のサンプリング箇所の一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりが空气中放射性物質濃度の管理に対して、どの程度の影響を及ぼすのかを検討するため、放射性物質の空気サンプリングに関する文献¹⁻⁵⁾を調査した。調査対象とした文献の多くにおいて、「LSE の設置箇所は施設・作業・核種により適したモニタリングとする」などといった定性的な記載に留まっており、作業場所における LSE の最適なサンプリング数やサンプリング箇所の間隔を決定する上で定量的に評価したものはなかった。また、一部の文献¹⁾では、LSE が評価できるサンプリング範囲について、「比較的大量の（放射性物質の）放出があった場合でも、放出地点から数 m といった近くで監視しない限り、連続監視サンプラーが警報発報するために十分な量のプルトニウムをサンプリングすることはめったにない。」とされ、LSE による空気のサンプリングは限られた範囲であることが示唆されていた。作業環境測定ガイドブック⁴⁾においては、作業環境中における空気中の粒子状放射性物質の採取箇所に関し、「単位作業ごとに 1 箇所以上」や「単位作業場所が広いときは、その広さに応じた数」、「気流の風下側」、「空気汚染が比較的高濃度とな

るおそれのある作業場については、試料の採取個所を密に設定する」等の空気サンプリングに係る設計概念のみの説明に留めている。また、国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection (ICRP)）Publication 75「作業者の放射線防護に対する一般原則」⁵⁾では、空気汚染に関する作業場のモニタリングについて記述があるものの、定量的なものではなく定性的な記載であった。計算コードを用いた気流解析としては、核燃料施設における「放射性物質の閉じ込めに関する研究」⁶⁻⁸⁾が報告されているが、「モニタ設置位置は風下側に設置すればよいのではなく、室内全域の空気の流れを念頭において設計する必要がある」といった記載に留まっている。

上記の調査結果から、空气中放射性物質濃度の管理に対する LSE の一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりの影響について、定量的に評価する手法は得られなかった。そのため本報告では、比較的広範囲の作業場所に複数の LSE が設置されている HL 施設サービスエリアにおいて、放射性物質として仮想汚染粒子がホットセルから拡散することを想定し、空气中放射性物質濃度の管理に対する LSS の一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりの影響について、気流解析を用いて評価することとした。

2. HL 施設サービスエリアの概要

2.1 HL 施設サービスエリアの概要

HL 施設の断面図を **Fig. 2.1** に示す。解析対象となる HL 施設サービスエリアの大きさは、横幅約 50 m × 奥行約 22 m × 高さ約 8 m である。サービスエリア 1 階の配置図を **Fig. 2.2** に示す。サービスエリア内にはホットセル 8 箇所 (C-1~8) と、その前段にホットセルに通じるアイソレーションルームが設置されている。サービスエリア壁付近には LSE10 箇所 (SA-1~10) が点在し、近接する LSE との距離も示している。

2.2 各設備の配置図・寸法

サービスエリア内の各設備の配置図と寸法を **Fig. 2.3** に示す。室内の給気は床面から約 4.0 ~ 5.8 m の高さに設置された給気口 24 箇所 (水平方向 12 箇所、床方向 12 箇所) から行われている。排気は西側壁の床面から 25 cm の高さに設置された排気グリル 1 箇所及び東側壁面に設置されたホットセル 8 箇所 (C-1~8) から行われている。LSE の直径は約 60 mm であり、床面から 1.17~1.33 m の高さに設置されている。SA-9 については、グリーンハウス (GH) の支柱に設置されている。

2.3 給気量・排気量

サービスエリア内における給排気設備の定格運転時の給気量・排気量の内訳を **Table 2.1** に示す。3 系統の給気系からサービスエリアに供給される空気は、排気グリル及びホットセル C-1~8 へ排気されている。周辺環境や施設内の通常作業区域への放射性物質の漏えいが発生しないように、給排気設備による給気量より排気量を増加させているため、総排気量に対して給気量の不足分が生じる。通常の施設運転状況においては 1 日 24 時間給排気設備を運転し、サービスエリア内の換気を常に行っている。総排気量に対するサービスエリア内空気の 1 時間あたりの換気回数は約 15 回である。

2.4 LSS のサンプリング状態

LSS のサンプリング状態に対する各 LSE のサンプリング流量を **Table 2.2** に示す。LSS は全稼働時には LSE10 箇所 (そのうち SA-10 は室内ダストモニタ用吸引端を兼ねる)、一部停止時には LSE 6 箇所 (SA-2, 3, 5, 7, 9, 10) においてサンプリングしている。室内ダストモニタ用吸引端 (SA-10) を除く各 LSE のサンプリング流量は、全稼働時 40 L/min、一部停止時 50 L/min である。なお、SA-10 のサンプリング流量はいずれの場合も 100 L/min である。

3. 放射性物質の拡散を含む気流解析条件

3.1 気流解析の方法及び手順

気流解析は、商用 CFD（Computational Fluid Dynamics）解析コードを用いて空気中放射性物質の拡散解析を行った。使用した解析コードは、様々な流体現象の解析を空間的に行うことができる Ansys Fluent である。また、モデル作成及びメッシュ作成には Ansys ICEM-CFD を用いた。解析結果の可視化には、流体解析の可視化ソフトウェアである FieldView を使用した。

放射性物質の拡散に関する気流解析の実施手順を **Fig. 3.1** に示す。

- ① 今回の目的に即した解析及び検討を行うため、HL 施設内において比較的広いエリアに複数の LSE が設置されているサービスエリアを解析対象エリアに設定した。解析対象エリアには 10 箇所の LSE (SA-1～10) が設置されている (**Fig. 2.2** 及び **Fig. 2.3** 参照)。
- ② HL 施設サービスエリアの寸法に基づき、解析対象領域のモデルとメッシュを作成した (**Fig. 3.2** 及び **Fig. 3.3** 参照)。
- ③ サービスエリアにおける気流を把握するために、仮想汚染粒子の拡散を含む気流解析を実施し、流速や気流の向きの可視化を行った。この結果から、LSE や排気ダクト周辺の流速やサービスエリア全体の気流の流れを模擬し、流速や気流の向きに対する LSS 一部停止の影響を確認した (**Fig. 4.1** 及び **Fig. 4.2** 参照)。
- ④ HL 施設のホットセル内で原子炉材料の照射後試験を行っていることから、汚染物質の放出想定として、仮想汚染粒子が 2 つのホットセル (C-2 セル及び C-8 セル) に通じるアイソレーションルームのスリット (すき間) から放出されることとした (**Fig. 2.2**、**Fig. 2.3** 及び **Table 3.2** 参照)。
- ⑤ 放出想定に基づき仮想汚染粒子をサービスエリアに模擬的に放出し、その拡散の過程を可視化した (**Fig. 4.3** 及び **Fig. 4.6** 参照)。
- ⑥ 排気ダクトやホットセル、LSE の各境界面からの仮想汚染粒子の流出量の時間変化を追跡した。LSE からの流出量は LSE におけるサンプリング量と見なして、サンプリング状況を数値化した (**Fig. 4.4**、**Fig. 4.5**、**Fig. 4.7** 及び **Fig. 4.8** 参照)。
- ⑦ LSS 全稼働時と一部停止時において、LSE におけるサンプリング状況の比較を行った。その結果から、空気中放射性物質濃度に対する LSS 一部停止の影響を定量的に評価した (**Table 4.3** 参照)。

3.2 解析モデルの対象範囲とメッシュ分割

解析モデルの対象範囲及び解析モデル（全景）のメッシュ分割を **Fig. 3.2** に示す。解析モデルのメッシュ形状はポリヘドラン（多面体）、メッシュ数は約 56 万である。対象はサービスエリア 1 階とし、2 階床の高さである 8 m の位置を上面とした。2 階床より上には給排気設備がなく、1 階の作業エリアにおける気流解析に影響が小さいと考えられ、計算時間短縮のため 2 階より上は解析対象から除外している。サービスエリア内に設置されている気流の妨げとなる GH6 箇所の部分は、直方体（壁）としてモデル化している。給気口、排気口の位置や面積は実

測値に基づきモデル化した。給気口のうち床方向の 12箇所や LSE については、実際の形状は丸形であったが、解析では同じ面積の角形とした。なお、柱や階段、その他の設備類は、モデル化していない。

床面から 1.21 m の高さにおける解析モデルの断面図を **Fig. 3.3** に示す。LSE やアイソレーションルーム扉スリットの周辺 50 cm 以内（第 1 層）は、1 メッシュあたり最小 1.5 cm とし、それ以降は 1 層ごとの成長率を 1.2 として第 5 層まで成長させた（体系内の最大メッシュサイズ：50 cm）。目安として、LSE から 1 m の部分は、第 4 層の中間に相当する。なお、SA-9 は壁から離れた位置で GH 上に設置されているため、断面図において円形状となっている。

3.3 拡散シナリオ、解析ケース、解析条件

過去の HL 施設のホットセルにおける切断・研磨作業などによってホットセル内は高度に汚染されていること⁹⁾から、2 つのホットセル（C-2 セル及び C-8 セル）を仮想汚染粒子の発生源に設定した。また、仮想汚染粒子は、アイソレーションルーム扉スリットの幅 5 mm を通じてサービスエリア内へ拡散すると想定した。

Table 3.1 に仮想汚染粒子の放出に係る条件を示す。HL 施設が燃料試料や原子炉材料の照射後試験を行う施設であることから、放出する仮想汚染粒子は主要な試験材料であるジルカロイ（ジルコニウム合金）を選定して物性値¹⁰⁾を設定した。本解析では、床面に落なし空気流動中に拡散されないような粒径の大きな粒子が含まれないと想定し、解析で使用する仮想汚染粒子の粒径は 0.3 μm とした。なお、HL 施設の空気サンプリングに使用しているフィルタは HE-40T であり、各空気サンプリング速度におけるフィルタのサンプリング効率が 0.31 μm のポリスチレンラテックス粒子に対して 99.7% (55 cm/s)、99.8% (80 cm/s)、99.9% (135 cm/s)¹¹⁾ であることも考慮した。

仮想汚染粒子の発生過程としては、全量 10 g の仮想汚染粒子が 24 時間かけて、人の呼吸域に相当する 0.5~1.5 m の高さで、C-2 セル又は C-8 セルに通じるアイソレーションルーム扉スリットからサービスエリア内に均等な速度で拡散すると想定した。なお、解析モデルでは、単位時間あたり一定量の仮想汚染粒子が放出するように、スリット幅に合わせて設定した体系内の計算セル（境界内側の第一セル）にソース項として設定した。また、仮想汚染粒子は、空気に運ばれて、空気とほぼ同様の動きをすると仮定し、物質の粘性の値は空気と同じとした。拡散係数は、ブラウン運動による拡散係数を設定した。また、解析では乱流拡散も考慮した。

Table 3.2 に示すように、解析ケースは合計 4 ケースを設定した。粒子が C-2 セルから放出されるグループ A と C-8 セルから放出されるグループ B に対して、それぞれ LSS 全稼働時（グループ 1）と LSS 一部停止時（グループ 2）の 2 パターンを想定した。これらを対象に、**Table 3.3** の解析条件で ANSYS Fluent ver. 19.1 を用いた過渡計算を行った。

3.4 空気の流出・流入に関する境界条件

解析モデル対象範囲への空気の出入りに関する境界条件を **Table 3.4** に示す。**Table 2.1** の給気・排気量（定格）及び **Table 2.2** の LSE サンプリング流量をもとに、対象範囲への空気出入りを模擬し、入口及び出口流速境界を設定した。管理区域出入口や隣接エリアの扉については、

空気の給排気はないものと仮定した。

給気ダクトでは、正の流速（体系内への流入）を設定し、三系統の給気系からのサービスエリアへの給気量を模擬する。給気量の不足分は空間上面からの流入として、正の流速を設定した。なお、流入温度はいずれも 20°Cとした。対象範囲からの強制的な空気流出箇所については負の流速（体系外への流出）を設定した（出口速度境界）。設定したのは、ホットセル及び LSE（LSS 全稼働時 10 節所、LSS 一部停止時 6 節所）からの流出で、それぞれアイソレーションルーム扉スリットからの排気及び LSE へのサンプリングを模擬する。また、排気グリルは出口圧力境界として 0 Pa（基準圧力）に設定し、サービスエリア内に供給された空気の出口となる。

4. 放射性物質の拡散を含む気流解析の結果

4.1 LSE 周辺及びサービスエリア全体における流速及び気流

仮想汚染粒子が C-2 セルから放出されるグループ A における、代表的な LSE (SA-2、SA-9、SA-10) 周辺の流速と気流の向きを Fig. 4.1 に示す。各 LSE の実際の高さに応じた断面図を示している (SA-2 : 1.17 m、SA-9、SA-10 : 1.20 m)。図中の矢印の向きは気流の流れる向きを示し、矢印の色は気流の速度を表している。矢印の疎密や長さは Fig. 3.2 に示したメッシュ分割の緻密さによるものである。

解析の結果、CaseA-1 と CaseA-2 のそれぞれにおいて、LSE 周辺の流速や気流の流れる向きに顕著な違いは認められなかった。図中には示していない SA-3、SA-5 及び SA-7 周辺の流速や気流の向きについても、CaseA-1 と CaseA-2 において異なる点はなかった。なお、仮想汚染粒子が C-8 セルから放出されるグループ B においてもグループ A と同様の流速分布であった。

SA-2、SA-9、SA-10 周辺に着目すると、CaseA-1 及び CaseA-2 とともに、LSE から半径 10~20 cm 程度までは LSE 方向への気流となっているが、10~20 cm より以遠における気流は LSE 方向へは向いておらず、排気量の大きい排気グリルが設置されている南側に向いている。図として示していない SA-3、SA-5 及び SA-7 周辺の気流についても同様に、気流が LSE 方向に向く範囲は LSE から半径約 10~20 cm 程度であった。また、10~20 cm より以遠における流速は 0.1 m/s 未満であり、遅いことが分かった。サンプリング流量の比較的大きい SA-10 (100 L/min) 周辺の流速は 0.5 m/s 程度であり、SA-2 及び SA-9 (CaseA-1 : 40 L/min、CaseA-2 : 50 L/min) 周辺の流速 (0.2 m/s 程度) と比較すると、SA-10 の LSE によって吸引される気流が速いことが分かる。一方、排気グリル付近に着目すると、排気グリル方向への気流の流速は 1.0~2.0 m/s であり、LSE 周辺と比較すると明らかに速い。さらに、排気グリルから約 1 m 離れた場所においてもその流速は 0.5 m/s 程度であり、排気グリルの影響は比較的広範囲に及んでいることが分かる。

上記の比較結果から、LSS の一部 (SA-1、SA-4、SA-6 及び SA-8) が停止していることは、稼働中の LSE 周辺の流速や気流の向きに対しては影響を与えないといえる。また、流線方向が LSE の方向に向く範囲は、LSE を中心として半径約 10~20 cm 程度であり、HL 施設の容積から考慮すると限定的な範囲であるため、LSE によるサンプリングの有無は、ごく限られた範囲内において影響を及ぼすことが示唆される。

全体的な気流の傾向を把握するために、CaseA-1 及び CaseB-1 におけるサービスエリア全体の気流の向きを Fig. 4.2 に示す。図中の矢印が床面から 1.21 m の高さにおける気流の向きを表している。仮想汚染粒子発生源のホットセルの位置では同ホットセルの排気の有無があるため、発生源付近における気流の向きに多少の差異があるものの、CaseA-1 と CaseB-1 の両ケースにおいてほぼ同様の傾向であり、以下の 5箇所のエリアにおいて特徴的な気流が確認された。

気流①：排気量の比較的大きいホットセルが設置されておらず、サービスエリアの西側壁面に

設置された給気口から空気が流入されるため、このエリアでは基本的には西から東方向への気流となる。サービスエリア西側の給気ダクトから給気された空気が、SA-1とSA-3の中間付近にはほぼ直線的に流れた後、SA-1への流出も確認される。しかし、上記の LSE 周辺の流速の結果より、LSE 方向への気流となる範囲が半径 10~20 cm 程度と短いことや、サービスエリアの隅の広い空間であるという構造上の特性のため、行き場を失った大部分の空気は SA-1 前で北へ向きを変え、北端の壁で西向きになった後、西側からの給気の影響を受けて反時計回りに渦巻くような挙動を示している。

気流②：西側壁面の給気口から給気された東方向への直線的な気流が比較的多く確認できる。

これらのエリアにおいては気流①のようなサービスエリア隅の広い空間ではなく、また GH などの障害物がないことや、排気量の大きい排気グリルへの排気の影響を受けにくい位置であるため、直線的な気流となっている。そのため、C-2 セルから拡散した場合は、給気された空気の東向きの気流を受けて、C-2 セルの近くにある C-1 セルや SA-4 に排気されやすいと考えられる。

気流③：このエリアにおいては、時計回りに渦巻いた挙動を示している。このような挙動を示すのは、このエリアと排気グリルとの間に設置されている 5 箇所の GH が、排気グリル方向への気流の障壁となることや、西側壁面から給気された東向きの気流が原因であると考えられる。

気流④：他のエリアとは異なり、このエリアの気流は蛇行するような挙動を示している。これは、排気量の大きいホットセルや排気グリルの影響を受けることや GH の有無による影響であると考えられる。排気量の大きい排気グリルや各ホットセルの前においては、それらの境界面へ向けた気流が多く確認できる。また、北側半分においては、設置されている GH が給気の妨げとなると考えられ、床面から 1.21 m の高さにおいては東向きの給気に伴う東向きの直線的な気流は確認できなかった。その一方で、南側半分においては、給気の障壁となる GH が設置されていないため、直線的な東向きの気流が確認されている。これらの要因が複雑に影響して、蛇行した気流になったと考えられる。蛇行した気流ではあるものの、排気グリルへ比較的多く排気されやすいエリアであるといえる。

気流⑤：SA-8 前や GH に囲まれた南端エリアにおいては、西側の給気口ではなく南側の壁面に設置された給気口から空気が流入され、設置されている GH が排気グリルへの排気の障壁となり、GH に衝突した空気が東側への気流となって時計回りの小さな渦巻きの気流が確認されている。

したがって、気流①、気流③及び気流⑤が生じているエリアに給気された仮想汚染粒子は、その場に滞留する傾向があり、これらの滞留がその周辺のホットセルへの排気や LSE へのサンプリングに対して影響を及ぼすと考えられ、排気量の大きい排気グリルやホットセルへの排気が効率的に行われていないことが分かる。また、気流②のエリアでは、付近のホットセルや LSE へ排気されやすい一方で、気流④が発生しているエリアに侵入した空気は、ホットセル C-4~C-7 への排気の影響も受けてエリア内を蛇行している部分があるものの、比較的排気グリル

方向への気流となって排気されている。

4.2 グループ A における仮想汚染粒子の拡散状況

4.1 の結果を踏まえた、C-2 セルを仮想汚染粒子発生源とするグループ A の仮想汚染粒子の拡散状況を **Fig. 4.3** に示す。仮想汚染粒子発生源である C-2 セルは★で示し、LSE の床面からの実際の高さに近い拡散状況として、床面からの高さ 1.21 m における仮想汚染粒子の質量分率 w_i を色で表している。ここで、質量分率は、混合物（空気と仮想汚染粒子）の総質量 m_{tot} に対する仮想汚染粒子の質量 m_i の比率である。また、灰色の矢印は気流の向きである。

CaseA-1 と CaseA-2 を比較すると、全体的な質量分率は同様の分布状況となっていることから、仮想汚染粒子の拡散状況において、LSS 一部停止の影響による大きな変化は確認されなかった。これは、解析に使用した各設備の排気量及び給気量は常に一定であるため、図中の気流の向きは、1 分後から 30 時間後までのいずれの時間においても常に同じ方向となっていることや、**4.1** の結果で、両ケースにおいて LSE 周辺の空気流速や気流の向きに変化が見られなかつたことから妥当である。したがって、ここでは CaseA-1 及び CaseA-2 に共通の結果として記述する。

拡散開始から 1 分後では、仮想汚染粒子発生源である C-2 セル前の質量分率は $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-6}$ 程度を示し、C-2 セルの位置から南北へ徐々に拡散されている。C-2 セルより北側では気流②の影響を受けて、C-1 セルや SA-4 へと排気されていると考えられる。南側では気流③の時計回りの渦巻きの影響を受けるため、北側よりも拡散範囲が比較的広い傾向にある。また、気流③の影響により、仮想汚染粒子は C-3 セルや SA-5 前で滞留する傾向であることを示している。拡散開始から約 5 分後には、気流③で滞留していた仮想汚染粒子が気流④へ流れ込むことで、C-2 セルより南側に設置されている排気グリル付近まで仮想汚染粒子が拡散し、その拡散の途中にあるホットセル（C-3～C-8）に通じるアイソレーションルーム前や LSE（SA-5～SA-7、SA-9 及び SA-10）の周辺に到達している。排気グリル南側の GH による障壁が気流の妨げとなることや、気流⑤による空気の滞留の影響により、南端にある SA-9 付近における仮想汚染粒子の質量分率は低い傾向 (1.0×10^{-10} 程度) にある。一方、仮想汚染粒子発生源の C-2 セルより北側にある SA-2 や SA-3 周辺の質量分率は $1.0 \times 10^{-15} \sim 1.0 \times 10^{-14}$ 程度である。さらに、最も北側にある SA-1 周辺の仮想汚染粒子の濃度は上昇していない。これは、気流①や気流②に確認されたように、給気口から導入された東向きのほぼ直線的な気流の影響により北方向への拡散量が少ないと加えて、C-1 セル、SA-2 及び SA-3 への排気が行われているためである。拡散開始 24 時間後においては、仮想汚染粒子の分布に偏りがあるものの、サービスエリア全体にわたって満遍なく拡散している。C-2 セル北側の拡散量（北端付近における質量分率 1.0×10^{-13} 程度）より南側の拡散量（南端付近における質量分率 1.0×10^{-9} 程度）が多い傾向にある。

仮想汚染粒子の放出が停止した 27 時間後（放出停止から 3 時間後）では、排気グリルがある南側エリアにおいて 1.0×10^{-16} 程度であり、仮想汚染粒子が系外に排出されている一方、SA-1 や SA-3 がある北側エリアではまだ薄い青色（質量分率： 1.0×10^{-15} ）であり、仮想汚染粒子が微量残存している。これは、気流①の渦巻きによる空気の滞留が確認され、排気量の大きい

排気グリルやホットセルへのスムーズな排気が行われておらず、SA-1 による排気に依存するためである。30 時間後（放出停止から 6 時間後）には、サービスエリア全体において質量分率は $0\sim1.0\times10^{-18}$ 程度になっており、サービスエリア内には仮想汚染粒子はほとんど存在せず、系外にほぼすべて流出した。

4.3 グループ A における仮想汚染粒子流出量の時間変化

グループ A において、境界面を通過した仮想汚染粒子質量の時間変化を Fig. 4.4 及び Fig. 4.5 に示す。それぞれ、排気グリル・ホットセル（C-1 セル、C-3 セル～C-8 セル）への流出量及び LSE への流出量である。各グラフ中の C-2 セルに係るプロットは、C-2 セルからの仮想汚染粒子の放出量を示している。仮想汚染粒子総量 10 g が 24 時間均等な速度 (1.16×10^{-4} g/s) で C-2 セルから放出すると仮定しているため、放出量は一定となる。仮想汚染粒子流出量の初期の変動を比較できるように、Fig. 4.4 では 0～0.5 時間、Fig. 4.5 では 0～1 時間の部分を拡大した図も示している。また、仮想汚染粒子発生源である C-2 セルと各境界面の位置関係を Table 4.1 に示す。

Fig. 4.4 に示すように、排気グリル及び各ホットセルの流出量に両ケースで大きな差は見られなかった。Fig. 4.2 で認められるほぼ直線的な気流②が影響し、C-2 セルより北側に設置されている C-1 セル（C-2 セルから 2.4 m）への流出は拡散直後すぐに一定となっており、またその流出量が最も多い。一方、それ以外のセルや排気グリルでは 0.2～0.3 時間程度で一定となっており、位置的に C-2 セルから遠く離れた C-6～C-8 セル（C-2 セルから 17.0～23.1 m）への流出量は比較的少ない傾向を示している。C-2 セルの比較的近傍（C-2 セルから 5.1～12.0 m）に位置している C-3～C-5 セルや排気グリルへの流出量はほぼ同程度であった。またいずれも、放出開始から 0.5 時間以内で流出量は一定となり、その後放出停止まで変動はない。仮想汚染粒子の放出が停止した 24 時間以降は、排気グリルやホットセルへの流出量は減少する。

LSE への流出量についても、Fig. 4.5 に示すように、両ケースで大きな傾向の差はみられず、CaseA-2 で稼働している LSE（SA-2、SA-3、SA-5、SA-7、SA-9 及び SA-10）の流出量の時間変化は、CaseA-1 と概ね同様の傾向を示している。C-2 セル近傍に設置されている SA-4（C-2 セルから 5.4 m）や SA-5（C-2 セルから 0.9 m）では、拡散直後、流出量が短時間で急激に増加している。特に SA-5 はほぼ C-2 セル前に設置されており、拡散した仮想汚染粒子が到達しやすいため流出量が最も多い。SA-4 は SA-5 ほど C-2 セルに近くはないため、流出スピードが一定となった後の流出量は SA-5 ほど多くはなかった。C-2 セルより南側にある SA-6～SA-10（C-2 セルから 9.9～22.2 m）においては、C-2 セル近傍の LSE と比較すると流出スピードの立ち上がりは遅いが、0.2～0.3 時間程度で一定量となり、その流出量は SA-5 の流出量と同程度であった。これは気流③や気流④により C-2 セルより南側へ仮想汚染粒子が拡散するためである。一方、C-2 セルより北側にある SA-1～SA-3（C-2 セルから 11.1～17.7 m）については、流出量の立ち上がりは遅く一定になるまで 0.5～1 時間程度要し、その流出量は南側の LSE の約 1/100 程度であった。これは気流①や気流②の影響により、SA-1～SA-3 には仮想汚染粒子がほとんど到達しないためである。

以上の結果は、仮想汚染粒子放出源近傍に設置された LSE においては、ホットセルから拡散

した仮想汚染粒子を短時間で効率よくサンプリング可能であることを示す。

4.4 グループBにおける仮想汚染粒子の拡散状況

仮想汚染粒子発生源としてC-8セルを想定したグループBにおける仮想汚染粒子の拡散状況を**Fig. 4.6**に示す(床面からの高さ1.21mにおける質量分率、★：放出点、灰色矢印：気流の向き)。両ケースを比較すると、グループAの場合と同様に、仮想汚染粒子の質量分率の分布に顕著な差はなく、気流の向きも30時間にわたって変化はない。したがって、ここではCaseB-1及びCaseB-2共通の結果として記述する。

グループAの結果と異なる点としては、拡散開始後1分で排気グリル周辺の仮想汚染粒子の質量分率が高い値(1.0×10^{-9})を示している。排気グリルが仮想汚染粒子発生源であるC-8セルのほぼ正面にあるため、仮想汚染粒子が排気グリルまで短時間で到達している。5分後、24時間後と経過するにつれて、仮想汚染粒子はC-8セルより北側に次第に拡散している。しかし、仮想汚染粒子放出から24時間経過しても、サービスエリア北側半分の質量分率については 1.0×10^{-16} を超えず、仮想汚染粒子の濃度が上昇していない。気流③や気流④の影響により、これらの気流が発生しているエリアより北側へは拡散しにくい状況であることや、C-8セルの正面の排気グリルや周辺のホットセルへの流出に伴う影響が大きく、北側方向への拡散が強く抑制されていると考えられる。**Fig. 2.2**のLSEやホットセルの位置関係から考慮すると、放出した仮想汚染粒子の拡散はSA-5やC-2セル周辺域までに留まっている。仮想汚染粒子の拡散開始から27時間後(放出停止から3時間後)以降は、サービスエリア全体で仮想汚染粒子の質量分率が 1.0×10^{-21} となり、グループAの場合と異なり、仮想汚染粒子が系外にほぼすべて流出しサービスエリア内に残存していない。これは、仮想汚染粒子の発生源であるC-8セルが排気グリルに近いことや、拡散経路上にある周辺のホットセルへの排気により、仮想汚染粒子の効率的な排気が行われることを示唆している。

4.5 グループBにおける仮想汚染粒子流出量の時間変化

グループBにおいて、境界面を通過した仮想汚染粒子質量の時間変化を**Fig. 4.7**(排気グリル及びC-1セル～C-7セルへの流出量)及び**Fig. 4.8**(LSEへの流出量)に示す。各グラフ中のC-8セルに係るプロットは、C-8セルからの仮想汚染粒子の放出量(1.16×10^{-4} g/s)を示す。また、仮想汚染粒子発生源のC-8セルと各境界面の位置関係を**Table 4.2**に示す。

Fig. 4.7に示すように、両ケースにおいて、排気グリルやホットセルからの流出量に大きな差は見られなかった。**Fig. 4.6**の結果から予想されたとおり、ホットセルで最も北側にあるC-1セル(C-8セルから26.6m)では流出スピードが最も遅く流出量が最少である一方で、仮想汚染粒子発生源であるC-8セルに接近すればするほど流出スピードが速くかつ流出量も多くなり、ホットセルでの最大流出量はC-7セルとなった。排気グリルは排気量が最も多いことや、C-8セルのほぼ正面に設置されており拡散開始1分後から仮想汚染粒子が到達していたため、ホットセルよりも流出量が多くなった。またいずれも、0.5時間以降から放出停止まで変動はなく、放出停止後は減少している。

LSEへの流出量についても、**Fig. 4.8**に示すように、両ケースで大きな傾向の差はみられず、

CaseB-2 で稼働している LSE (SA-2、SA-3、SA-5、SA-7、SA-9 及び SA-10) の流出量の時間変化は、CaseB-1 と概ね同様の傾向である。北側に設置されている SA-1～SA-4 (C-8 セルから 29.6～41.6 m) の流出スピードは遅く、流出量が少ない傾向を示す。これは、Fig. 4.6 の結果から予想されたとおり、気流③、④の影響及び排気グリルやホットセルへの排気により、北側方向への拡散が大きく抑制され、仮想汚染粒子が SA-5 よりも北側にはほとんど到達していないためである。その一方で、SA-5 (C-8 セルから 22.2 m) には、Fig. 4.6 に示したように、仮想汚染粒子が到達しており、SA-6～SA-10 (C-8 セルから 1.9～14.3 m) は SA-5 よりも南側に設置されているため、C-8 セルとの距離が短いほど流出スピードが速く流出量も多くなっている。また、いずれも放出停止まで流出量は一定となっており、放出停止後は減少している。本ケースに関しては、LSE における仮想汚染粒子流出量は $10^{-7} \sim 10^{-19}$ g 程度の幅広い値となり、グループ A の結果 (仮想汚染粒子の流出量 : $10^{-8} \sim 10^{-13}$ g) よりも LSE 間での流出量の差が大きい。これは、サービスエリア内における仮想汚染粒子の拡散範囲が放出源近傍に限定されたためである (Fig. 4.6 参照)。なお、Fig. 4.8 で認められるように、SA-1～SA-3 の LSE からの流出量について、数値計算に起因すると思われる数値振動 (周期的な値の変動) が確認された。ただし、それらの流出量は他の LSE よりごく微量であり、全体的な解析結果の評価に影響はない。

4.6 仮想汚染粒子累積流出量の比較による LSS 一部停止の影響評価

LSS 一部停止の影響を評価するために、4.3 及び 4.5 で得られた結果から、各境界面からの仮想汚染粒子の累積流出量を比較する。C-2 セル及び C-8 セルから拡散した仮想汚染粒子の 24 時間後の累積流出量を Table 4.3 に示す。LSS 一部停止の影響を明瞭にするために、グループ 1 に対するグループ 2 の比である CaseA-2/CaseA-1 及び CaseB-2/CaseB-1 も示す。(1)排気グリル及びホットセル、(2)各 LSE、(3)全 LSE 合計の 3 点に分けて整理する。

(1) 排気グリル及びホットセルについて

すべての境界面の中で累積流出量が最も多いのは、グループ A ではホットセル (8.96 g)、グループ B では排気グリル (7.07 g) となっている。仮想汚染粒子発生源の位置によって、粒子の流動経路上にあるホットセルの数 (グループ A では 7 個、グループ B では隣に 1 個のみ) や排気グリルとの位置関係 (グループ B は放出源のほぼ正面) が影響している。排気グリル及びホットセルからの累積流出量は、いずれの LSE の累積流出量よりも大きい数値となっており、LSS 一部停止の影響を示す比は 1.00 であることから、これらに対しては LSS 一部停止の影響はないといえる。このように影響が生じない理由としては、排気グリルやホットセルへの累積流出量と比較して、LSE への累積流出量が微量なためである。

(2) 各 LSE について

各 LSE の累積流出量は、仮想汚染粒子の発生源であるホットセルと排気グリルの位置関係による流速分布 (Fig. 4.1) が影響している。グループ A の累積流出量は、仮想汚染粒子発生源より北側にある SA-1～SA-4 のおよそ $10^{-8} \sim 10^{-6}$ g、仮想汚染粒子発生源より南側にある SA-

5～SA-10 のおよそ $10^{-4} \sim 10^{-3}$ g の 2 パターンに大別される。グループ B の累積流出量は、仮想汚染粒子発生源から北側にある SA-1～SA-4 のおよそ $10^{-14} \sim 10^{-12}$ g、仮想汚染粒子発生源付近にある SA-7、SA-8、SA-10 のおよそ $10^{-3} \sim 10^{-2}$ g、その中間地点にある SA-5、SA-6、SA-9 のおよそ $10^{-8} \sim 10^{-5}$ g の 3 パターンに大別される。これらの結果から、仮想汚染粒子発生源や排気グリルに近いほど、LSE からの累積流出量が多くなる傾向がみられた。

両ケースともに稼働していた LSE (SA-2、SA-3、SA-5、SA-7 及び SA-9) は、LSS 一部停止によって、累積流出量が若干増加している。それらの LSS 一部停止の影響を示す比は、1.25 程度になっている。これは、サンプリング流量の差 (グループ 1 : 40 L/min、グループ 2 : 50 L/min) が 1.25 倍であることによる。一方、SA-10 は、両グループにおいてサンプリング流量が 100 L/min と一定であることから、累積流出量は同程度となり、LSS 一部停止の影響を示す比は 1.00 であった。

これらの結果から、LSS 一部停止の際に稼働中の LSE からの累積流出量、すなわち LSE によるサンプリング量は、サンプリング流量に比例して増加しており、他の LSE 停止の影響は受けていなかった。

空气中放射性物質濃度は、式 (i) に基づき算出することができる。放射性物質の半減期、質量数及びアボガドロ定数 (6.02×10^{23} mol⁻¹) は定数であり、LSS 一部停止に関わらず採取時間は同じであるため、サンプリング量とサンプリング流量が変数となる。稼働中の LSE の累積流出量の比較結果で認められたように、サンプリング量はサンプリング流量に比例するため、空气中放射性物質濃度は同じ値になり、LSS 一部停止に関わらず、稼働中の LSE については全稼働時と同様の評価が実施できることとなる。したがって、LSS 一部停止という条件下で稼働中の LSE に関しては、空气中放射性物質濃度の管理に対する LSS 一部停止の影響はなく、施設内の空气中放射性物質濃度の全体的な把握が可能であったといえる。

$$\text{空气中放射性物質濃度 (Bq/cm}^3\text{)} = \frac{\ln 2}{\text{放射性物質の半減期 (s)}} \times \frac{\text{サンプリング量 (g)}}{\text{放射性物質の質量数 (g/mol)}} \times \frac{\text{アボガドロ定数 (/mol)}}{\text{サンプリング流量 (L/min)} \times 1000 (\text{cm}^3/\text{L}) \times \text{採取時間 (min)}} \cdots (i)$$

(3) 全 LSE 合計について

全 LSE 合計の累積流出量は、グループ A 及びグループ B ともにグループ 1 の方が多くなっており、これは LSE のサンプリング数と総流量が増加するためである。LSE によるサンプリングの総流量は、LSS 全稼働時において 460 L/min、LSS 一部停止時において 350 L/min である。前述のとおり、累積流出量はサンプリング流量との比例関係にあることから、LSS 一部停止の影響を示す比は 0.76 程度になると見積もられる。しかし、全 LSE 合計の累積流出量に対する LSS 一部停止の影響を示す比は、グループ A が 0.853、グループ B が 0.704 である。見積もり値 (0.76 程度) よりも、グループ A は大きく、グループ B は小さい。この理由として、それぞれ以下に示すように、①グループ A：仮想汚染粒子発生源から排気グリルまでの間にあるホットセル近傍の LSE の数、②グループ B：仮想汚染粒子発生源に最も近い LSE 稼働状況による影響が考えられる。

①グループ A：仮想汚染粒子発生源から排気グリルまでの間にあるホットセル近傍の LSE の数による影響

(1)に記述したように、グループ Aにおいて、仮想汚染粒子流出に係る支配的な要素はホットセルへの流出である。そのため、ホットセルの近傍の LSE (SA-5, SA-7, SA-9) への仮想汚染粒子の流出が比較的多く、LSS 一部停止の影響が単純な見積もり値よりも大きくなつたと考えられる。ただし、ホットセルへの流出量と比較して LSE への流出量は微量であるため、ホットセルへの累積流出量には見かけ上の変化はない。

②グループ B：仮想汚染粒子発生源に最も近い LSE の稼働状況による影響

4.1 の結果から、流線方向が LSE の方向に向く範囲は、LSE を中心として半径 10~20 cm 程度と限定的である。グループ A では、仮想汚染粒子発生源に一番近い SA-5 は稼働している一方、グループ B の場合、仮想汚染粒子発生源に一番近い SA-8 は停止していた。**Table 4.3** に示したグループ 1 の結果から、仮想汚染粒子発生源に近い LSE の累積流出量が多い傾向にある (CaseA-1 では SA-5, CaseB-1 では SA-8 及び SA-10)。CaseB-2 では位置的に仮想汚染粒子発生源に最も近い SA-8 が停止していたので、全 LSE 合計の累積流出量に対する LSS 一部停止の影響が見積もり値より小さくなつたと考えられる。しかし、見積もり値との差は約 10% 程度であり、空気中放射性物質濃度の管理に対する LSS の一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりの影響が大きいとはいえない。

以上の(2)、(3)の評価から、LSS 一部停止条件下で稼働中の LSE により施設内の全体的な空気中放射性物質濃度の把握が可能であることが明らかであり、空気中放射性物質濃度モニタリングに対する LSS のサンプリング箇所の一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりの影響は小さいと結論付けた。

ただし、以下の 2 つの場合においては、サンプリング箇所の一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりの影響が生じると考えられる。①気流解析の結果から、気流の影響により仮想汚染粒子が到達しにくい SA-1~SA-3 のエリアにおいて、集中的にサンプリングが停止していた場合には、施設全体の空気中放射性物質濃度の把握が困難となる。また、②LSE 近傍における放射線作業管理において、LSE による監視計画を立てた場合においても、確実なサンプリングが実施できていないおそれがある。この対策としては、個別の可搬型空気サンプリング装置を用いることで、適切なサンプリング位置でのモニタリングの実施が必須となる。なお、HL 施設サービスエリアで実施された過去の放射線作業では、LSS によるサンプリングだけではなく、作業内容に応じて可搬型の空気サンプリング装置などを使用した作業エリアの放射線管理が適切に行われており、また作業環境中に放射性物質が拡散したことや空気中放射性物質濃度が有意に高くなった実績はないことを確認している。

評価結果の補足として、各 LSE の累積流出量より放射能量を算出する。ジルコニウムの主な放射性核種としては ^{95}Zr があり、HL 施設で試験する照射後の原子炉試料としても ^{95}Zr が含まれている。燃料試料中の Zr の組成比は 22.5 wt%¹²⁾、 ^{95}Zr の比放射能は $7.94 \times 10^{11} \text{ kBq/g}$ ¹³⁾ で

ある。組成比、比放射能及び**Table 4.3** の累積流出量から、 ^{95}Zr の放射能量を算出した結果を**Table 4.4** に示す。各 LSE から流出した放射能量は $2.11\sim1.76\times10^{12} \text{ Bq}$ となった。この結果から、今回の解析におけるシナリオは、仮想汚染粒子の放射能を検知するのに十分なレベルであった。

5. 結論

本報告の評価対象領域における気流解析結果から得られた要点をまとめ、空气中放射性濃度の管理に対する LSS のサンプリング箇所の一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりの影響について評価した。また、気流解析で得られた結果に基づき、実際の放射線管理に対して活用可能な知見の整理を行い、本解析結果を踏まえた今後の展望について記述する。

(1) 仮想汚染粒子の流速と気流の向きについて

仮想汚染粒子の流速や気流の向きは、LSS 全稼働時と一部停止時において大差はなかった。流線方向が LSE の方向に向く範囲は、LSE を中心として半径 10~20 cm 程度と限定的であり、その速度は最大でも 0.5 m/s 程度であった。LSE から半径 20 cm 以遠の範囲においては、給気ダクトからの給気や、排気量の大きい排気グリルやホットセルの影響を強く受け、エリアごとに特徴的な気流が発生しながら排気されている。排気グリル付近では流速が 1.0~2.0 m/s で速く、約 1 m 離れた範囲においても 0.5 m/s 程度を示し、排気グリル周辺を除く場所では 0 ~0.5 m/s であった。

サービスエリア全体においては、給気ダクトからの給気や各境界面からの排気、GH の障壁の影響を受けるため、エリアごとに特徴的な気流が発生した。給気のサービスエリア南側では気流はエリアを蛇行しながら、排気グリルが設置されている南側へ向いていた。

(2) 仮想汚染粒子の拡散状況について

各エリアに発生する特異的な気流の影響を受けるため、仮想汚染粒子の拡散を想定したホットセルの位置によって、対象領域であるサービスエリアにおける拡散状況に大きな差があった。C-2 セルから拡散されるグループ A ではサービスエリア全体に仮想汚染粒子の濃度が上昇したが、C-8 セルから放出されるグループ B ではサービスエリアの北側半分程度では仮想汚染粒子の濃度は上昇しなかった。これは、グループ B では、拡散箇所であるホットセルのほぼ正面にある排気グリルへの排気が効率的に行われることや、周辺のホットセルへの排気量が多いことが大きく影響している。一方、グループ A では、西向きの排気グリル方向への蛇行した気流、局所的に発生している渦巻きの気流並びに給気ダクトから給気に伴う東向きの直線的な気流の影響を受けて、サービスエリア北側半分への拡散が大きく抑制された。その結果、サービスエリア北側の一部のホットセルや LSE 周辺における仮想汚染粒子の濃度が上昇していない。

(3) LSS 一部停止の影響評価

序論に記載したとおり、大洗原子力工学研究所 HL 施設では、LSE に設置されたフィルタにより空気中の放射性物質をサンプリングした後、1 枚ずつフィルタを測定して空气中放射性物質濃度を評価している。空气中放射性物質濃度の管理に対する LSS のサンプリング箇所の一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりが及ぼす影響として、次の 2 点を確認した。

(a) LSS 一部停止時においても稼働中の LSE について

各 LSE の累積流出量の比較結果から、LSE からの累積流出量、すなわちフィルタによるサンプリング量は、サンプリング流量に比例して増加した。空气中放射性物質濃度を算出する式においても、サンプリング量とサンプリング流量は比例関係にあるため、サンプリング箇所の一部停止やサンプリング間隔の広がりの影響はなく、LSS の一部停止によらず空气中放射性物質濃度は同様の評価が実施できていたことが示唆される。このことから、LSS 一部停止時に稼働している LSE に関しては、LSS のサンプリング箇所の一部停止やサンプリング間隔の広がりの影響はないといえる。

(b) LSS 一部停止中の LSE について

全 LSE 合計の累積流出量から、LSS 一部停止の影響を示す比を算出した結果、グループ A では 0.853、グループ B では 0.704 となった。サンプリング量がサンプリング流量に比例し、全稼働時と一部停止時のサンプリング総流量の比より、LSS 一部停止の影響を示す比は 0.76 程度であると見積もられることから、グループ B では LSS 一部停止による影響がある。これは CaseB-2 では、仮想汚染粒子発生源であるホットセルに最も近い LSE が稼働しておらず、LSE による仮想汚染粒子のサンプリングが効率的に行われていなかったことによる。しかし、見積もり値から約 10%程度の差であり、空气中放射性物質濃度の管理に対する LSS の一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりの影響が大きく生じたとはいえない。

したがって、LSS 一部停止条件下で稼働中の LSE により、施設内の全体的な空气中放射性物質濃度の把握が可能であることが明確であり、空气中放射性物質濃度モニタリングに対する LSS のサンプリング箇所の一部停止やそれに伴うサンプリング間隔の広がりの影響は小さいと結論付けた。

なお、今回は、計算ケースの簡略化を図るため、サービスエリア内へ拡散する仮想汚染粒子にジルカロイ（被覆材料）を選定したが、今後、燃料試料の組成を考慮した仮想汚染粒子の拡散を含む気流解析評価の検討も行う。

(4) 放射線管理のための知見の整理

上記結果を踏まえると、今回の解析対象である HL 施設においては、ホットセルアイソレーションルーム前に設置されている LSE や、排気グリル前に設置された警報装置付き室内ダストモニタ用吸引端を兼ねる LSE は、作業環境中の放射性物質濃度をモニタリングにおける汚染物質の検出に適しており合理的なものであった。本報告の評価結果から、これまで定性的な報告に留まっていた以下に挙げるサンプリング手法は、汚染物質をサンプリングする上で妥当な方法であることが明らかとなった。

- ① 施設内に発生した気流の特徴を踏まえて位置的に風下側に設置されているほど、LSE からの累積流出量は多い傾向がみられた。そのため、サンプリング設備設置時には、排気口周辺など、施設内の気流方向に応じた風下側におけるサンプリングを設計することで、効率

的なサンプリングを実施することができる。さらに、サンプリング設備として、警報装置付きの室内ダストモニタを設置すれば、作業環境中の放射性物質濃度の異常を迅速に検知することができる。

- ② サンプリング流量が 40~100 L/min であれば、流線方向が LSE の方向に向く範囲は半径 10~20 cm 以内の範囲であった。また、拡散箇所の最も近くに設置された LSE が停止している場合に、累積流出量に対する LSS 一部停止の影響が顕著に表れた。そのため、放射線作業の内容やそのレベルに応じて、汚染が発生する可能性のある作業エリアから 10~20 cm 程度の位置において、ピンポイントでサンプリングするとよい。

上記結果を放射線管理上の観点に置き換えると、汚染物質の発生源のすぐ近くに設置された LSE では、汚染物質をフィルタに短時間で効率よくサンプリングできることを示す。また、LSE の稼働状況にかかわらず汚染物質が室内の気流の影響を受けながら拡散することによって、気流の風下側にある広範囲の LSE でサンプリングされる結果となる。このことから、汚染物質の拡散状況を把握するためには、同一室内の LSE のフィルタの放射能測定を行うことが有効であることが分かる。

(5) 今後の展望

序論で記述したとおり、LSE のサンプリング数やサンプリング箇所の間隔と空気中の放射性物質濃度の関係性について定量的に評価した報告はない。本報告のような気流解析に基づいた評価も数例であり、今後、幅広く応用されることを期待する。今後の具体的な展開として、以下の 2 つを考えている。

- ① 新しい原子力施設の設計段階において、放射線管理設備の設計に本解析を活用する。空气中放射性物質のサンプリングの設計（配置箇所や個数等）の決定とその妥当性評価に関して、解析的な検討を事前に行うことができる。施設の利用目的に応じて、合理的な放射線管理の設計が可能となる。
- ② 既設の核燃料物質取扱施設や原子炉施設、廃棄物処理施設など、あらゆるケースにおける汚染の拡散やサンプリング状況に対して、本解析手法を幅広く適用して評価する。構造や設備の異なる多種・多様な施設での、様々な放射性物質の利用状況や汚染発生状況において、放射線管理の合理性・有効性の評価が期待できる。

謝 辞

本報告書の作成に当たり、仮想汚染粒子の拡散を含む気流解析にご協力を頂いた（株）エヌデーデーの藤崎 竜也 氏並びに HL 施設に関する情報提供にご協力を頂いた HL 課員一同及び放射線管理第 2 課 HL 施設担当チーム員に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Fraser, D.C, Perry K. E. G., Techniques for Continuous Monitoring of Airborne Plutonium Activity and Experience of Their Use in a Fuel-Element Fabrication Plant, Proceedings of Assessment of Airborne Radioactivity, IAEA, Vienna 1967, pp.147-160.
- 2) 山本峯澄, 放射線管理の立場からみた放射線管理モニタ, 保健物理, 15, 1980, pp.295-305.
- 3) E.E. Hickey et al., Air Sampling in the Workplace, NUREG-1400, 1993, 92p.
- 4) 労働省安全衛生部環境改善室編, 新訂 作業環境測定ガイドブック(4)—電離放射線関係—, 日本作業環境測定協会, 1993, 120p.
- 5) 日本アイソトープ協会, 作業者の放射線防護に対する一般原則, ICRP Publication 75, 丸善, 1997, 69p.
- 6) 村松寿晴ほか, 計算コード (AQUA) による核燃料施設内気流解析結果, PNC TN9410 92-059, 1992, 208p.
- 7) 遠藤邦明ほか, 核燃料施設内気流解析結果集, PNC TN8410 94-217, 1994, 228p.
- 8) 遠藤邦明ほか, 核燃料施設内気流解析結果集 (II), PNC TN8410 95-273, 1995, 188p.
- 9) 東海研究所保健物理部ほか, 保健物理－管理と研究－No.26 (1983 年度), JAERI-M 84-156, 1984, 234p.
- 10) 高橋幹二, エアロゾル学の基礎, 森北出版, 2003, 221p.
- 11) 村田幹生ほか, 放射性じん埃サンプリング用セルロース・ガラス濾紙の特性, 保健物理, 11, 1976, pp.207-210.
- 12) 伊藤正泰ほか, JMTR ホットラボにおける中性子線しゃへい強化, JAEA-Technology 2011-022, 2011, 44p.
- 13) 日本アイソトープ協会, アイソトープ手帳 第 10 版, 丸善, 2002, 104p.

解析対象：HL施設サービスエリア

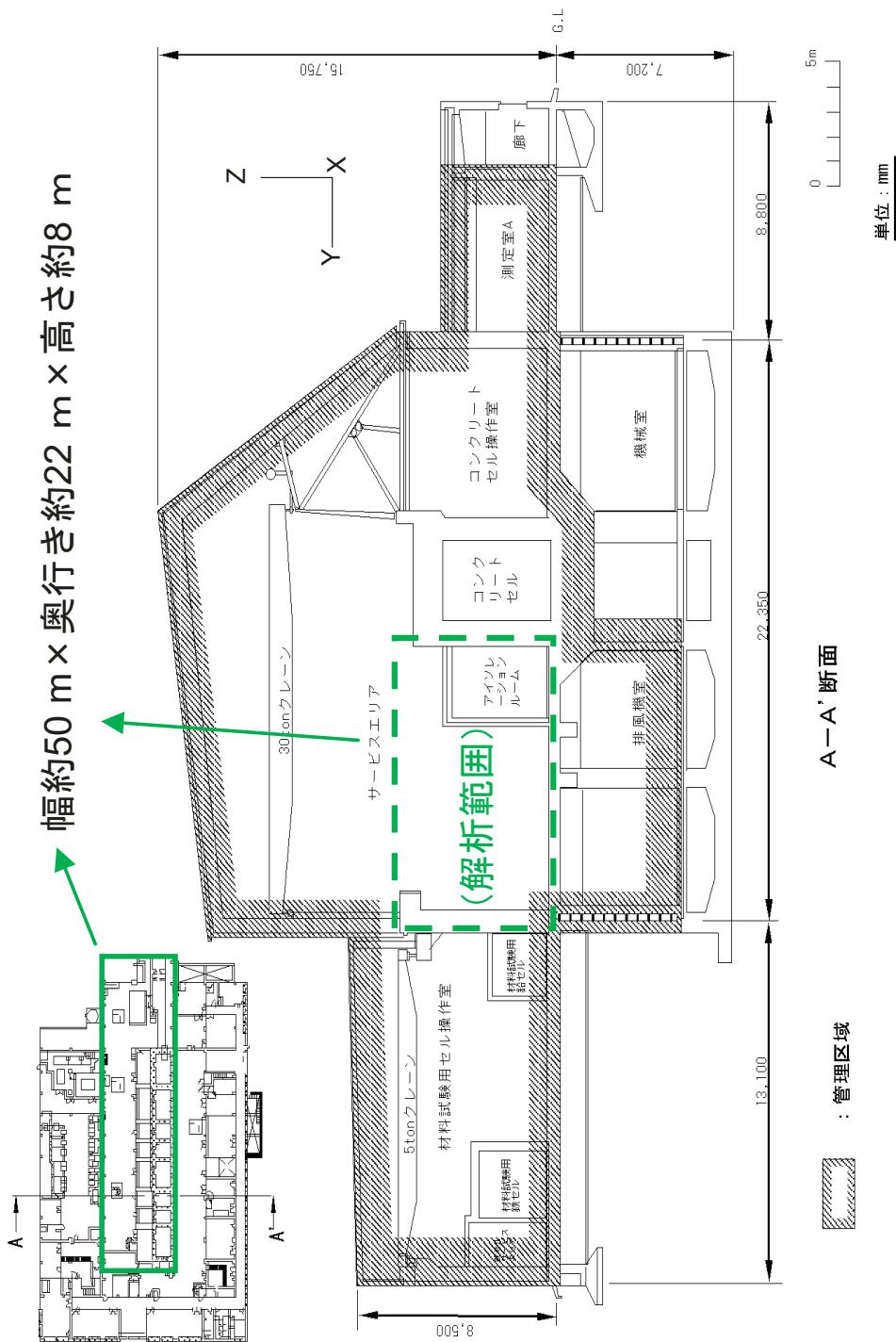


Fig. 2.1 HL施設の断面図

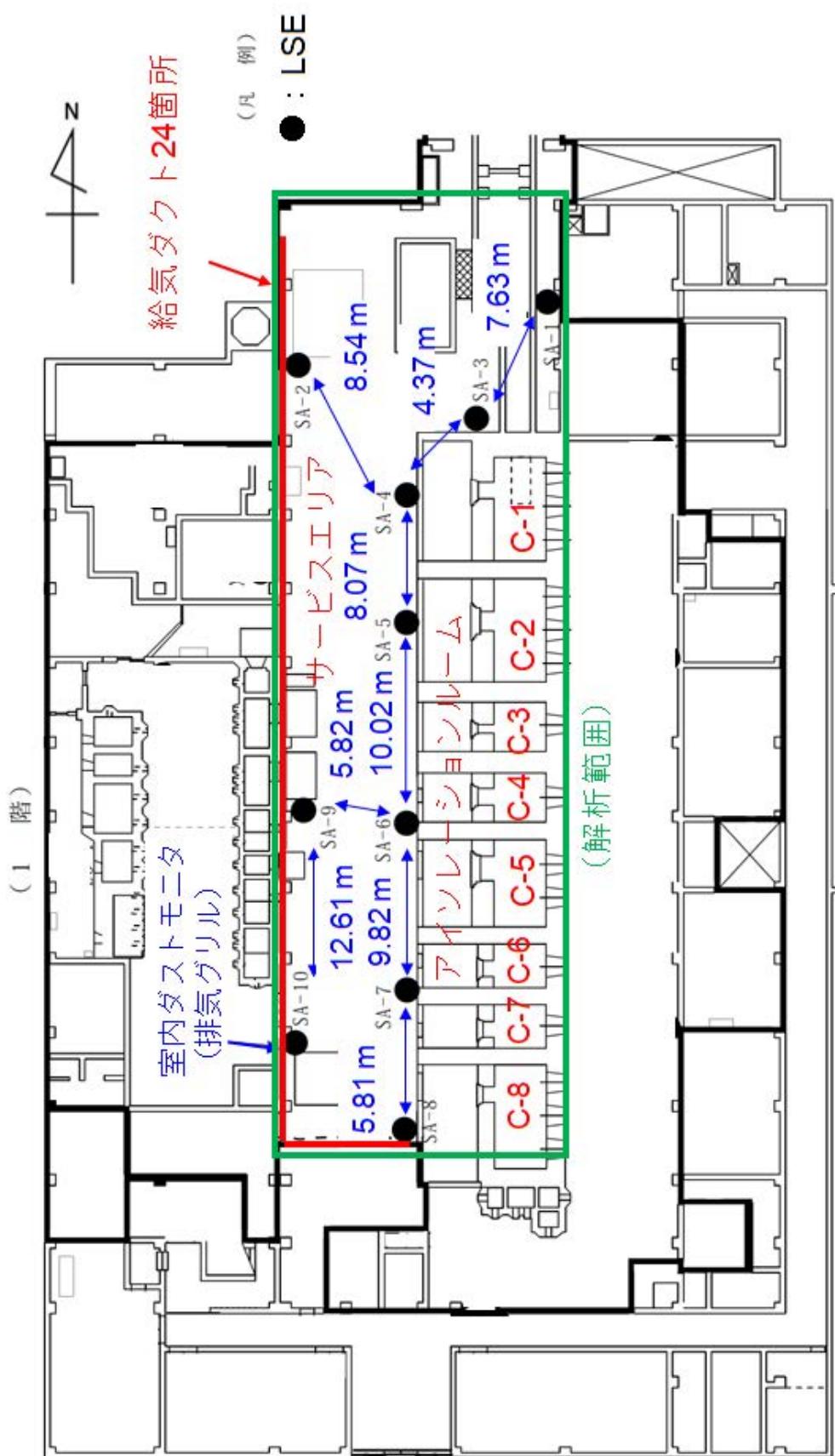


Fig. 2.2 サービスエリア 1 階の配置図

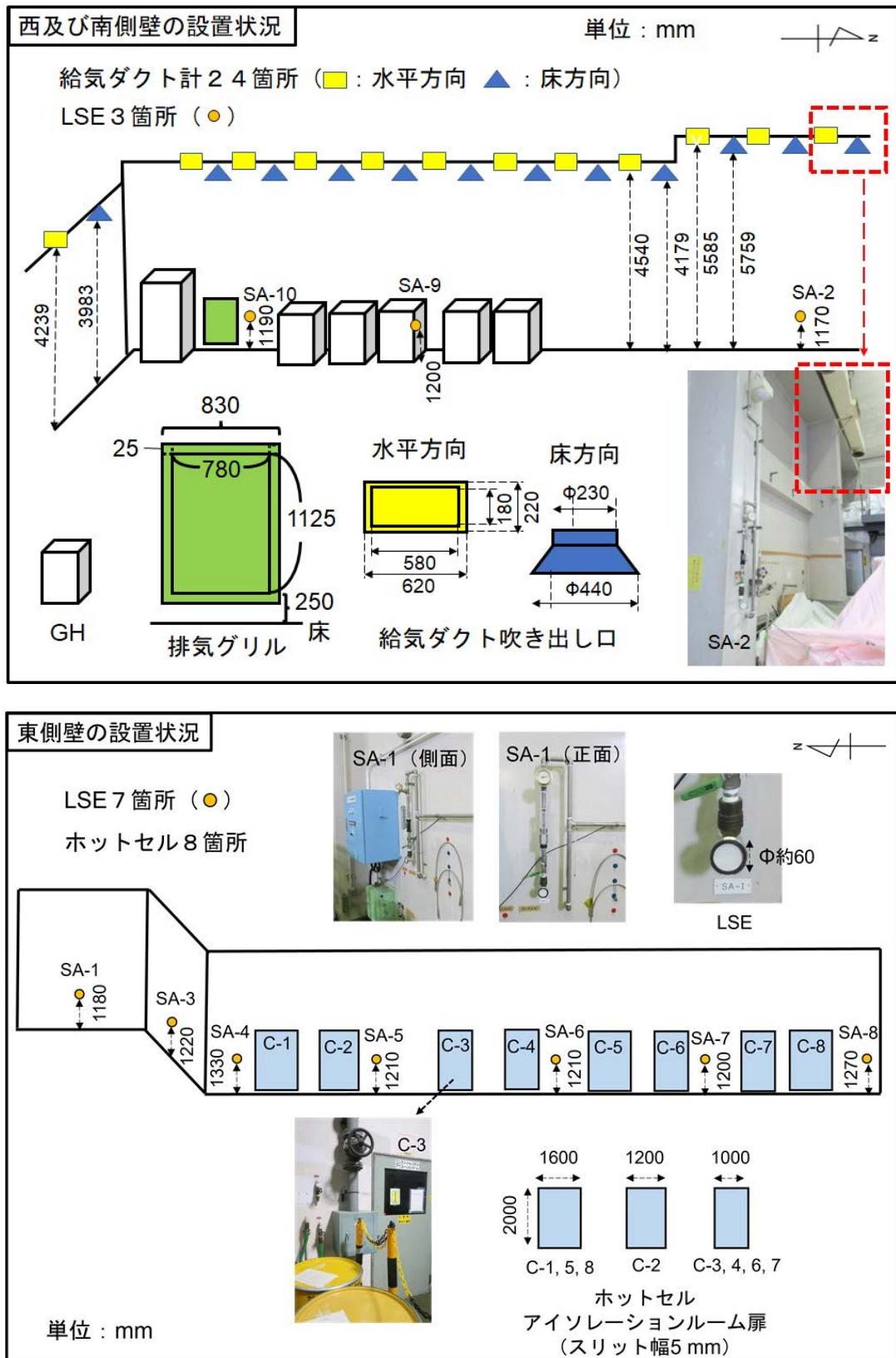


Fig. 2.3 各設備の配置図と寸法

Table 2.1 HL 施設サービスエリア内における給気量及び排気量（定格量）

給気量 (m ³ /h)		排気量 (m ³ /h)	
給気系 I	2,400	排気グリル	5,480
給気系 II	18,740	C-1	3,960
給気系 III	2,100	C-2	3,960
		C-3	1,980
		C-4	1,620
		C-5	2,700
		C-6	1,350
		C-7	1,350
		C-8	3,240
合計	23,240	合計	25,640
給気量の不足分	2,400		

Table 2.2 LSS のサンプリング流量

LSE	サンプリング流量 (L/min)	
	全稼働時	一部停止時
SA-1	40	—
SA-2		50
SA-3		50
SA-4		—
SA-5		50
SA-6		—
SA-7		50
SA-8		—
SA-9		50
SA-10*	100	100

*室内ダストモニタ用吸引端を兼ねる。

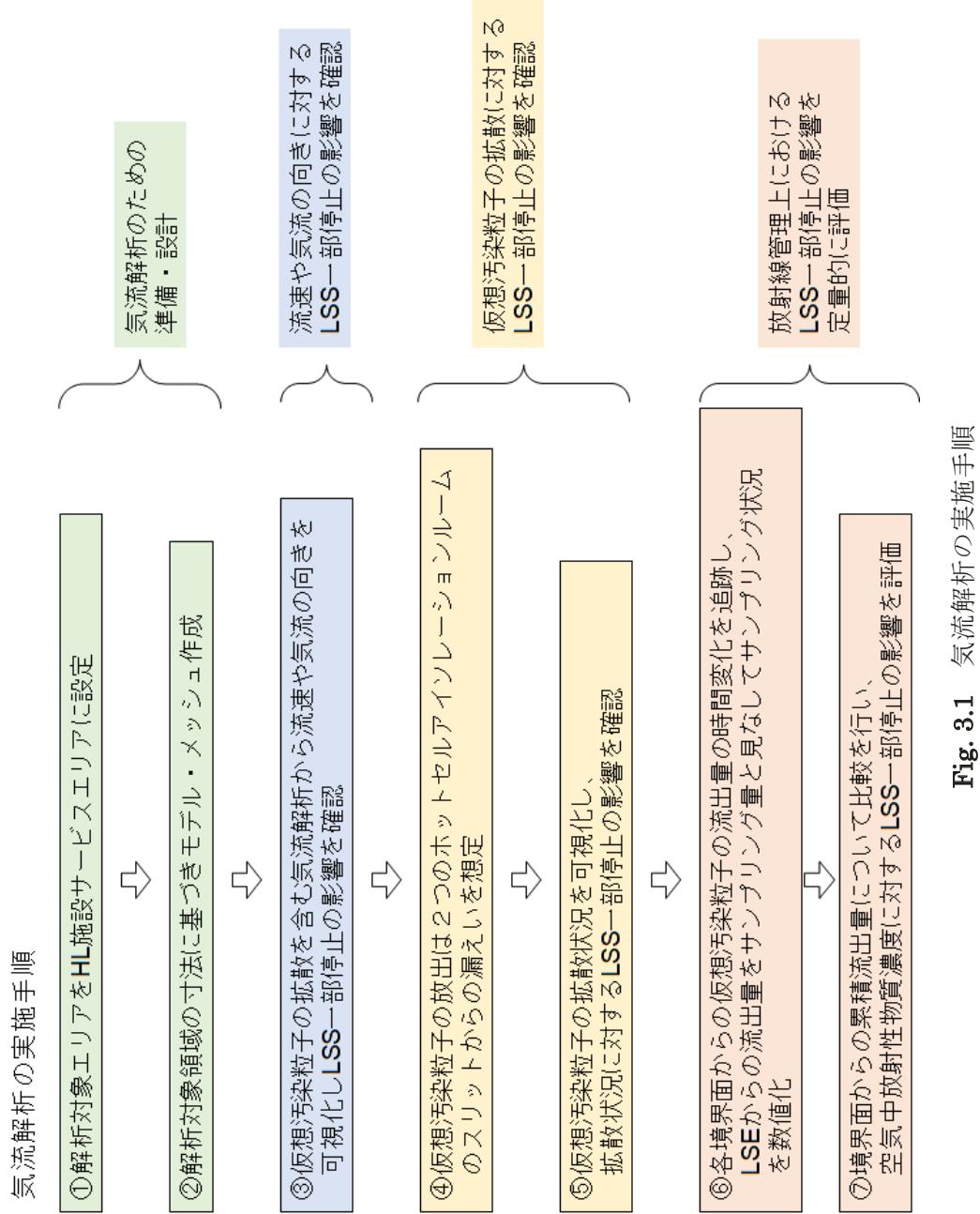
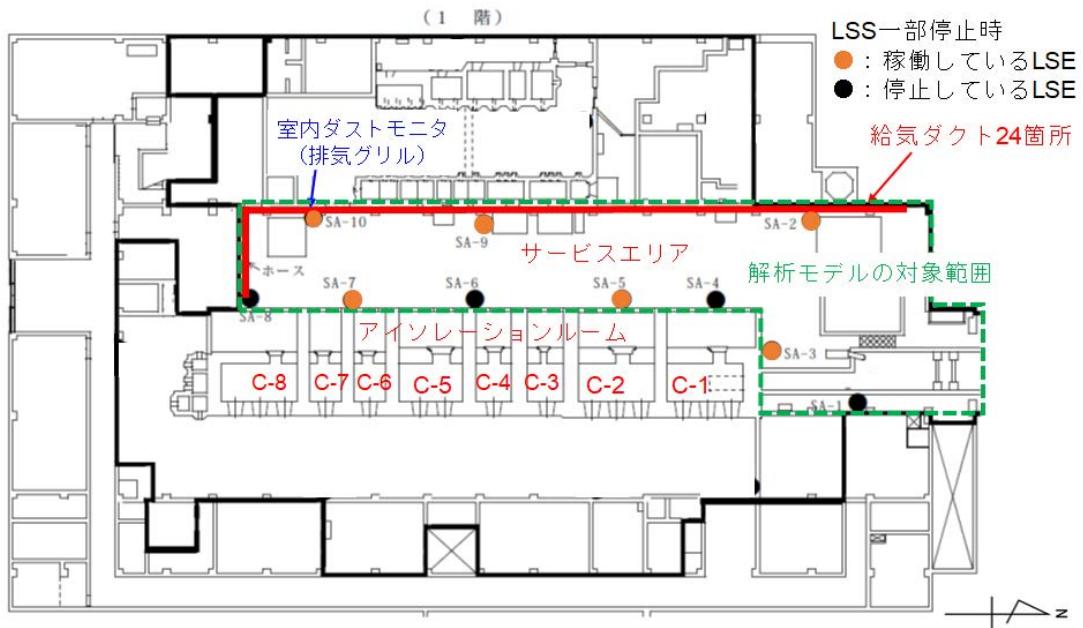


Fig. 3.1 気流解析の実施手順



解析モデル：モデル化範囲はサービスエリア1階
メッシュ数：約56万、メッシュ形状：ポリヘドロ

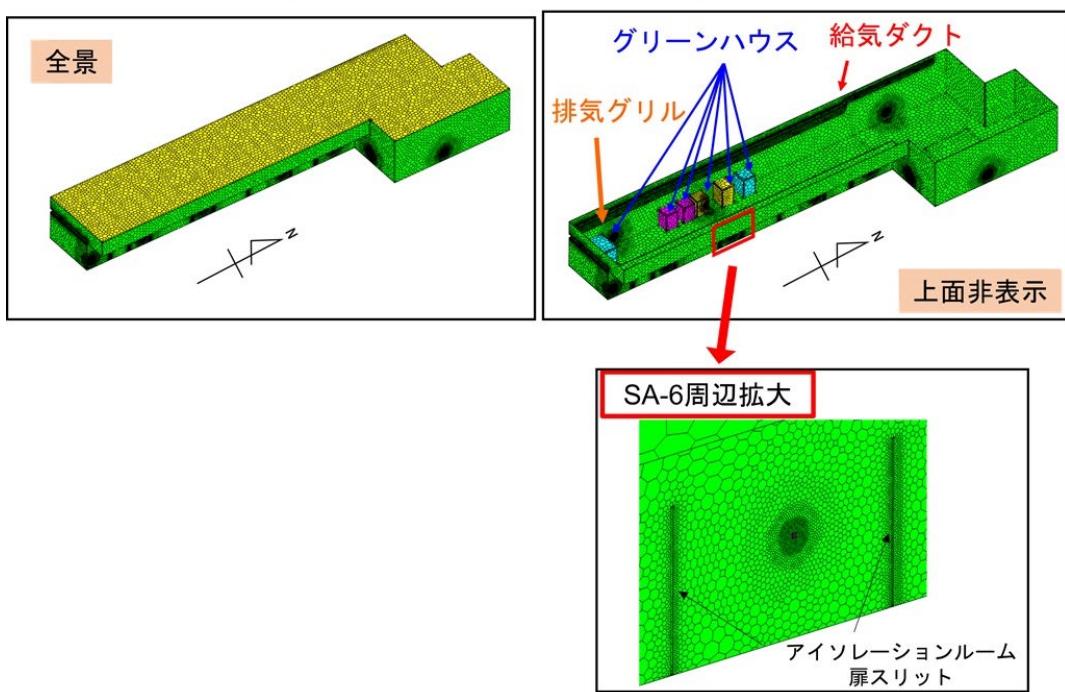


Fig. 3.2 解析モデルの対象範囲及び解析モデル（全景）

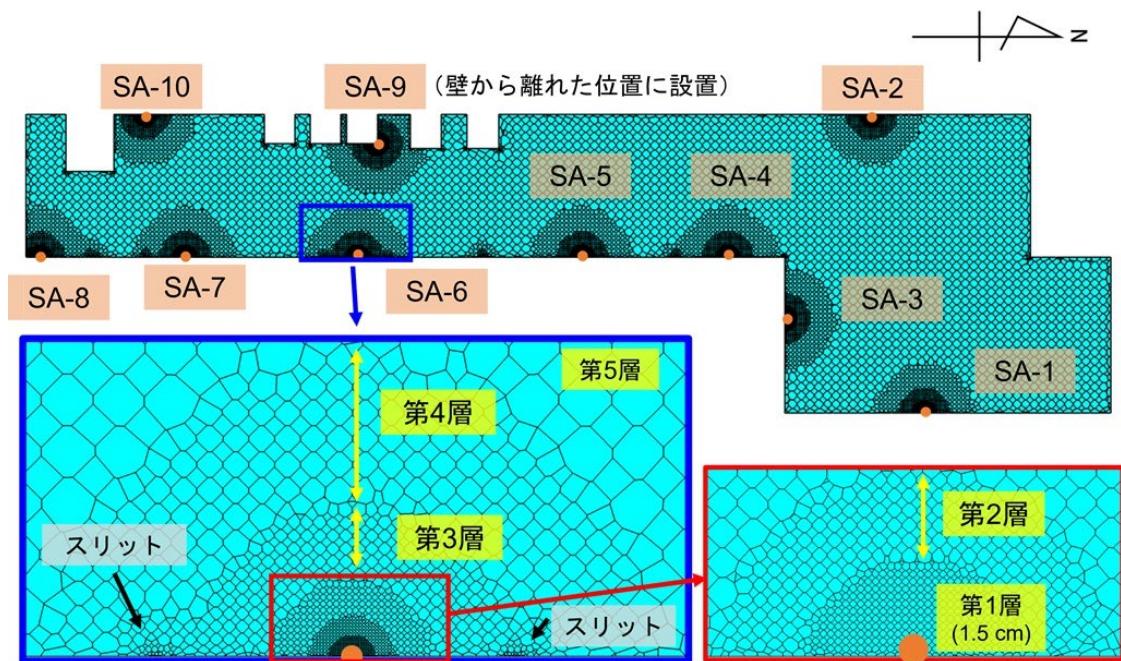


Fig. 3.3 床面から 1.21 m の高さにおける解析モデルの断面図

Table 3.1 仮想汚染粒子の放出条件

項目	数値
粒子の放出量	0.01 kg (10 g)
粒子の放出時間	86,400 s (24 h)
粒径	3.0×10^{-7} m (0.3 μm)
密度	6,534 kg/m ³
粘性	1.809×10^{-5} Pa s
拡散係数 D	1.242×10^{-10}

$$D = kT / 6\pi\mu a \cdot C$$

k : ボルツマン定数

T : 温度

μ : 粘性

a : 粒子半径

C : カニンガムの補正係数

Table 3.2 解析ケース

	グループ 1 : LSS 全稼働 (LSE 10 箇所)	グループ 2 : LSS 一部停止 (LSE 6 箇所)
グループ A : C-2 セル放出	CaseA-1	CaseA-2
グループ B : C-8 セル放出	CaseB-1	CaseB-2

Table 3.3 解析条件

空間	3 次元
時間	非定常、1 次精度陰解法
圧力-速度連成	Coupled
乱流モデル	Realizable k-epsilon モデル
壁の扱い	標準壁関数
離散化スキーム 圧力 運動量 乱流エネルギー 乱流散逸率	Body Force Weighted 1 次精度風上差分 1 次精度風上差分 1 次精度風上差分

Table 3.4 解析モデル対象範囲への空気の流入・流出に関する境界条件

境界面	境界条件	単位	LSS の状態	粒子放出前	グループ A	グループ B
給気ダクト	入口速度境界	m/s	—	1.906		
	流入温度	°C	—	20.0		
空間上面	入口速度境界	m/s	全稼働	1.878×10^{-3}	2.355×10^{-4}	5.342×10^{-4}
			一部停止	1.876×10^{-3}	2.327×10^{-4}	5.315×10^{-4}
	流入温度	°C	—	20.0		
排気グリル	出口圧力境界	Pa	—	0 (基準圧力)		
C-1 セル	入口速度境界	m/s	—	-23.91		
C-2 セル	入口速度境界	m/s	—	-26.19	0.0	-26.19
C-3 セル	入口速度境界	m/s	—	-18.33		
C-4 セル	入口速度境界	m/s	—	-15.00		
C-5 セル	入口速度境界	m/s	—	-16.30		
C-6 セル	入口速度境界	m/s	—	-12.50		
C-7 セル	入口速度境界	m/s	—	-12.50		
C-8 セル	入口速度境界	m/s	—	-19.57	-19.57	0.0
LSE (SA-2, 3, 5, 7, 9)	入口速度境界	m/s	全稼働	-0.2286		
			一部停止	-0.2858		
LSE (SA-1, 4, 6, 8)	入口速度境界	m/s	全稼働	-0.2286		
			一部停止	— (壁)		
室内ダストモニタ用吸引端 (SA-10)	入口速度境界	m/s	—	-0.5716		

拡散開始から24時間後のLSE周辺の流速と気流の向き

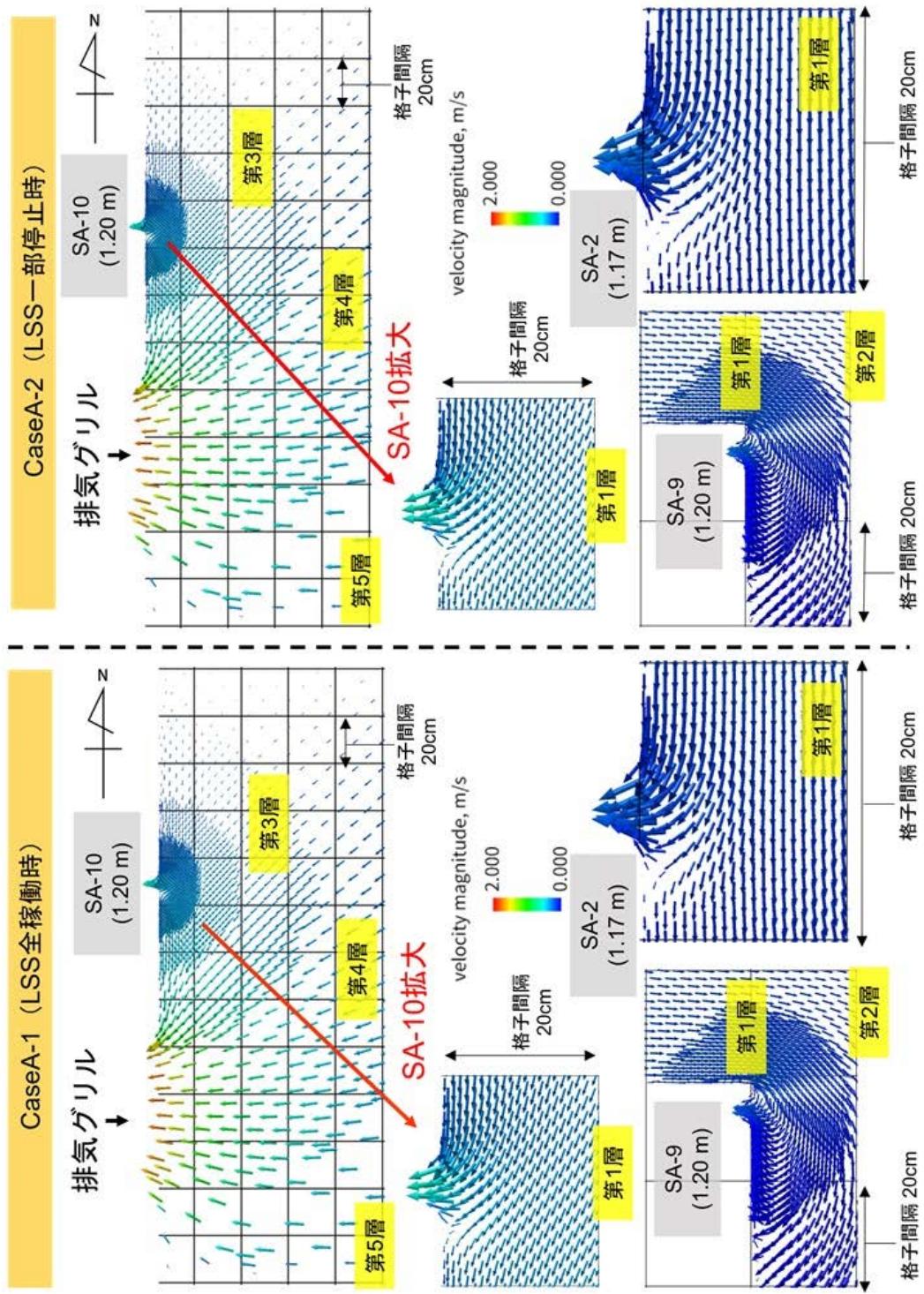


Fig. 4.1 LSE周辺の流速と気流

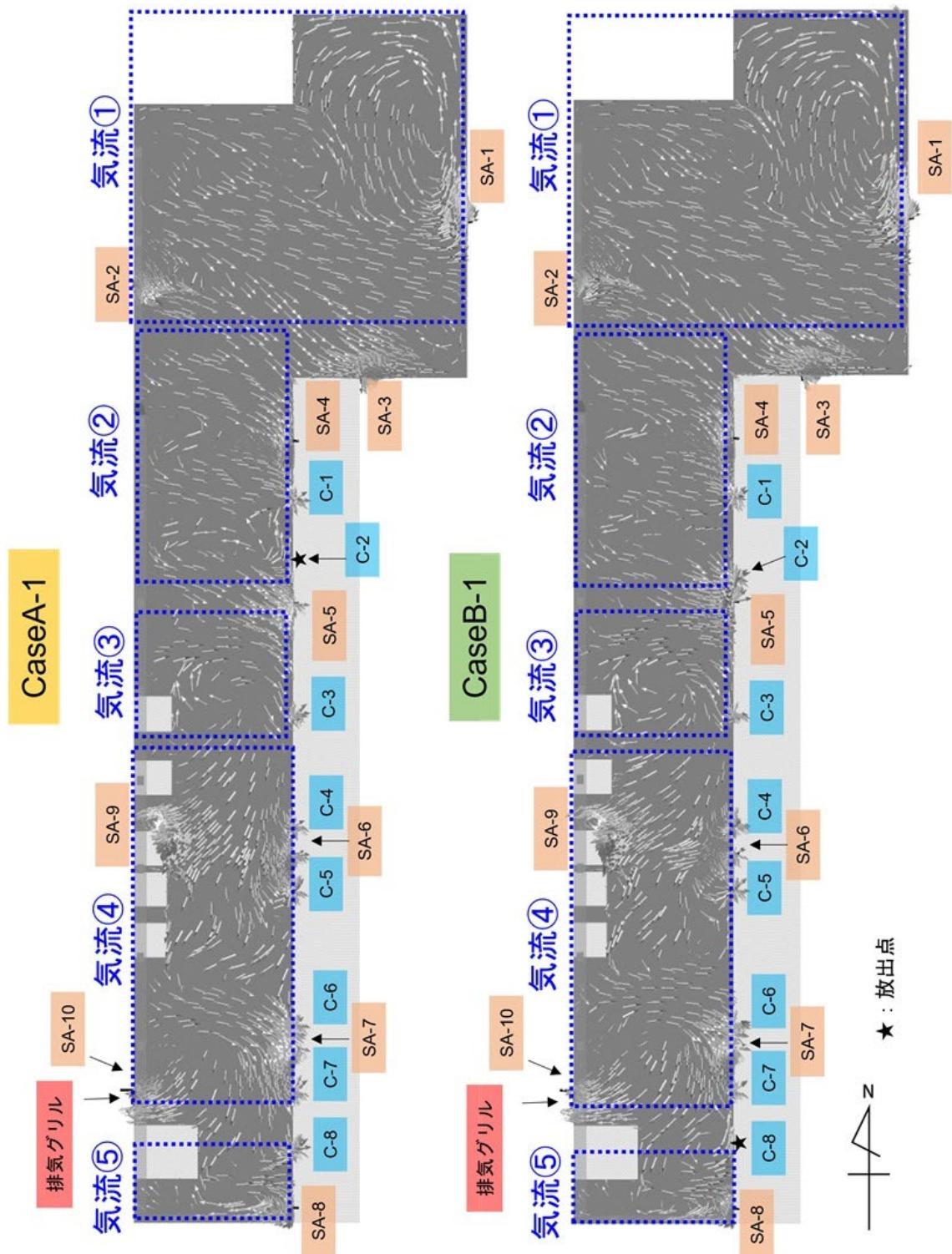


Fig. 4.2 サービスエリア全体の気流の向き

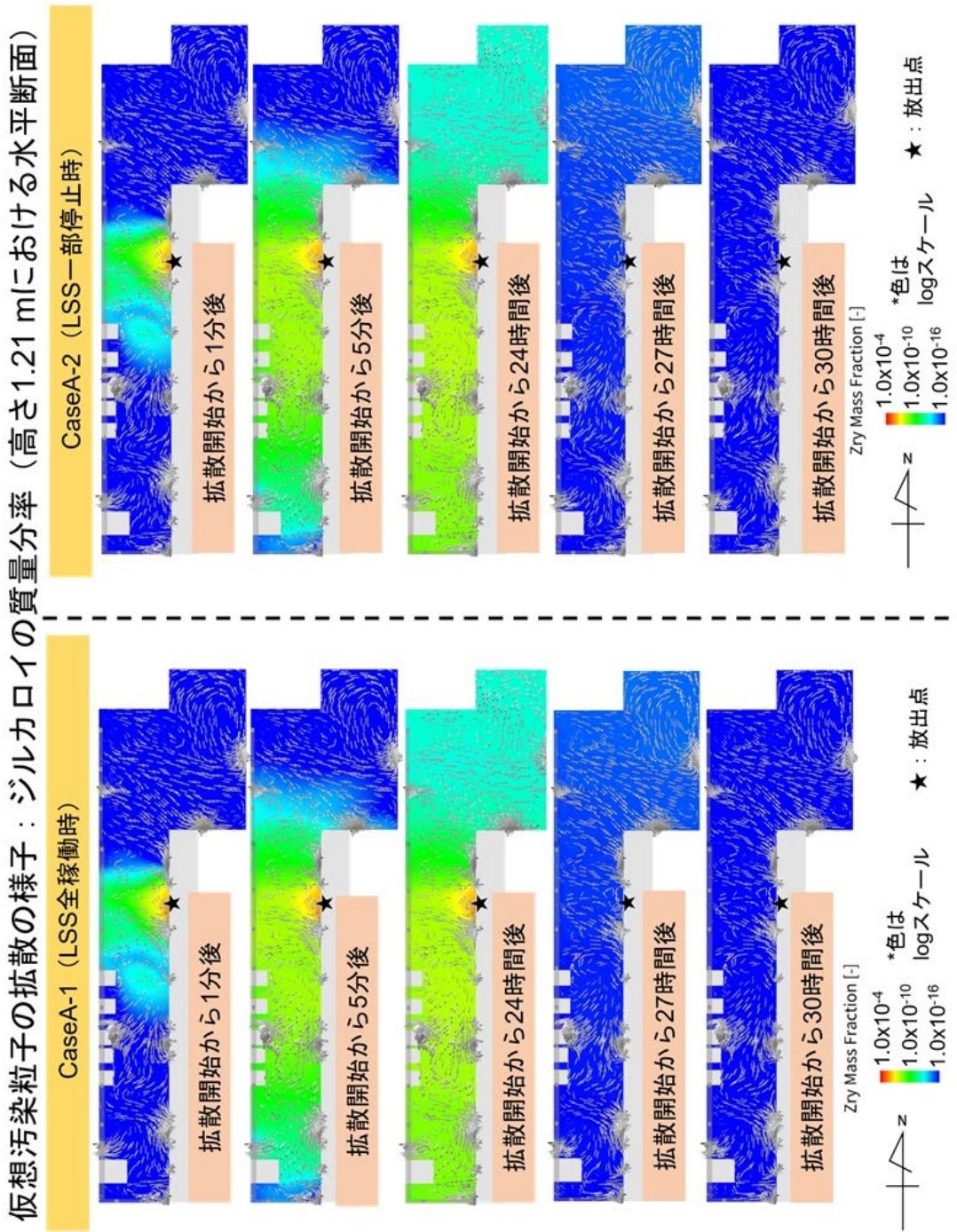


Fig. 4.3 仮想汚染粒子の拡散状況（グループ A）

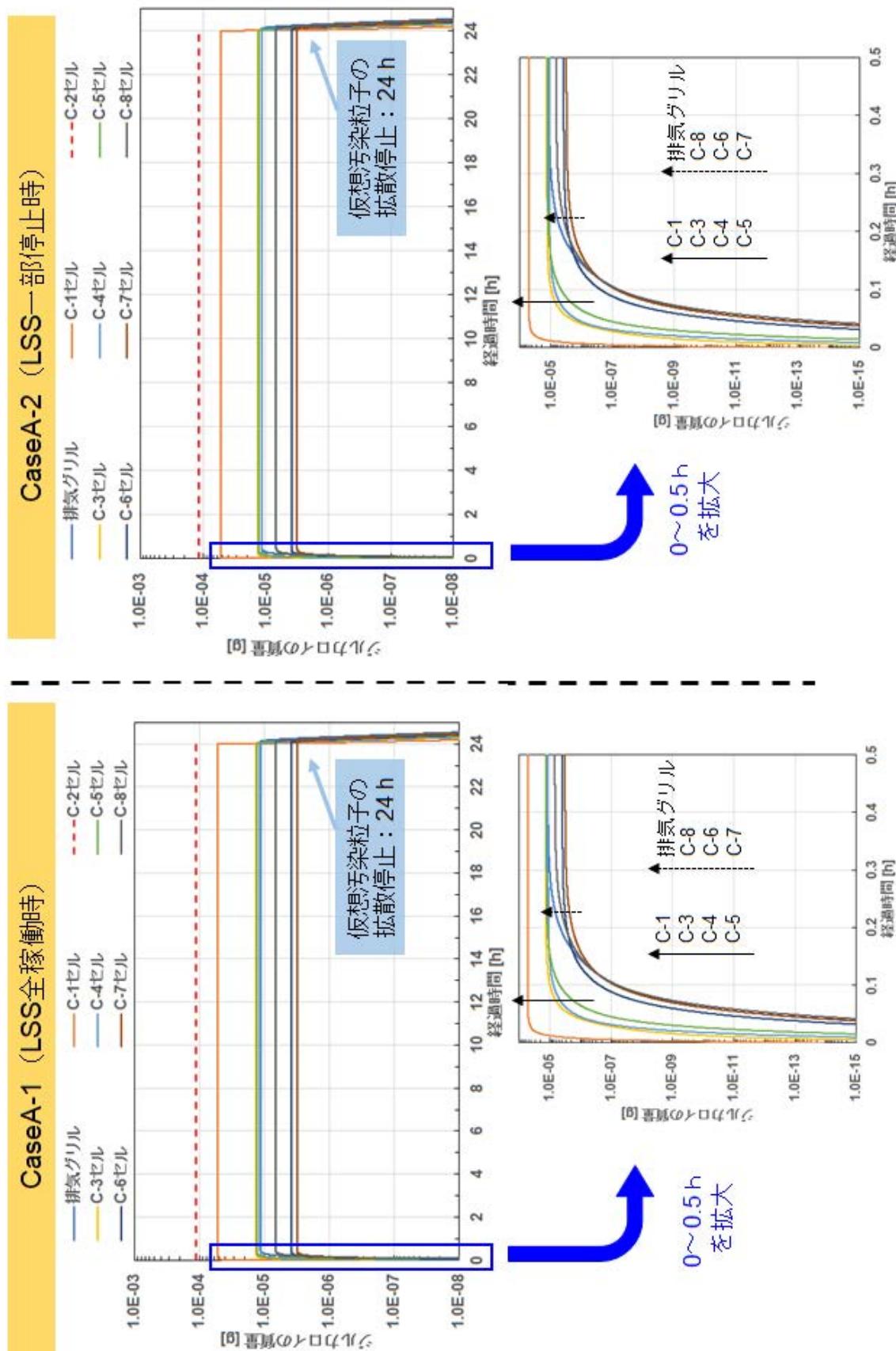


Fig. 4.4 排気グリル及びホットセルへの仮想汚染粒子流出量の時間変化 (グレーブ A)

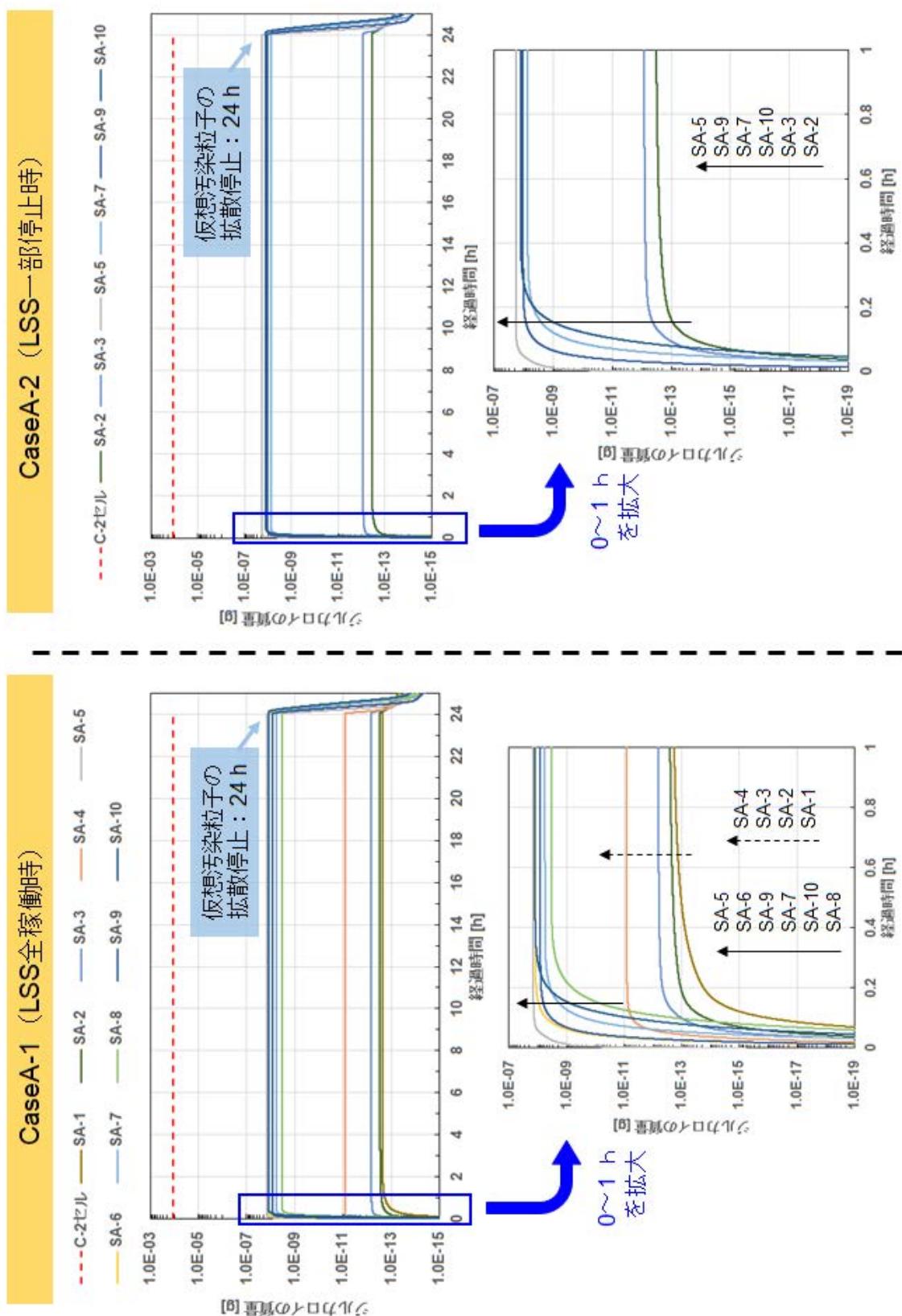


Fig. 4.5 LSE への仮想汚染粒子流出量の時間変化（グレーブ A）

Table 4.1 C-2 セルと各境界面の位置関係

LSE	距離 (m)	方向	ホットセル	距離 (m)	方向
SA-1	17.7	北側	C-1	2.4	北側
SA-2	12.6		C-2	—	—
SA-3	11.1		C-3	5.1	
SA-4	5.4	南側	C-4	9.0	
SA-5	0.9		C-5	12.0	
SA-6	9.9		C-6	17.0	南側
SA-7	19.2		C-7	20.0	
SA-8	26.0		C-8	23.1	
SA-9	11.1				
SA-10	22.2				

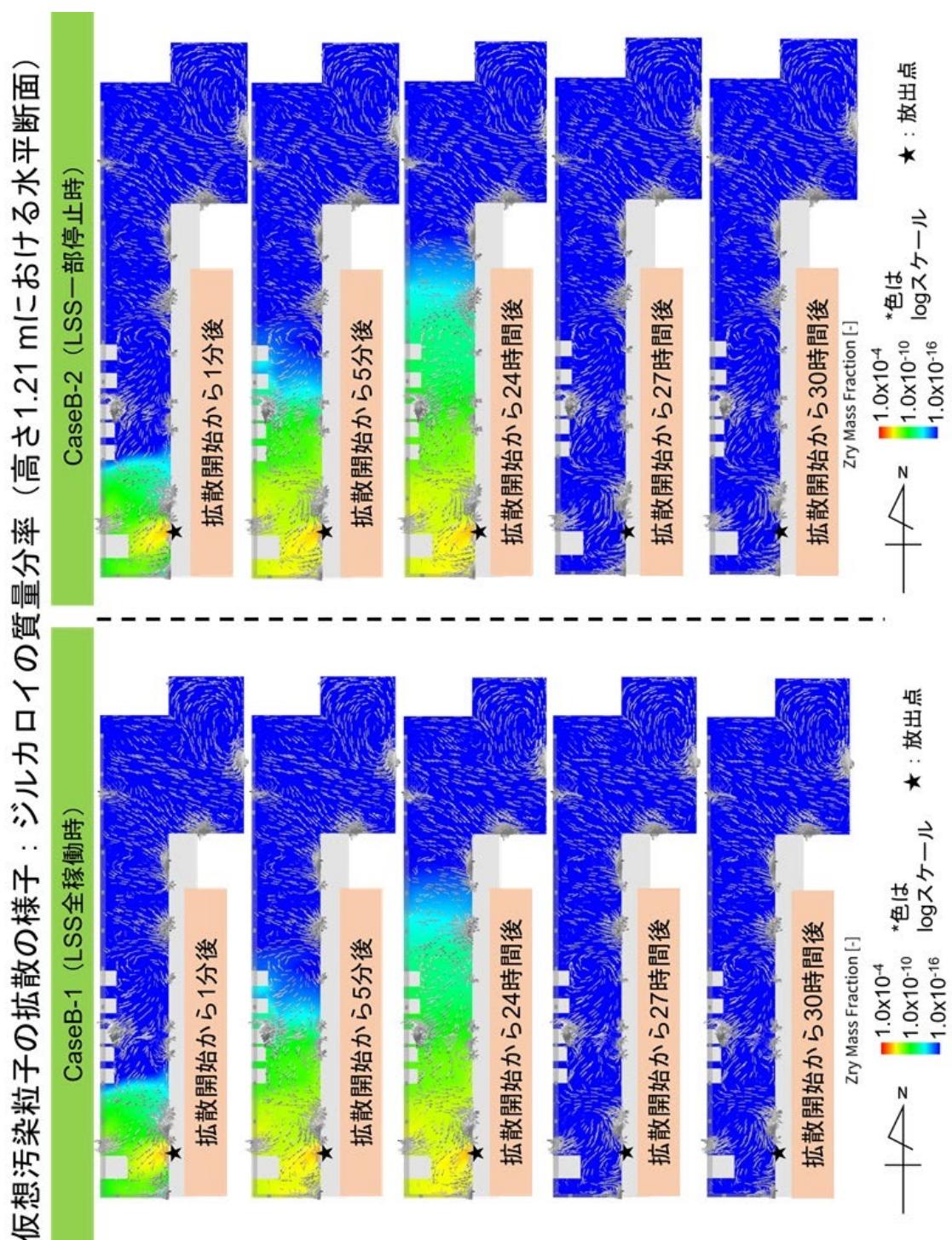


Fig. 4.6 仮想汚染粒子の拡散状況（グレープ B）

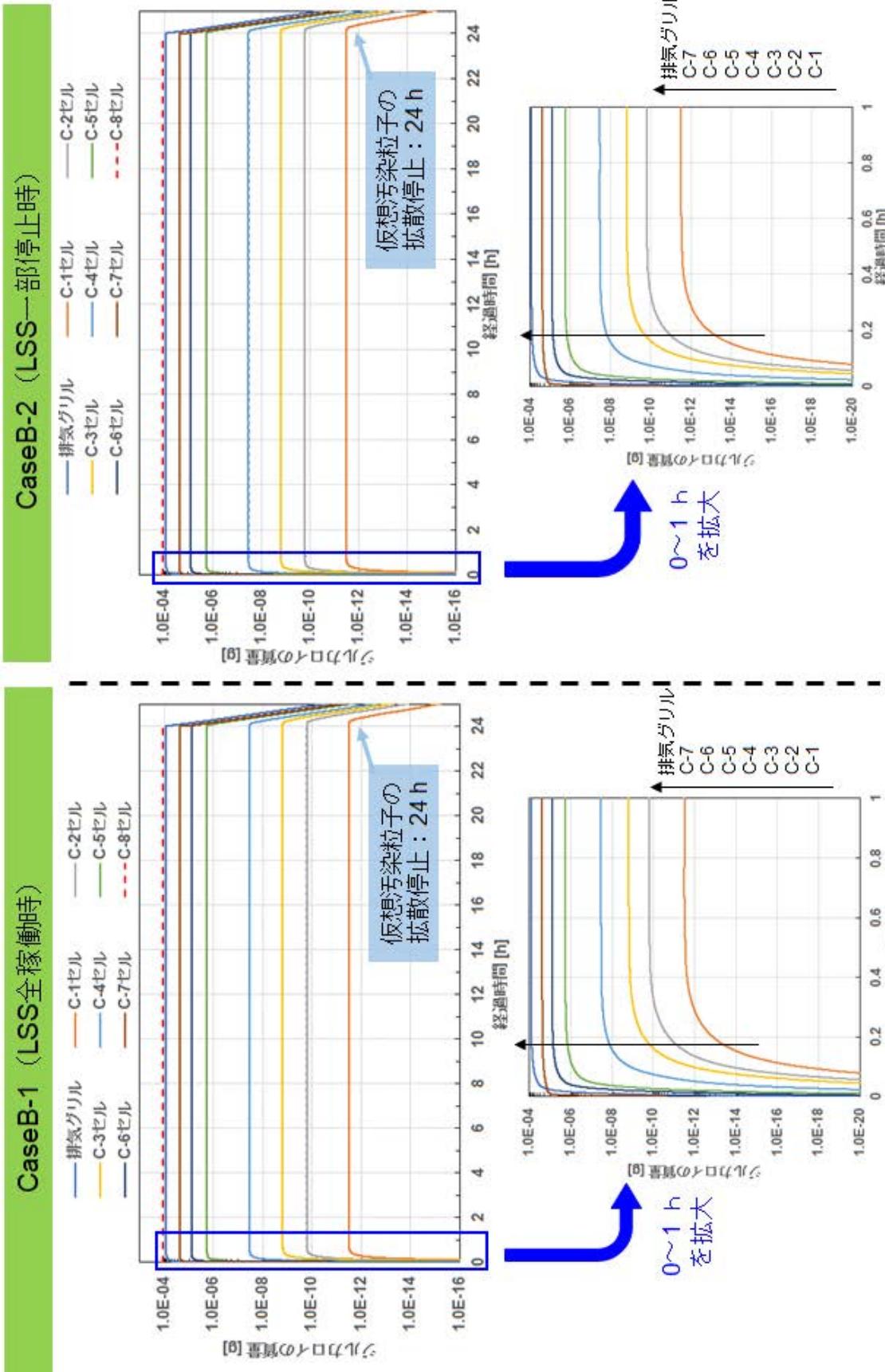


Fig. 4.7 排気グリル及びホットセルへの仮想汚染粒子流出量の時間変化 (グループB)

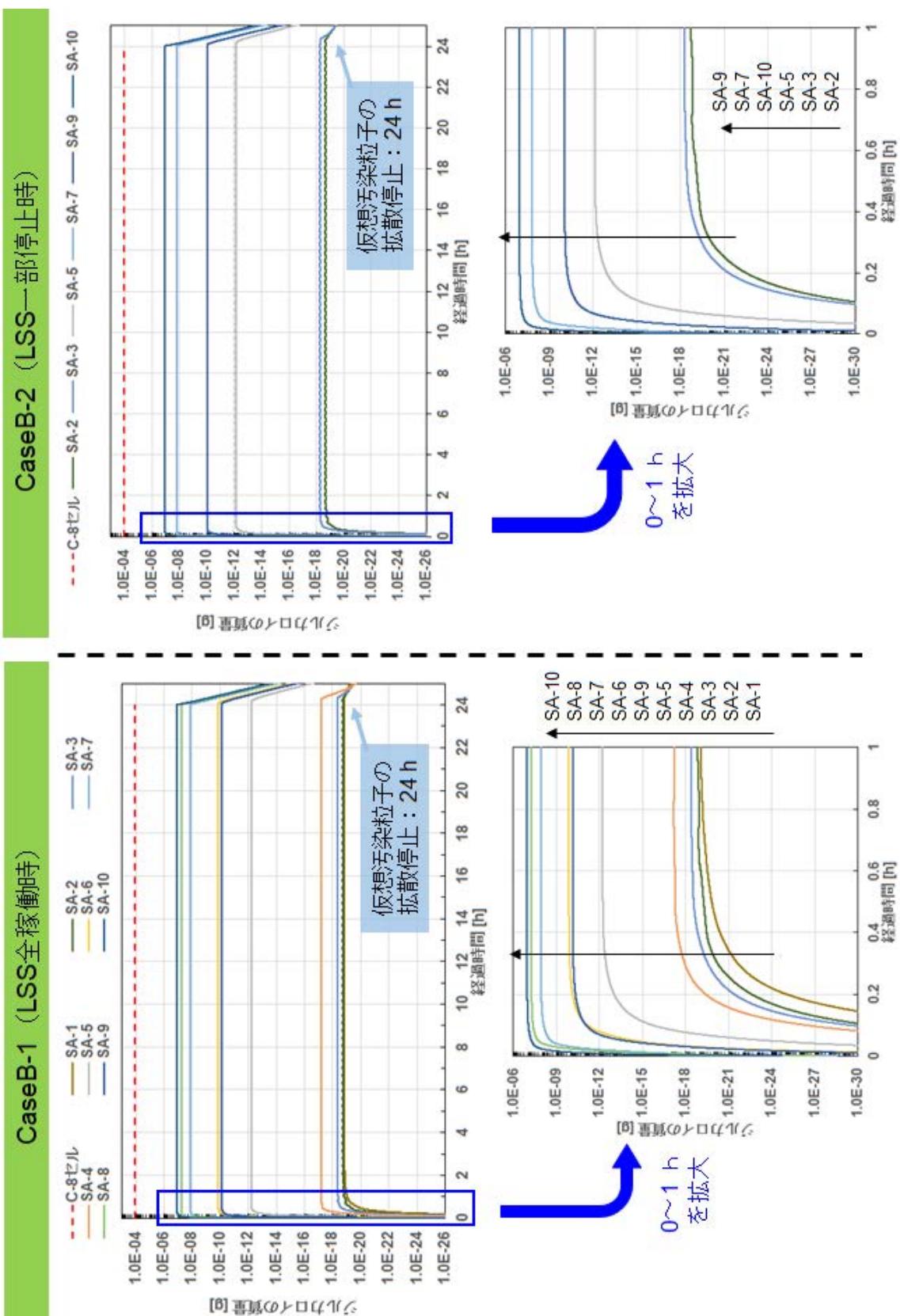


Fig. 4.8 LSEへの仮想汚染粒子流出量の時間変化（グレープB）

Table 4.2 C-8 セルと各境界面の位置関係

LSE	距離 (m)	方向	ホットセル	距離 (m)	方向
SA-1	41.6		C-1	26.6	
SA-2	36.2		C-2	23.1	
SA-3	35.3		C-3	16.8	
SA-4	29.6	北側	C-4	13.5	北側
SA-5	22.2		C-5	9.3	
SA-6	12.6		C-6	4.8	
SA-7	3.3		C-7	1.8	
SA-8	1.9	南側	C-8	—	—
SA-9	14.3	北側			
SA-10	6.0				

Table 4.3 24 時間後における各境界面からの仮想汚染粒子の累積流出量

流出箇所	グループ A			グループ B		
	CaseA-1	CaseA-2	LSS一部停止 の影響を示す比 CaseA-2／CaseA-1	CaseB-1	CaseB-2	LSS一部停止 の影響を示す比 CaseB-2／CaseB-1
排気グリル	0.999	1.00	1.00	7.07	7.07	1.00
SA-1	1.94×10^{-8}	—	—	1.18×10^{-14}	—	—
SA-2	2.43×10^{-8}	3.05×10^{-8}	1.26	1.50×10^{-14}	1.88×10^{-14}	1.25
SA-3	5.94×10^{-8}	7.42×10^{-8}	1.25	3.82×10^{-14}	4.78×10^{-14}	1.25
SA-4	7.15×10^{-7}	—	—	5.38×10^{-13}	—	—
SA-5	1.24×10^{-3}	1.56×10^{-3}	1.26	5.30×10^{-8}	6.62×10^{-8}	1.25
SA-6	1.04×10^{-3}	—	—	1.16×10^{-5}	—	—
SA-7	4.90×10^{-4}	6.13×10^{-4}	1.25	1.09×10^{-3}	1.36×10^{-3}	1.25
SA-8	2.90×10^{-4}	—	—	4.91×10^{-3}	—	—
SA-9	7.04×10^{-4}	8.73×10^{-4}	1.24	6.41×10^{-6}	8.03×10^{-6}	1.25
SA-10	1.08×10^{-3}	1.08×10^{-3}	1.00	9.86×10^{-3}	9.86×10^{-3}	1.00
全LSE合計	4.84×10^{-3}	4.13×10^{-3}	0.853	1.59×10^{-2}	1.12×10^{-2}	0.704
ホットセル合計	8.96	8.96	1.00	2.89	2.90	1.00
サービスエリア 残留量	3.70×10^{-2}	3.70×10^{-2}	1.00	2.84×10^{-2}	2.84×10^{-2}	1.00
総量	10.0	10.0	—	10.0	10.0	—

Table 4.4 仮想汚染粒子の累積流出量から算出した放射能量

流出箇所	^{95}Zr とした場合の放射能量 (Bq)			
	CaseA-1	CaseA-2	CaseB-1	CaseB-2
SA-1	3.47×10^6	—	2.11	—
SA-2	4.34×10^6	5.45×10^6	2.68	3.36
SA-3	1.06×10^7	1.33×10^7	6.82	8.54
SA-4	1.28×10^8	—	9.61×10^1	—
SA-5	2.22×10^{11}	2.79×10^{11}	9.47×10^6	1.18×10^7
SA-6	1.86×10^{11}	—	2.07×10^9	—
SA-7	8.75×10^{10}	1.10×10^{11}	1.95×10^{11}	2.43×10^{11}
SA-8	5.18×10^{10}	—	8.77×10^{11}	—
SA-9	1.26×10^{11}	1.56×10^{11}	1.15×10^9	1.43×10^9
SA-10	1.93×10^{11}	1.93×10^{11}	1.76×10^{12}	1.76×10^{12}

