

ある半導体工場の火災リスク評価と リスク低減対策に関する研究

- 早期火災検知・初期消火システムの提案と開発 -

A Study on Fire Risk Assessment and an Approach to Fire Hazard Reduction for a Semi-Conductor Factory

- Research & Development of Early Stage Fire Detection and Suppression System -

赤津 薫 (K110602)

Kaoru Akatsu (K110602)

1. 研究の背景及び目的

最近の工場は、生産設備や形態の多様化、高度化が進み、潜在的あるいは顕在的な火災リスクも多様化していると考えられる。一方、従来、消防法や建築基準法による防火対策は用途や規模等に応じて一律的な規制になっており、必ずしも個々の施設の多様な形態や火災リスクの実態に対応していない場合がある。また、工場主によっては、仮に火災の発生確率が低くても、万一火災が発生した場合における巨大損害の発生、サプライチェーンの破綻、あるいは信用の失墜などを懸念して、法規で求められる以上の防火対策の必要を感じている場合もある。

本研究は、過去に火災事故を経験したある半導体工場を対象として、こうしたニーズに応えるために、工場の火災リスクの評価を行い、その実態に対応したリスク低減対策として、火災の早期検知・初期消火システムを提案、構築して、その検証実験を行ったものである。本報告ではその概要について述べる。

2. 半導体工場の火災リスク評価

本章では、工場の実態にあった火災リスクの同定と評価を行なう上で、海外の主な火災リスクアセスメント手法事例として、英国と米国の工場に対する火災リスク評価手法について調べたので、その概要を紹介する。また、国内の手法に関しては「日本損害保険協会の調査研究例」¹⁾を調査したがここでは割愛する。

2. 1 海外における火災リスクアセスメント手法の例

英国は環境労働省が政府指針の一つとして「火災安全リスク評価」²⁾を発行し、全ての建物所有者に対して使用開始前に火災リスク評価を行い提出することを義務づけている。

その内容は第1部と第2部に分かれており、第1部は(1)火災危険箇所の特定、(2)リスクに曝される人物の特定、(3)リスクの評定・リスクの除去・リスクの低減及びリスクからの防御、(4)記録・計画・情報伝達・指導及び訓練、(5)定期的見直しの実施

方法、について説明している。また、第2部は、次のような構成となっていて、全ての項目に対して火災リスク評価と火災予防対策について更に詳細な情報を掲載している。

- (1)各種の火災リスク及び予防対策
- (2)火災の検出と警報システム
- (3)消防用設備及び諸施設
- (4)避難経路
- (5)緊急避難用照明
- (6)標識と掲示物
- (7)記録、計画、情報伝達、指導及び訓練
- (8)防火装置の品質保証と設置

本指針は、イングランドとウェールズにおける工場及び倉庫の従業員、経営者、占有者及び所有者が火災安全の法律をいかに遵守するか、火災リスク評価をいかに実施するか、および所定の場所に設置すべき全般的な火災予防対策をどのように特定するかについて説明をしたものである。そして本指針の主要目的は火災の発生を防止すること、および出火した場合に人命の安全を確保することにある。

一方、米国の防火技術者協会は「防火設計リスク評価を適用するに際してのSFPE技術指針」³⁾を発行しており、調査した結果、本指針は15の章と2編の付録で構成されている。本指針の目的は、建物の火災安全設計/評価においてリスク評価手法を適用する際の指針を提示することを目的としている。

ここでは紙幅の制約上、リスク評価に用いるリスクの測定基準及び許容基準をどのように選択するかについて説明する。まず、指針では、次の5つの戦略的目標を提案している。①人命の安全、②財産保護、③事業活動の継続性、④環境保護、および⑤文化遺産の保全である。本指針で定義される評価プロセスには、諸処のリスクを許容レベルに低減するまで設計を修正するための諸段階を含み、リスクが許容しきい値未満まで低下することを確認する段階をも含んでいる。また、火災シナリオの作成のため、どのように火災の危険を特定し、特性づけるかを述

べている。更に発生頻度解析の手順や結果解析を行う手順を示し、火災シナリオの帰結を評価し、定量化するための方法を示している。最後にリスク評価のプロセス、決定事項及び結果を文書化する方法について述べている。それは全ての利害関係者にリスクの解析の範囲、方法、限界、および結論を確実に理解させることが必要なためである。

2.2 火災統計からみた工場の火災リスク

一般に工場の中はかなりの可燃物量があり、設備には、ガス、蒸気、薬品、油類の流れる配管及び電気部品等が至る所に存在している。しかし、その中では規則に従った管理による作業が行われており、表1に示す半導体工場に類する建物の火災統計データからも分かるように、頻繁に火災が発生しているわけではないが、生産工程に欠かせない可燃性溶剤を使用しているため、何かの要因で火災が発生した場合には大火災に発展する危険性がある。火災の要因には種々あるが、その一つとして有機溶剤の流動に伴って生産設備や容器に静電気が帯電し、それが放電して点火源となる場合が考えられる。

紙幅の制約上統計データ表は割愛したが、出火時刻は通常の作業時間帯が58%を占めており、作業中の機械の故障か人為的なミスが火災の原因ではないかと推定される。出火原因は電気的な原因が38%強、化学的な原因が14%あり、電気関係の内訳としては、主に電源の短絡、過電流、静電スパーク、絶縁劣化等があり、設備や機械のメンテナンスが重要であることが伺えた。また、着火物としては、第一石油類が25%を占め、アルコール類、第三石油類、第四石油類と続いており、引火性の高い可燃性液体が着火源となっていた。

表1 半導体工場における火災件数

発生年	発生件数	発生年	発生件数
2001	3	2006	5
2002	2	2007	9
2003	0	2008	6
2004	7	2009	8
2005	9		
総件数	49	年平均	5.4

表2 2001年～2009年の損害額合計と内訳

合計 (千円)	建物への損害		収容物への損害	
	額(千円)	割合(%)	額(千円)	割合(%)
405,235	11,093	2.74%	389,488	96.11%

上記の表2は2001年～2009年までの損害額合計と内訳である。建物が耐火構造になっているためか、建物自体の損害額は小さいが、工場内の生産設備や収容物は高価になっていることもあり損害額が甚大であることがわかる。

2.3 ある半導体工場の現状と火災リスクの把握

半導体工場は非常に近代的な工場であるが、消防法に則った消防用設備が設置してあっても、なお火災リスクは多岐に亘って存在するものと考えられる。例えば、対象としたある半導体工場では、消防法に則った消防用設備（自動火災報知設備、FM200ガス消火設備、粉末消火設備、屋内消火栓、各種消火器等）を設置していたにもかかわらず、過去に火災が発生した時に有効な消火活動ができなかったという経験をしている。工場内の問題として、次のような点があげられる。

- ①工場内では生産工程に欠かせない危険な可燃性溶剤のトルエンとエキネンを使用している。
- ②作業員がトルエンとエキネンを容器に投入する作業や通路を運搬するという人的作業がある。
- ③工場内は防爆エリアでクリーンルームとして厳しく管理され火気厳禁であるが、それでも静電気が発生する可能性がある。
- ④施設や設備の保守点検や改修工事は半ば日常的に行われている。特にメンテナンス時にはさまざまな業種の作業員が多数入る場合がある。

図1は、初期消火設備の設置検討を行なった半導体工場内の一部を示している。本研究では、この範囲内で火災リスクの同定と評価を行なった。その結果、図1の斜線部分で示される矩形は、「防爆エリア」でかつ「作業員による作業実施場所」及び「可燃性溶剤滞留場所」の三条件が重なって存在するエリアを示し、初期消火のターゲットである出火危険の高い特別危険エリアと特定した範囲である。

凡 例	
	防爆エリア（第1種危険場所）：全域消火設備（FM200ガス消火、粉末消火設備など）で防護
	人による作業実施場所：可燃性溶剤が露出する可能性が高い場所
	可燃性溶剤滞留場所：可燃性溶剤充填容器の搬送ルートおよび滞留場所
	上記の3条件が重なって存在する場所

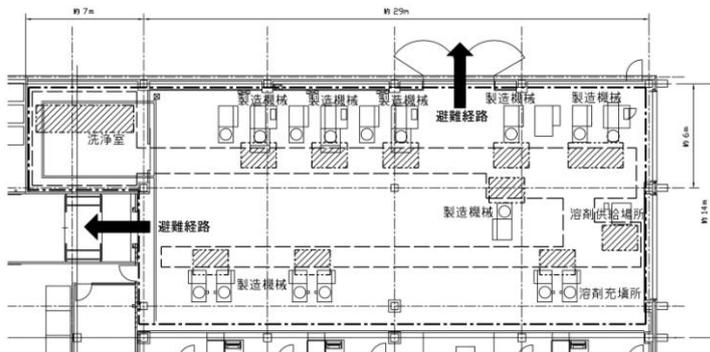


図1 ある半導体工場内の概要図面

2.4 火災リスク低減対策の提案

作業員の手動操作を要する製造工程においては、ヒューマンエラーが発生する可能性があり、実際に「可燃性溶剤の入った容器の転倒により静電気が発

生して引火」、「本来行うべき静電気防止対策の未実施により静電気が発生して引火する」などの事象が報告されている。従ってソフト面とハード面の両方の対策が改めて必要であると考え。

(1) ソフト面

ソフト面については、管理者及び従業員の教育が最も重要である。このソフト面は外部からの調査では分かりにくい。その一例を挙げると、注意を喚起する標識や設備及び機器の操作方法が全て日本語で記載されているため、日本人のみが作業に従事していると思われがちだが、実際は外国人労働者を起用している実態が多い点がある。従って実態に即した教育が求められる。

(2) ハード面

運転中の誤操作や不注意による事故を防止するために、フェールセーフ、フールプルーフ、冗長性の対策を講ずるなど施設や設備面で、ヒューマンエラーを防止する対策を行う必要があると同時に、工場内には消防法で要求されている消防用設備だけではなく、火災の発生が予測できる危険な場所に対して、初期火災の段階で消火薬剤を火災源のピンポイントに集中放出をする特殊な消火設備によって、可能な限り短時間で初期消火を行い、火災の被害を拡大させないようにする対策を付加することが効果的であると考えられる。

3 可燃性溶剤の特性と出火危険性

この半導体工場では、製造過程の溶剤として主にトルエンとエキネンを使用しており、引火性の高いこれらの溶剤が着火源になることが容易に想定できる。そのため、火災の原因となりうるトルエンとエキネンの着火性や発熱速度と総発熱量の性状を把握するための燃焼実験を行った。

表2、図2、図3は、その結果を示したものであり、トルエン、エキネンともに着火と同時に激しく燃焼し、発熱速度も急激に上昇することがわかった。

表2 トルエンとエキネンの燃焼特性測定結果

試験材料	初期重量 (2L) [kg]	最大発熱速度 [kW]	総発熱量 [MJ]	単位面積当たりの 最大発熱速度 [kW/m ²]	単位重量当たりの 発熱量 [MJ/kg]
トルオール(1)	1.71	237.8	48.2	951.2	28.2
トルオール(2)	1.71	236.8	48.8	947.2	28.5
トルオール平均	1.71	237.3	48.5	949.2	28.4
エキネン(1)	1.57	167.2	40	668.8	25.5
エキネン(2)	1.53	165.2	39	660.8	25.5
エキネン平均	1.55	166.2	39.5	664.8	25.5

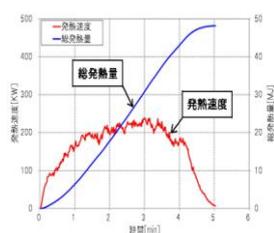


図2 トルエン測定結果

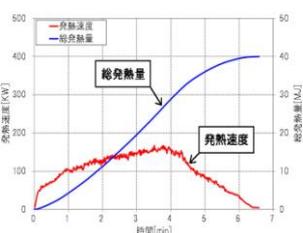


図3 エキネン測定結果

4. 早期発見・初期消火設備について

対象とした半導体工場では、多くの個所が防爆エリアであると同時にクリーンルームとして管理されていることから、特に粉末消火剤を放出すると消火薬剤が広い範囲に散乱し、工場の生産設備を復旧する場合に多大の時間と費用を要する。また、全域放出のガス消火設備の場合であっても、可燃性溶剤が発火した場合は広い工場内では消火までかなりの時間がかかることから、粉末消火設備と同様に全域放出を躊躇する傾向がある。このことが、こうした半導体工場で、火災の発生危険性の高いエリアを特定して、火災発生直後に初期消火を行うスポット型泡消火設備を必要とする理由である。

4. 1 スポット型泡消火設備の必要性

可燃性液体のトルエンとエキネンが着火源となった場合、着火と同時に激しく燃え上がり、特にトルエンは大量の黒煙が急速に発生し、視界が極端に悪くなる。従って、火災を如何に早く検知することができるかが非常に重要な要素である。

火災感知器には煙感知器、熱感知器、紫外線感知器、赤外線感知器など各種の火災感知器があるが、火災感知器を設置する場所が防爆エリアになると通常の火災感知器では検知が遅く、火災規模を拡大させる恐れがある。従って、火災感知器の選定が非常に限られてくるが、適切に防爆エリアで使用可能で非火災報が少なく検知時間が短い火災検出装置を特定することが求められる。

消火装置については、一般の駐車場に設置している泡消火設備では、火勢の強さに負けて泡が火皿に十分入らず消火ができないことがわかった。また、既存の市販のノズルを利用して消火実験を行ったが、期待する消火効果が得られなかったため、本半導体工場に適するノズルを試作することにした。火災としては、直径0.5mの溶剤攪拌機からの火災を想定した。さらに、万一床面にこぼれた場合を想定して、4m²のエリアも瞬時に消火ができるシステムを構築することを意図した。

求められるのは、火災が発生したときに、火災区域を瞬時に感知して、火災区画とその周辺のみならず消火薬剤を集中して放出することで、少量の消火薬剤で一気に消火をすることができる装置である。そこで、本研究では、早期火災感知システムと連動したスポット型の泡消火装置を試作して、検証実験を行った。

4. 2 火災感知器について

消防法で規定されている第三種火災感知器では、火災を検知し発報するまでのレスポンスタイムが遅く、引火性の高い可燃物は燃焼速度が速いため、火災が大きく成長してしまう。種々の試行実験を行った結果、非火災報が少ない三波長式赤外線炎感知器の火災の応答時間を3秒程度に調整して、絶縁バリア（接地点間の電位差によるスパークを防止する部品）を介して防爆エリアに設置可能とした。

4. 3 消火装置について

水は冷却効果が大きいため、火災を最も有効に消火するものである。しかし、可燃性液体のトルエンとエキネンは比重がトルエンは0.87、エキネンが0.8と小さいため、水では液体可燃物の下に沈んでしまい冷却効果を十分に発揮することができない。

また一般の泡消火設備は、水に泡消火薬剤と空気を有効に混合して泡を発生し、液体可燃物の上に散布してそれから可燃性蒸気が発生することを抑える窒息消火をさせるものであるが、トルエンとエキネンの火勢に負けて消火ができなかった。そこで、火勢に負けない泡消火剤の放出を考えた。また、工場内の消火装置の設置スペースが小さいため、消火剤容器を50リットル以下の大きさに限定した試作品を製作した。以下では「スポット型泡消火装置」と呼ぶ。

4. 5 実験の結果

スポット型泡消火装置では、泡放出口として試作ノズルと検定品泡ヘッドの2種類を使用してトルエンとエキネンの消火実験を行った。

試作ノズルでは泡放出後6秒で完全に消火を確認することができた。下記の図4はエキネンを4リットル燃焼させ、2種類のノズルで消火をした時の比較である。

検定品の泡ヘッドで泡放出を行なったが、6秒後でもエキネンはまだ燃焼が続いていたのに対して、試作したノズルでは、一気に液体可燃物を覆いこみ、吹き消し効果との相乗効果による消火に成功し、6秒後には火災は鎮火し、その消火性能が検証された。

5. 研究のまとめと今後の課題

火災は初期対応の遅れが被害を拡大させることから可燃性物質の現場への持ち込み量の最小化を行い、ヒューマンエラーを無くす努力（火災の発生防止）をすることが重要であると考えられる。

また、火災発生時の影響を最小限に抑えるためには、初期消火のニーズが高いことも事実である。

前者は、日常的な工場管理によって達成される。後者は、消防法規等の遵守はもちろんであるが、現場の実態に則したレベルでハード面での独自の防災対策も進めないと火災事故を劇的に減少することは難しいと考える。

消防法による消防用設備は防火対象物に対する最低限の規制要求であるから、企業財産を守る観点からは、個々の施設の火災リスクの実態に応じて消防法以上の消火設備を検討する必要があると考える。

筆者の研究および火災実験はまだ道半ばであり、消火の迅速化、確実性を高め、さらに対象とした半導体工場に必要とされる初期消火設備の性能を検討し、試作と検証実験を重ね、研究開発を行なっていきたいと考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたり、関澤愛教授には熱心なご指導を頂きました。トルエンとエキネンの発熱速度等の測定実験は松山賢准教授に多大なご協力を頂きました。また、辻本誠教授からは貴重な資料を頂き、大変参考になりました。工場火災のデータ作成では山村太一院生の協力を得ました。ここに記して厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 「工場防火に関する調査・研究報告書」2001年4月（社）日本損害保険協会発行
- 2) Fire Safety Risk Assessment issued by HM Government, UK
- 3) SFPE Engineering Guide to Application of Risk Assessment in Fire Protection Design, USA



試作ノズルで泡放出2秒後



泡放出6秒後に鎮火



検定品泡ヘッドで泡放出2秒後



泡放出6秒後でなお燃焼中

図4 試作ノズルと検定品泡ヘッドの消火の比較