原子力施設解体におけるエアロゾル粒子の飛散挙動 *

Aerosol Behaviors in Dismantling of Nuclear Facilities

島田 太郎** 立花 光夫** 柳原 敏**

SHIMADA Taro TACHIBANA Mitsuo YANAGIHARA Satoshi

Abstract Radioactive aerosols produced by cutting components and structures may cause internal exposures of workers and secondary contamination in dismantling nuclear facilities. It must be important for safety to understand the diffusion behaviors of aerosols in dismantling activities under various working conditions. Therefore diffusion behaviors of aerosols have been studied by experiments such as flow visualization and by numerical analyses based on the fluid dynamics. The results were compared with those obtained in the analyses. As a result, it was confirmed that the diffusion behaviors of aerosols in in-air plasma arc cutting can be simulated by numerical analyses.

Keywords : Decommissioning, Dismantlement of Nuclear Facilities, Radioactive Aerosol, Flow Visualization

1. はじめに

原子力発電所の寿命は、現在長寿命化の検討がされているが、一般に 30 ないし 40 年と見込まれている。超寿命化が行われない場合、2010 年頃には現在稼働中の原子力発電所のいくつかは運転を停止し、相次いで廃止措置が行われると予想されている。この状況の中、1996 年 3 月には、試験研究施設ながら我が国初の原子力発電プラントである日本原子力研究所の動力試験炉(JPDR)解体実地試験が終了し、原子力発電所の安全な解体が可能であることが実証された[1]。現在、解体実地試験で得られた数多くの知見に基づいて、解体技術の商業用原子力発電所への適用性について検討を進めている。

そして、1998 年 3 月、日本原子力発電東海発電所がその運転を永久に停止し、商業用原子力発電所の廃止措置へ向けた第一歩を踏み始めた。我が国では、狭隘な国土を鑑み早急に解体撤去することを方針としており、当該発電所でも解体準備が進められている[2]。

原子力施設の解体においては、解体対象物が放射能を保有しているため、放射線下での作業が必要となる。遠隔操作による解体技術の適用が考えられているが、線量当量率の極めて高い環境での作業に限られ、すべての機器・構造物を対象とすることは困難である。安全な作業環境が整っていれば、作業効率の観点からも作業員の手動による解体作業に頼るところは大きい

*1999.11.1 受付

** 日本原子力研究所 バックエンド技術部 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4
TEL(029)282-6117 FAX (029)282-5446

と予想される。作業員の安全を確保するために安全評価手法を確立することが必要であり、原研では、解体作業時の安全性を周辺公衆への影響まで含めて、総合的に評価するための検討を行っている。

解体作業のうち重要作業の一つである切断作業においては、切断等によってドロスや切り粉等の副次生成物が生成される。特に気中切断の場合には放射性エアロゾル粒子が作業環境中に飛散し、作業員の内部被ばく及び放射能汚染拡大の原因となる。つまり、解体作業を安全かつ効率的に進めるためには、空气中放射能濃度を合理的に達成可能な低いレベルに抑えることが重要であり、作業環境中に放出されるエアロゾル粒子の飛散挙動を把握して、効率的にそれらを排出する必要がある。

そこで、解体作業におけるエアロゾル粒子の飛散挙動評価を数値解析により行っている[3,4]。このような環境でのエアロゾル粒子の飛散挙動が解析できるようになれば、安全性評価上重要な空气中放射能濃度の評価だけでなく、効率的にエアロゾル粒子を排出できる局所排気装置を含めた作業環境の構築にも活用が可能となる。飛散挙動の数値解析では、主にプラズマアーク切断を対象に、熱流体方程式と質量粒子の運動方程式を用い、固気二相流として評価した。

さらに、解析結果を検証するため、実際に切断試験を行い、発生する上昇流を可視化手法を用いて観察するとともに、体系内の温度分布変化を測定して、解析結果と比較した。

本稿では、エアロゾル粒子の飛散挙動に関して、JPDR 解体実地試験からの知見と数値解析及び検証実験結果の一例を紹介する。

2. JPDR 解体実地試験におけるエアロゾル評価

2.1 解体作業の概要

JPDR は試験研究用の沸騰水型原子力発電所であり、後に改良を加え、最終的には 90MW の熱出力を有していた。構成材料は主に炭素鋼、ステンレス鋼の金属、建屋構造物であるコンクリートである。解体作業は原子炉本体及び冷却系配管、中性子によって放射化した原子炉周囲のコンクリート等、さらに、汚染された放射能を有する部分をすべて取り除き、放射性物質が残存していないことを測定によって確認して

管理区域を解除した後、建屋の解体が行われた。

放射能を有する部分に適用された解体工法は、鋼構造物に対しては熱的(プラズマアーク切断、ガス切断)及び機械的切断、コンクリートに対しては機械的切断、制御爆破が主であった。

解体作業は通常、放射性エアロゾル粒子の浮遊空間を制限して汚染拡大を防止するために、塩化ビニール製のシートで作られたグリーンハウス内で行われた。グリーンハウスは常に排気され内部は負圧を保持しており、一部が損傷し壁が貫通した場合でも空気は外部から内部へ流れるため、内部の放射性物質が外部に漏洩することはない。グリーンハウス内部のエアロゾル粒子を含む空気は、HEPA フィルタを通過しエアロゾル粒子を捕集した後外部に放出される。

また、切断中グリーンハウス全体にエアロゾル粒子が飛散する前に吸入して外部に排出する局所排気装置を切断部近傍に設け、空气中放射能濃度の低減を図る場合もあった。

2.2 切断によって発生するエアロゾルの性状

解体作業時には切断や爆破によってドロス、切り粉、エアロゾル粒子等の副次生成物が発生する。熱的切断時に発生する粒子径の大きいドロスは空気中には飛散せず、直ちに落下する。その後回収する必要があるが、作業員への内部被ばくの影響はほとんどなく、廃棄物としての処理も比較的容易である。ところが、比較的粒子径の小さいエアロゾル粒子は、前述のように作業環境中に飛散することによって作業員の内部被ばくの原因となるとともに、放射能汚染の拡大を誘発することから、解体実地試験においてもエアロゾル粒子の性状を調査した[5]。プラズマアーク切断及び機械的切断によって発生するエアロゾル粒子の粒子径、粒径分布及び切断溝に占める飛散粒子量の割合を表す飛散率を Table 1 に示す。飛散率はプラズマアーク切断の場合は放射能基準、機械的切断の場合は重量基準で測定されたものである。プラズマアーク切断における 2 つのピークを持つ粒径分布及び比較的大きな飛散率が特徴であった。

3. エアロゾル粒子飛散挙動に関する実験方法

実験体系を Fig.1 に示す。グリーンハウスは透明なアクリル製で、中には排気口、吸気口、

Table 1 Characteristics of Aerosols
Produced by Cuttings

Cutting method	Plasma arc	Mechanical
Peak particle size	0.3, 2 μ m	5 μ m
Distribution	Bimodal	Singlemodal
Dispersion ratio (Measurement)	10 ⁻³ (Activity)	10 ⁻⁴ (Weight)

被切断物、切断トーチを配置した。実験では駆動装置に取り付けられた切断トーチが一定の速度で移動して、厚さ 12mm の炭素鋼平板を切断した。

本実験においては、切断中及び切断後の短時間のエアロゾル粒子の飛散挙動を把握するため、実際にグリーンハウス内においてプラズマアーク切断を行い、その挙動を可視化により観測することを試みた。可視化手法としてレーザーライトシート法を採用し、可視化光源として Ar イオンレーザーを用いた。最大出力 4W のレーザー発振器からのビームを光ケーブルを通してレーザーライトシートプロジェクトに通過させ、平面状に変換し、グリーンハウスに照射した。これによりグリーンハウスの一断面の観察が可

能となる。しかし、切断対象物と切断トーチの間に発生する強度のアーク光が、レーザーライトの光強度を上回り、切断中の可視化は困難であり、可視化はアーク光の消滅する切断後に行う必要があった。さらに、切断によって発生するエアロゾル粒子だけでは、十分な可視化画像が得られないことから、切断中及び切断後の短時間においてはエアロゾル粒子の運動は気相の流れのみに支配されるという仮定をおき、熱供給によって発生する上昇流の経路を観測するため、次の試験手順を設定した。

切断直前に 3.6m³/min で排気されているグリーンハウス内に粒子径 1 μ m のトレーサーを吸気口から導入し充填させた後に切断を開始する。切断終了直後アークが消滅し、レーザーライトシートによる散乱光で断面を観察する。これを切断時間を変化させて数度繰り返し、切断直後の可視化画像を切断時間順に並べることによって上昇流空間分布の時間変化が取得可能となる。あわせて、グリーンハウス内温度分布測定を行った。Fig. 2 に熱電対の設置位置を示す。測定点数は 45 とし、5Hz で温度分布の時間変化を記録した。切断前のグリーンハウス内温度は 296K で均一であった。

Fig. 1 Experimental Apparatus

4. エアロゾル粒子の飛散挙動解析

プラズマアーク切断を行う場合、切断トーチと切断対象物の間にアークが発生し、そのアークが金属を溶融・蒸発させる。また、ノズルよりガスが噴出され、溶融した金属を吹き飛ばす。トーチを適切な速度で一方向に移動させると切断溝が形成され、切断が行われるものである。

しかし、グリーンハウス内の飛散挙動を解析する場合、溶融・蒸発現象まで解析対象とすることは困難である。そこで、JPDR 解体実地試験およびエアロゾル粒子飛散挙動試験より得られるエアロゾル粒子の性状及び放出挙動関連データより、エアロゾル粒子の発生条件（初期流速、粒子径等）を入力することとした。切断開始前より既に存在する吸排気による流動に加え、高温ガス供給によって生じる上昇流の混在する流れ場におけるエアロゾル粒子の運動を解く。

数値解析には 3 次元熱流動解析コード FLOW3D を使用した。本コードは、基礎方程式の差分化に SOLA 法を採用している。連続の式、運動量方程式、エネルギー保存式、圧縮流体を取り扱うための状態方程式及び以下に示す質量粒子運動方程式を解いた。

$$\frac{du_p}{dt} = g - \frac{1}{\rho} \nabla P + K_1(u - u'_p) + K_2(u - u'_p)|u - u'_p| \quad (1)$$

$$u'_p = u_p + u_{dif} \quad (2)$$

乱流モデルは、 k - ε モデル改良型の RNG モデル

Fig. 2 Arrangement of Thermo Couples

を使用した。

4.1 切断模擬のための仮定

本解析で対象とする基本的体系は、既に Fig.1 で示したそれと同様とした。グリーンハウスには排気口、吸気口を設け、切断架台の上に被切断物を配置している。切断トーチの初期位置は被切断物の右側上部である。切断トーチはこの位置から下方向へ移動していく。切断を模擬するにあたり以下の仮定を設けた。

- 被切断物の熱的挙動（熱伝導・溶融等）を無視する。
- 輻射伝熱・壁との対流伝熱を無視する。
- エアロゾル粒子のミクロ的現象（例えば凝集）については取り扱わず、質量粒子として運動方程式にのみ支配される。
- グリーンハウス内壁との衝突の際には壁へは吸着せず衝突・反射として扱う。

4.2 切断とエアロゾル粒子発生モデル化

排気によって形成される流れが定常になった後、時刻 $t=t_0$ に切断トーチ先端ノズルからプラズマアークを被切断物に向けて噴出させ、切断を開始するものとした。切断を模擬するために、Fig.3 に示すように被切断物の分割を行った。切断セルは y 方向に 1 層とし、 x 方向、 z 方向の

Fig. 3 Cutting Model

矩形領域として2次元的に取り扱う。切断終了時刻は $t_0 + l_z/a$ と表され、また、 δx_i , δz_k は被切断物の厚さ l_x , 高さ l_z と次式で関係づけられる。

$$\sum_{i=1}^{i_1} \delta x_i = l_x, \quad \sum_{k=1}^{k_1} \delta z_k = l_z \quad (3)$$

時刻 t_0 に切断トーチに向かい合う被切断物切断溝の (i_2, k_2) セルをすでに熔融吹き飛ばされたものとして消去する。同時に、同セル内にエアロゾル粒子発生点を乱数計算によって設定し、セル内で発生するエアロゾル粒子の発生が終了する時刻まで等時間間隔で1粒子ずつ放出する。

次に、時刻 $t_0 + \delta z_{k_2}/a$ には、切断トーチは $(k_2 - 1)$ に垂直に向かい合う点まで平行移動し、 $(k_2 - 1, i_2)$ が消去される。被切断物上の任意のセル (ii, kk) が消去される時刻は次式で表される。

$$t = t_0 + \sum_{k=kk+1}^{k_2} \delta z_k / a + \delta z_{kk} \left(\sum_{i=ii}^{i_2} \delta x_i - \delta x_{ii} \right) / a l_x \quad (4)$$

4.3 解析条件

解析体系は実験と同様で、 $2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$ のグリーンハウス内においてプラズマアーク切断を行うものとする。メッシュ数の制限からプラズマトーチ出口径を大きくし、出口流速を下げ単位時間あたりの投入エネルギー量を等しくした。グリーンハウス排気量は $3.6\text{m}^3/\text{min}$ 、切断速度は

0.3cm/sec 、吸排気口面積はともに $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ とした。発生する粒子径を $1\mu\text{m}$ とした。

5. 解析及び実験結果

5.1 切断前の定常状態

Fig.4 に解析から得られた切断前の定常状態における流速ベクトル図を示す。グリーンハウス前面より 0.8m の断面である。床及び左壁に沿って流速が速く、切断部周辺には速い流れが存在しなかった。左上の天井部近傍に大規模な渦が形成された。

次に、実験から得られた定常状態における一連のトレーサの可視化画像を Fig.5 に示す。

Fig. 4 Flow Vectors in Steady State

Fig. 5 Tracer Behaviors in Steady State

吸気口からトレーサーを開始した時点から 10, 15, 25 秒後のトレーサー挙動を示している。吸気口から流入したトレーサーは床面に沿って左壁面に到達した後、壁面に沿って天井部へ上昇した。その後天井に沿って右壁面へ向かうが、矢印で示した部分に形成されている渦に取り込まれ、粒子群の移動速度は小さくなった。

左壁沿い及び天井を右方向へ移動する粒子群速度、渦の形成される位置等についても解析結果と一致し、定常状態で解析に問題のないことが確認された。

5.2 切断開始後のエアロゾル粒子の飛散挙動

Fig.6 に解析で得られた切断開始後の一連のエアロゾル粒子飛散挙動を示す。切断部より発生するエアロゾル粒子は、すぐさま上昇し直接天井部へ達した。その後天井に沿って主に右側及び前方の壁に向かって飛散し、18sec では多くの粒子が右側の壁に沿って下降した。

Fig.7 に同じく解析で得られた切断時間 20 秒、切断終了 5 秒後の温度及び流速ベクトル分布図を示す。グリーンハウス前面より 0.8m の断面である。高温のガスが切断部から供給され、上昇流が形成された後、ガスの供給が終了するが、この時点では上昇流が残存している。

同時刻、同断面において実験で得られたグリーンハウス内の可視化画像を Fig. 8 に示す。切断終了 10 秒前にトレーサーを導入した。写真中矢印で示すように、周囲のトレーサー濃度に比べ濃度の薄い領域が観察された。この時点では

高温ガスの供給は終了しているが、それまで形成されていた上昇流の形跡と考えられる。解析結果と比較すると上昇流の形状及び位置が非常に類似しており、切断によって生じる上昇流及びエアロゾル粒子の飛散挙動が解析によって評価できるものと考えられる。

さらに、実験で測定された 120 秒間切断時の温度変化を Fig.9 に示す。切断開始直後に天井部左壁周辺が上昇し、最高温度部は天井部に沿って奥面へ移動した。その後右壁に向かって最高温度部が移動し、切断終了直前に最高で 335K に達した。解析結果で得られた温度分布を同時刻、同位置で比較すると、高温ガスが噴出される側の切断部周辺では解析の方がわずかに高い傾向を示していたが、その他では大きな相違は見られなかった。

以上のように、単純な体系においては、高温の上昇流が全体の流れを支配する体系であっても、エアロゾル粒子の飛散挙動解析が十分な精度で可能であることが確認された。

機械的切断を模擬して解析を行った場合の切断開始 60 秒後のエアロゾル粒子の飛散挙動を Fig.10 に示す。熱の供給がないため上昇流の形成は存在せず、エアロゾル粒子は切断部近傍に比較的速い流れがないため切断部から徐々に周辺へ拡散する飛散挙動を示した。

5.3 作業環境中の空气中放射能濃度変化の評価

内部被ばくは、放射性エアロゾル粒子の体内摂取量として、空气中放射能濃度、作業員呼吸

Fig. 6 Diffusion Behavior of aerosols in cutting of plasma arc

Fig. 7 Flow Vectors and Temperature Distribution

量、防護具の防護係数等によって評価される。呼吸量、防護係数についてはほぼ一定と見なし、空气中放射能濃度を主要パラメータとし、時間的及び空間的に評価することが必要である。本検討では、エアロゾル粒子の飛散挙動に基づいた空气中放射能濃度の評価を行った。カーフ幅 1cm、飛散率 10^{-3} 、比放射能 $1.25 \times 10^5 \text{Bq/g}$ としてエアロゾル粒子の分布から求めたグリーンハウスの空气中放射能濃度の時間変化を Fig.11 に示す。濃度による領域は、外部被ばくを無視し、 ^{60}Co 単独核種が飛散したと仮定したとき、作業員の呼吸する空気を許容量以下にするための装備を示している。グリーンハウス中の平均の空气中放射能濃度は、粒子群の先端が排気口に達した時刻で上昇率が鈍るものの、切断終了時までほぼ一定に上昇し、切断終了時に最高値の $0.95 \times 10^{-3} \text{Bq/cm}^3$ に達した。空間分布については、Fig.6 に示したようにエアロゾル粒子は局所的に高濃度で分布する傾向にあり、排気口付近において短時間ではあるが最高平均濃度の 3 倍程度の高い値を示した。

同様に機械的切断時についても評価を行ったが、切断速度及び飛散率が 1/10、さらに切断溝幅が小さいことから単位時間あたりの放出量が少なく、グリーンハウス内の空气中放射能濃度は切断作業中 $1.0 \times 10^{-4} \text{Bq/cm}^3$ を超えることはなく、切断方法の違いにより切断中及び直後の空气中放射能濃度は大きく異なることも示された。

Fig. 8 Tracer Behavior after Cutting

切断作業を行うにあたり、このような飛散挙動の解析を行い、切断対象物に対してより適切な切断方法を選択するとともに、作業員の配置や切断時間の設定により、より安全で効率的な解体作業が実現される。

現在、切断作業を効率的かつ安全に進めるために、局所排気装置の配置やそれを含んだグリーンハウスの設計の最適化に対しても寄与できると考えられ、検討を進めている。

6. まとめ

プラズマアークで切断する際に発生するエアロゾル粒子の飛散挙動を数値解析によって評価した。また、解析結果の検証のため、流れの可視化等の実験を行い、飛散挙動を観察した。両

Fig. 9 Temperature Change in Transition

Fig. 10 Aerosol Behavior in mechanical cutting

者の結果はほぼ一致しており、エアロゾル粒子の飛散挙動の解析が十分に可能であることが確認された。

現在、切断作業だけでなく、コンクリートの爆破・破碎作業等解体にかかる全作業に対して解析できるよう作業を進めている。数値解析を利用して、単に解体作業の安全性評価にとどまらず、解体作業を効率的に進めるために積極的に活用する予定である。さらに、通常作業時だけでなく、グリーンハウスの破損等の想定事故に対しても検討を行い、解体作業全般にわたって安全性を評価する手法を確立していきたい。

7. おわりに

本研究は科学技術庁の委託により行われた研究成果の一部である。

Nomenclature

K_1, K_2 : drag coefficients

Fig. 11 Radioactive Concentration in air

P	: pressure
a	: cutting speed
g	: gravity
t_0	: time for start of cutting
u	: fluid velocity
u_{dif}	: particle diffusion velocity
u_p	: particle velocity
ρ	: particle density

参考文献

- [1] 宮坂靖彦他、日本原子力学会誌、Vol38, No.7, (1996).
- [2] 佐藤忠通、日本原子力学会誌、Vol.40, No.11, (1998).
- [3] Shimada et al., Proc. of Spectrum '98, Vol. 1, 227-232, Denver, (1998).
- [4] Shimada et al., Proc. of 7th International Conference of Nuclear Engineering, Tokyo, (1999).
- [5] J. Onodera et al., J. Aerosol Sci., Vol. 22, Suppl. 1, S747-S750, (1991).