

## 学位論文及び審査結果の要旨

横浜国立大学

氏名	水田有人
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	環情博甲第516号
学位授与年月日	令和4年3月24日
学位授与の根拠	学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号)第4条第1項及び横浜国立大学学位規則第5条第1項
学府・専攻名	環境情報学府 人工環境専攻
学位論文題目	化学プラント発災時における緊急対策に関する研究
論文審査委員	主査 横浜国立大学 教授 三宅淳巳 横浜国立大学 教授 大矢 勝 横浜国立大学 教授 澁谷忠弘 横浜国立大学 准教授 伊里友一朗 横浜国立大学 客員教授 野口和彦

## 論文及び審査結果の要旨

化学プラントにおいて持続的な製造活動を維持するためには、安定した製造プロセスの構築技術だけでなく、プロセス異常に適切に対応可能な安全技術が必要である。化学産業ではこれまで多くの爆発や火災といった事故を経験しており、様々な安全工学的な研究によりプロセスの安全性を向上させて来たが、化学物質を取り扱っている限りリスク源はそこに存在し、事故は決してなくなることはないことを念頭に置き、各プラントの特性に応じたリスク評価ならびにリスク管理を弛まらずに実施することが必要である。本論文では、第1章において国内外の化学プラントにおけるリスク管理体制の状況や安全工学技術について整理して本研究の目的を述べた上で、第2章～第4章に本研究で実施した技術検討内容を記し、最後に第5章で総括を述べている。

第1章では、化学プラントにおける安全管理の現状と安全工学的研究の取り組みについて纏めた。国内外の安全管理の現状を始めに記したが、国内では未だリスクマネジメントシステムが成熟しているとは言い難く、必要とされる安全管理項目に対して抜けなく取り組み、いずれも高いレベルで活動が維持できているという理想の形には未だ至っていない。リスクマネジメントシステムの管理項目のいくつかは化学プラントのリスク評価により達成されるものがあり、潜在危険性の抽出、事故の発生確率の推算、事故発生時の影響度の推算、許容リスクレベルとの比較という、リスク評価における4つの手順について、各評価手法を概説した。これらの手法を用いて化学プラントのリスクを評価し、許容リスクレベルに達していない場合には、安全対策を講じる必要がある。実際に安全対策を講じる際には、熟評価、プロセスシミュレーション、安全弁設計や影響度評価といった様々な安全工学技術を用いて、有効な安全対策について詳細に検討することが必要である。化学プロセスにおける安全対策を安全防護層という観点で纏めると、安全対策は8つの独立防護層(Independent Protection Layer) IPL1～8に分類することが出来る。化学プラントの実態を重ね合わせてみると、IPL5(物理的防御-安全弁)および8(敷地外緊急時対応)については不十分な点があり、解析手法の改善ならびに新たな技術構築が必要であると考へ、研究課題として設定したことを述べた。

第2章では、プラントの防護対策の1つである安全弁の設計技術に関し、シミュレーション技術の観点から、技術向上を図るための研究を行った成果について記した。化学プラントでは、プロセスの不調により機器内で圧力上昇が生じる可能性があり、機器の破損を防止するために安全弁が設置されているが、反応暴走による圧力上昇は予測が難しく、対応出来ない設計となっているものが多くあるという実態がある。これに対し、反応暴走に対応可能な安全弁口径推算の手法として、2010年にISO 4126-10が発行され、国内でもISOを和訳した形でJISが発行されたが、ISO法に従って安全弁の必要口径を推算した場合に、反応器の径より大きな口径が必要であるという結果が得られることがあり、実機への適用が困難となるケースがあるという問題点がある。これは、解析をより簡便にするために、保守的な前提条件を用いた解析方法を採用していることが原因である。従って、本研究では、実機へ適用可能な安全弁の口径を推算することを目的として、反応暴走時の機器内の質量やエネルギーの保存則を解き、また

各化学種の物性を適切に反映させた詳細なシミュレーションモデルを構築した。その結果、ISO法で推算した口径よりも小さく、実用的な口径を算出可能であることを示した。本シミュレーションによる結果の妥当性については、第3章の検証実験にて確認を行った。また、本シミュレーションでは安全弁の口径を設計するだけでなく、実際のプロセス機器に接続している排ガスライン等の開放部の影響を考慮した系や、溶媒濃度を变化させた系などのケーススタディーを実施することで、反応暴走が発生しても機器破損に至らない様なプロセス設計を提案することも可能であり、技術的な適用範囲が広い技術を構築することが出来た。

第3章では、第2章の詳細シミュレーションの検証実験、ならびに暴走挙動における温度、圧力上昇の状況の把握や可視化を目的とした実験技術に関する研究成果について記した。本研究では、40mLスケールという小規模の実験装置に直接、安全弁を設置するという、これまで為されて来なかった実験装置を製作し、技術構築を行った。小規模での検証実験は、実験実施の容易性やコストの面で非常に有用である。但し、規模が小さいと断熱暴走を発生させるための試料容器や断熱制御システムの製作が難しく、また容器破裂や可燃性ガスが発生した場合の防護対策についても重要である。これらの各技術課題に対し、自作で各装置を製作することでアプローチを行い、危険な暴走実験を安全に実施可能な実験装置を開発した。実験結果は、第2章のシミュレーション結果と良く一致する結果を得ることが出来、詳細シミュレーションの結果を検証することが出来た。また、ISOや詳細シミュレーションの様な複雑な推算手法を用いずとも、本実験装置により直接的に必要な口径を推算可能であることも非常に有用な点である。更に、本実験装置はサンプル容器として耐圧ガラスを使用しており、暴走挙動の可視化が可能である。反応暴走中の温度における非凝縮性ガスの発生や液体の沸騰の様子を観測することが出来、また気液二相流が発生した場合の容器内の様子を観測することで、第2章で使用している均質流モデルを使用することの妥当性などを確認することが出来た。

第4章では、安全防護層において、最終的な被害低減対策として重要な項目である緊急避難に関する研究成果について記した。第3章では、安全弁によりプロセス機器の破裂を防護することで工場内の設備や従業員を守ることが主な目的であったが、第4章の毒性物質の拡散における影響は工場外へも及ぶ可能性があるため、工場外の近隣企業ならびに近隣住民を守ることが主たる対象となる。以前より、化学プラントでは、漏洩や爆発が発生した際の周囲への被害を予測するために影響度解析が実施されており、米国では環境保護庁（EPA）が、また英国では英国安全衛生庁（HSE）が重大事故防止のための規制を出している。日本国内においても消防庁が発行しているガイドラインに影響度解析の方法が記載されているが、一方でこれらの解析結果が緊急時対応に結び付けられている事例はほとんどない。米国のPSM規則や欧州のセベソ指令においても、近隣住民を含めた緊急時対応について項目として織り込まれているが、実際にどのような手法で行われるかということは、情報や論文としてもあまり公表されていない。そこで、本研究では、毒性物質が漏洩したことを想定した緊急避難支援システムの構築検討を行い、迅速かつ円滑な緊急避難の実行を実現するため、誰でも容易に使用が可能で、同様の結果を得ることが出来る様な拡散範囲予測システムを構築した。拡散範囲を予測するための計算モデルは、容易に操作できるように風速や大気安定度をインターネットで自動取得出来るように作りこみ、インプットパラメータを漏洩速度のみとした。また、3時間後までの大気条件を予測して拡散範囲を事前に推算する機能を追加したことにより、大気条件の経時変化に伴う避難範囲の変化へ柔軟に対応し、円滑な緊急避難を可能とすることが期待される。

第5章では、第4章までの研究成果を総括した。化学プラントの安全に関して管理すべき項目は、PSM規則のエレメントのように様々な項目があり、各エレメントを継続的に高いレベルで維持し続けることが安全性を保つために必要であると考えられる。但し、その様な取り組みを継続できていたとしても、事故を完全になくすことは容易でない。そのため、いかなる事象が発生した場合でも、安全防護層の考え方で、未然防止対策ならびに事後対策という防護層を張り巡らせ、事故に至る可能性を少しでも低減することが有効である。本研究では、安全弁設計技術と緊急避難対策という2つの事後対策に関し、既存の確立された技術を応用した研究を行い、化学プラントの安全性の向上を目指した。両研究共に、社会実装を見据えたケースワークとして取り組み、その有効性について確認することが出来たことから、本研究結果により、広く化学プロセス安全対策の検討へ役立てられることが期待される。

以上の成果は化学産業におけるプロセス開発における安全性評価に大きく貢献するものであり、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと認められ、合格と判定した。

注 論文及び審査結果の要旨欄に不足が生じる場合には、同欄の様式に準じ裏面又は別紙によること。