

平成 2 1 年 6 月 4 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18310052

研究課題名（和文） 化学物質による環境負荷とリスク削減のための  
洗浄プロセス知識基盤の構築研究課題名（英文） Knowledge base of cleaning process to reduce environmental  
loads and risks due to the use of chemicals

研究代表者

平尾 雅彦（HIRAO MASAHIKO）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：80282573

研究成果の概要：化学物質による環境負荷削減・リスク削減に関わる情報を統合した知識基盤を構築することによって、安全なプロセス設計を可能とし、化学物質を利用したプロセスによる環境負荷とリスクの削減を実現する。塩素系溶剤を使用する産業洗浄プロセスを対象として、化学物質の製造や物性などの知識、プロセス装置機器に関わる知識、プロセス装置運転・操作に関わる知識、化学物質の健康影響や環境挙動に関わる知識などをプロセス知識として収集・体系化し、情報基盤として集積し、プロセス設計に結びつける手法を開発した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2007年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2008年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：プロセスシステム工学

科研費の分科・細目：環境学・環境技術・環境材料

キーワード：環境負荷低減技術・化学物質リスク・産業洗浄・知識基盤・リスク削減・アクティビティモデル・数値流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

化学物質は、社会に対して様々な利便を供与すると同時に、製造や使用に伴うリスクを伴う。化学物質のリスクには、温暖化やオゾン層破壊・生態系影響などの地球環境リスク、毒性を持つ物質の曝露にともなう人間健康リスク、可燃性や爆発性などにともなう事故や災害などの安全リスクがある。このような化学物質に関わるリスクを削減することは、化学物質の利用が不可避である現代社会における大きな課題である。特に、安全を求める社会から化学製品および化学物質を利用した製品を製造する産業への要請は強いが、科学的知見が不足し、また、社会が理解する

ための知識も不足している。このような社会や産業からの要請に応えるために、個々の化学物質の排出にともなう地球環境リスク評価、人間健康リスク評価、利用プロセスの安全評価など、多くの学術研究が進められているが、これらの研究によって得られた知識は現状では個別に分散して存在しており、製造者や使用者、そして社会が統合的に活用することは困難である。

さらに、化学物質に関わるリスクの知識は、羅列的に集合させることで活用できるわけではない。将来にわたって化学物質を安全に製造し、使用していくためには、その化学物質が製造されたり、使用されたりする状況、

すなわちプロセスに応じた知識の整理と、その知識を継続的に更新し利用可能な形式で蓄積する情報基盤の構築が課題である。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、化学物質による環境負荷削減・リスク削減に関わる様々な研究領域の成果を統合した知識基盤を構築することによって、社会が求める安全なプロセス設計を可能とし、化学物質を利用したプロセスによる環境負荷とリスクを削減することである。そのために、化学物質の製造や物性などの知識、製造したり利用したりするプロセス装置機器に関わる知識、プロセス装置運転・操作に関わる知識、化学物質の健康影響や環境挙動に関わる知識などをプロセス知識として体系化し、情報基盤として集積し、プロセス設計に結びつける手法を開発する。

## 3. 研究の方法

研究の対象プロセスとしては、製造業で広く実施され、化学物質の使用・排出の多い基礎プロセスである洗浄プロセスを取り上げた。洗浄プロセスに関するプロセス知識としては、洗浄剤として用いられる有機溶剤・界面活性剤などの洗浄性能・物性・毒性・環境影響、洗浄装置の構造や運転、作業者の洗浄操作、廃洗浄剤の回収処理があり、これらの知識が複雑に関連している。本研究では、この複雑な知識の体系化を行う。すなわち、以下のような課題を解決する。

### (1) 洗浄プロセス設計作業のアクティビティモデル化

要素作業間の情報の流れを明確にするために、現場調査及び実務者からのヒアリングを行い、設計作業全体を解析し、洗浄プロセスの設計作業をアクティビティモデルで表現する。これによって、情報基盤が提供すべき機能が明らかになる。

### (2) 要素作業における変数間の関係のモデル化

要素作業ごとに必要となる変数と決定する変数（設計変数）を明示し、この変数間の関係をモデル化する。これによって要素作業で遂行すべき機能が明らかになる。

### (3) 洗浄に関する知識の収集と体系化

洗浄剤という物質知識、洗浄プロセス装置に関する知識、洗浄操作に関する知識、回収と廃液処理に関する知識をプロセス設計のアクティビティモデルの実行に利用できるように調査・収集し、

体系化する。これによって情報基盤から要素作業に提供すべき情報が利用可能となる。

### (4) 化学物質の環境への排出量推定モデル（プロセスモデル）構築

設計作業によって決定された変数から、化学物質の使用量や環境への排出量を推定するモデルを構築する。実装置による実験や数値流体力学シミュレーションを用いる。これによって設計されたプロセスを利用することによる、化学物質使用量・排出量が定量化される。

### (5) 環境・健康・安全リスク評価モデル構築

化学物質の使用量・排出量から、その物質による環境・健康・安全リスクを評価できるモデルを構築する。これによって化学物質排出による環境や人間健康への影響が定量化される。また、使用による安全性が定量化される。

### (6) 情報基盤の設計と実装

構築されたモデルと体系化された知識を実用とするための情報基盤を構築する。要素作業で構成される設計作業全体と情報基盤が提供する情報の関連を明示し、作業毎に適切な情報が提供される。情報基盤の情報には、洗浄剤の物性のような数値データだけではなく、洗浄にかかわる技術、プロセスの変数間の関係を表すモデル、リスクを評価するモデルも含まれる。

## 4. 研究成果

### (1) 洗浄プロセス設計作業のアクティビティモデル化

10カ所以上の現場での実測調査および実務者、洗浄技術専門家へのヒアリングを行った。洗浄プロセスにおける現状の設計作業を解析し、要素作業に分割し、その要素間の情報の流れを IDEF0 アクティビティモデリング手法によって作業モデル化した。

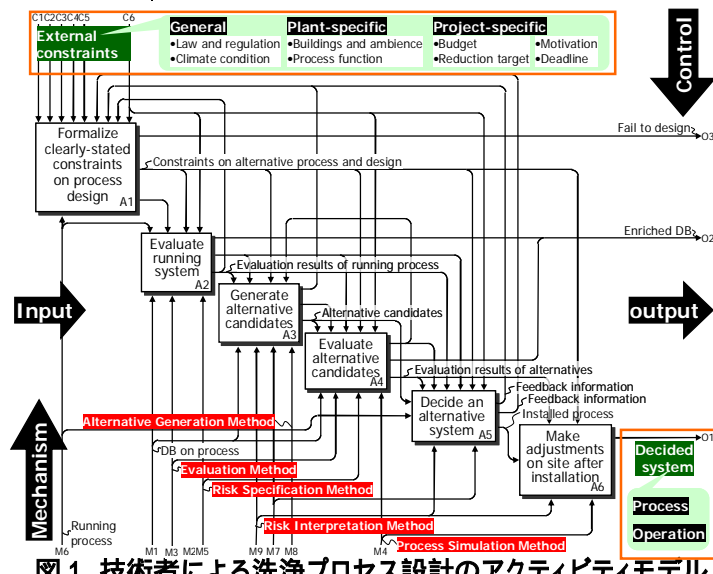


図1 技術者による洗浄プロセス設計のアクティビティモデル

図1に本研究で構築した現場技術者の視点でリスクに基づく洗浄プロセス設計を行うためのアクティビティモデルを示す。このアクティビティモデルを実行可能とするためには、知識・情報基盤として大きく5つの機能が必要であることがわかった。プロセスで評価すべきリスク項目を特定する機能、それら項目を評価する機能、評価結果に基づいて代替案を生成する機能、代替案のプロセスデータをシミュレーションして推算する機能、そして、評価結果を解釈する機能の5つである。

(2) 要素作業における変数間の関係のモデル  
ある作業を行うために他の要素作業から与えられる情報や外部から得られる情報を定義し、次の要素作業に引き渡される情報を決定した。

図2に現行プロセスの評価結果を受けて代替案の生成と評価を実行するための、要素作業とそれを支援する技術データベース・プロセスモデルの間にある情報の流れを概念的に示した。

(3) 洗浄に関する知識の収集と体系化

これまでに開発された洗浄剤、洗浄装置、回収装置、廃液処理装置のデータを集めデータベース化した。日本産業洗浄協議会の協力を得て、昨年度の成果に基づいて実際の企業に於いて削減対策を実施しながら、知識の検証と収集を行った。ヒアリングとしては、金属切削加工やメッキ処理加工、熱処理加工など、多岐に渡る業種を対象とし、それぞれのプロセスで固有の条件を満たしている洗浄プロセスの特徴を整理するとともに、その中で用いられている技術とプロセスの機能の関係を体系的に整理した。

技術データベースとしては、図2に示すように、洗浄剤や装置などの技術情報の他に産業現場で蓄積されている経験則を含めたりレシヨナルデータベースとして構築した。このデータベースにより、現行プロセスの条件に従ってリスク削減のために有効な代替案を生成することができるようになる。同時にこのデータベースは、代替案の評価のために必要となるプロセスモデルに対しても要件を設定するとともにデータを出力できるようになっている。

(4) 化学物質の環境への排出量推定モデル(プロセスモデル)構築

図3に構築した洗浄プロセスモデルの概念図を示す。構築したプロセスモデルではパラメタをデバイス、オペレーション、環境に分割して定義し、それぞれのパラメタと洗浄装置内の物理現象との関係を解析した。

特に3槽開放型洗浄装置を利用し、代表的な装置条件と運転条件による排出量の変化を実測し、気相内の挙動を検討するために、数値流体力学(CFD)シミュレーションを行い、

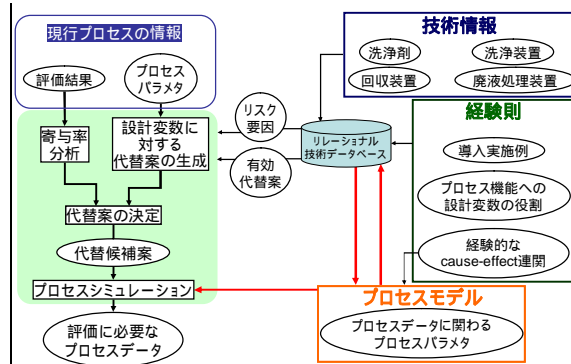


図2 代替案の生成と評価のための技術データベースとプロセスモデル

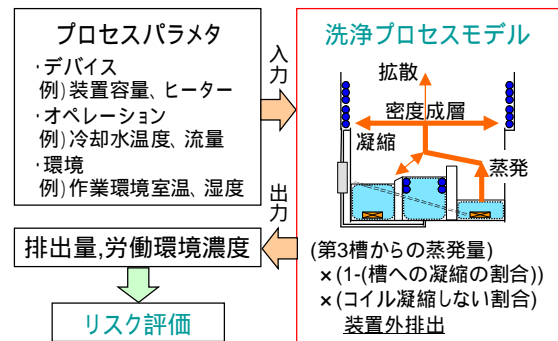
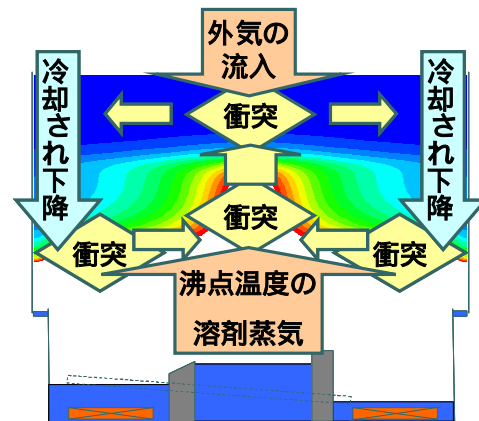
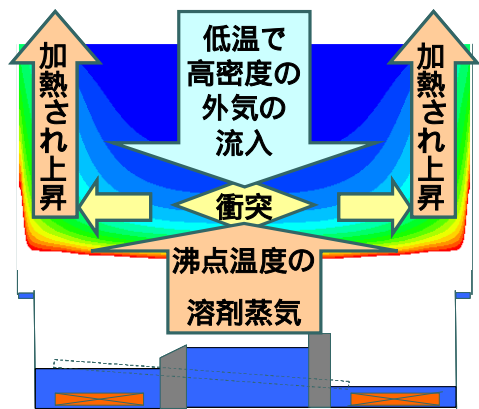


図3 洗浄プロセスモデルの概念図



(a) 室温 > 冷却水温度



(b) 室温 < 冷却水温度

図4 洗浄装置内の数値流体解析(室温と冷却水温度の関係による影響)



冷却水や外気温をパラメタとする排出量推定モデルを構築した。図4にCFD解析結果の例を示す。

図5に図4のCFD解析結果から得た装置内の物理現象モデルに対して工業用洗浄による排出実験の結果を内挿して得られたプロセスモデルの例を示す。これにより、環境パラメタの一つである室温が溶剤排出速度に与える影響を推算することができるようになった。

(5) 環境・健康・安全リスク評価モデル構築

図6にまとめたのは産業プロセスに関わる化学物質リスクである。化学物質を利用するプロセスの設計では、現場で最も大きな懸念項目であるプラント内における健康・安全リスクに加え、地球規模の環境影響を考慮する必要がある。リスクアセスメント(RA)やライフサイクルアセスメント(LCA)でこれらを評価できる。

スイス連邦工科大学グループがこれまでに体系的に整理した評価実施例を参考にし、対象としている化学物質および洗浄プロセスにおいて、これまでに実施したリスク評価のケーススタディを一般化し、統合的にリスク評価を実施し設計に利用するモデルを構築した。意思決定に関わる化学物質リスクを総合的に評価するためのアクティビティモデルの概念図を図7に示す。

(6) 情報基盤の設計と実装

図8にリスクに基づくプロセス設計を支援する情報基盤システム概念図を示す。このシステムはユーザとなる意思決定者から制約条件としてプロセス情報を受け取ると、それに対して代替案をリスク評価結果とともに出力することができるものとなっている。この中で、上述の各モジュールを利用する。

様々なデータとモデルを体系的に蓄積することが可能なデータベースと、そのデータベースから情報を取り出すエンジンについて、(1)のIDEF0モデルに加え、UMLモデルによって概念設計を行った。この設計に基づいて、これまでにデータベース化した様々なデータと構築したモデルから、実際にプロセス設計を支援する情報基盤のプロトタイプを開発し、ワークステーション上に実装した。実務者に試用してもらい、設計に有効であることを確認した。

実際に構築したUMLの例として、LCAの計算に必須となる、現場で入手可能なデータをLCAに必要なデータに変換するための作業について説明する。図9に示すように、現場で入手可能なデータは工場全体で消費したユーティリティや物質量となっている。同時に、電力に関しては個々の装置の定格電力を調査することは可能である。ここから、洗浄プロセス一日あたりの電力やスチームの使用量を計算するために、工場全体の電力のうち

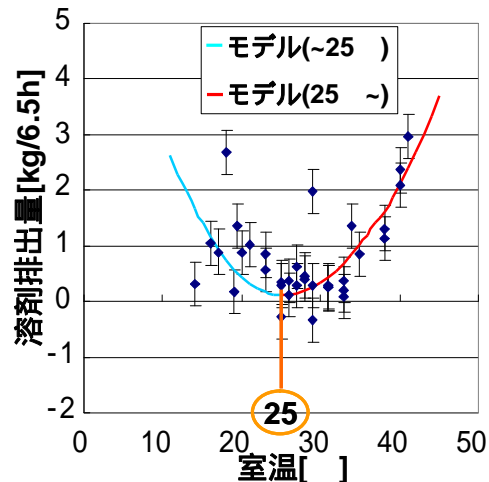


図5 室温に対する溶剤排出速度の変化

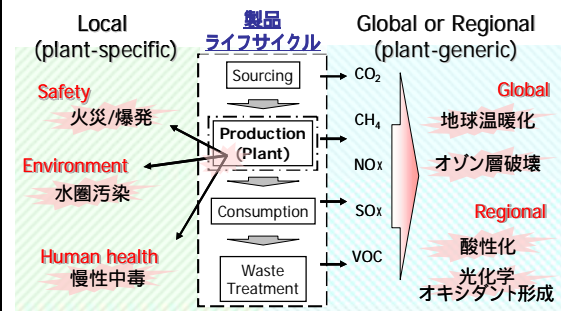


図6 産業プロセスに関わる化学物質リスク

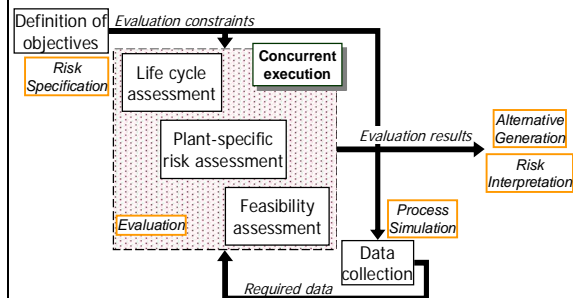


図7 総合的リスク評価のアクティビティ

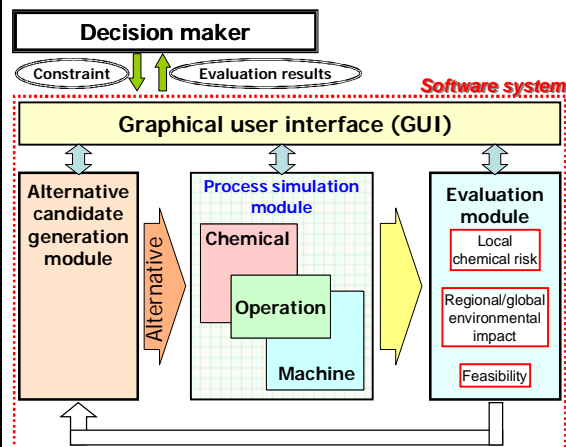


図8 リスクに基づくプロセス設計を支援する情報基盤システム概念図

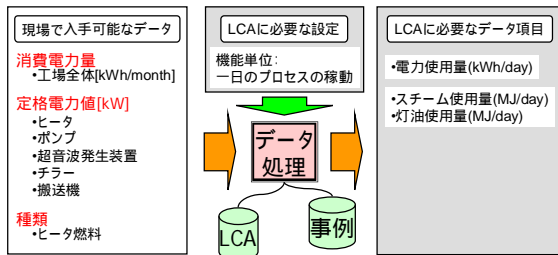


図9 現場で入手可能なデータのLCAに必要なデータへの変換作業

洗浄プロセスがしめる割合などを推算しながら求めていく必要がある。このときのアルゴリズムをUMLを用いて可視化すると、図10のようになる。ここに示したのは、上記のデータ変換の中でエネルギー必要量を計算するための計算シーケンスであり、LCAの計算モジュールがアクターとなって、ユーザインタフェースやデータベースと情報をやりとりしつつ計算を進めている。

この研究成果の一部は、環境省・日本産業洗浄協議会発行「VOC排出削減抑制 産業洗浄における自主的取り組みマニュアル」(2007年)、および「VOC排出抑制 産業洗浄現場におけるVOC対策事例集」(2008年)に収録され、広く事業者配布されリスク削減取り組みに活用されている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計11件)

Y. Kikuchi, M. Hirao, "Local Risks and Global Impacts Considering Plant-Specific Functions and

Constraints: A Case Study of Metal Parts Cleaning", Int. J. Life Cycle Assessment (in press). (査読有)

Y. Kikuchi, M. Hirao, "Practical Method of Assessing Local and Global Impacts for Risk-based Decision Making: A Case Study of Metal Degreasing Process", Environ. Sci. & Tech., 42(12), 4527-4533 (2008). (査読有)

菊池康紀, 平尾雅彦, "金属部品の洗浄プロセスにおける工場固有の機能と制約を考慮したライフサイクルアセスメント", 日本LCA学会誌, 4(2), 147-160 (2008). (査読有)

H. Sugiyama, M. Hirao, U. Fischer, K. Hungerbühler, "Activity Modeling for Integrating Environmental, Health and Safety (EHS) Consideration as a New Element in Industrial Chemical Process Design", J. Chem. Eng., Japan, 41(9), 884-897 (2008). (Outstanding Paper Award of 2008; 査読有)

H. Sugiyama, U. Fischer, M. Hirao, K. Hungerbühler, "Decision Framework for Chemical Process Design Including Different Stages of Environmental, Health and Safety Assessment", AIChE J, 54(4), 1037-1053 (2008). (査読有)

菊池康紀, 平尾雅彦, "VOC排出抑制のためのプロセスモデリング - 定量実験に基づく金属洗浄プロセスモデル -", クリーンテクノロジー, 18(5), 49-53 (2008). (査読無)

Y. Kikuchi, M. Hirao, "Integrated design of process and operation considering local risks and global impacts: A case study on

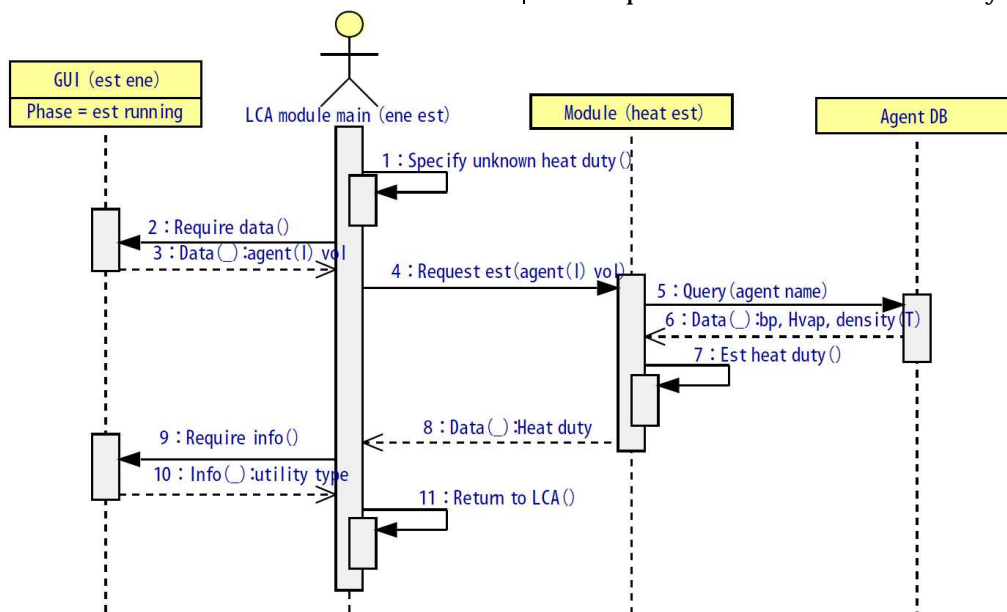


図10 LCAにおけるデータ変換作業のシーケンス図

metal-degreasing process design”, Proc. 17th ESCAPE, Computer-Aided Chemical Engineering, 24, 1223-1228 (2007). (査読有)

H. Sugiyama, U. Fischer, M. Hirao, K. Hungerbühler, “A Chemical Process Design Framework Including Different Stages of Environmental, Health and Safety (EHS) Assessment”, Proc. 17th ESCAPE, Computer-Aided Chemical Engineering, 24, 1157-1162 (2007). (査読有)

〔学会発表〕(計 27 件)

菊池 康紀・平尾雅彦, 「プロセス設計及び化学物質リスク評価に関する知識の構造化 - 金属洗浄プロセスへの適用」, 化学工学会 第 74 年会, 2009 年 3 月 20 日, 横浜

菊池 康紀・平尾雅彦, 「リスクに基づく LCM を実践するための評価と設計に関する知識の統合化」, 日本 LCA 学会 第 4 回研究発表会, 2009 年 3 月 5 日, 北九州

Y. Kikuchi and M. Hirao, “Practical Method of Assessing Local Risks and Global Impacts for Risk-based Decision Making”, The 8th International Conference on EcoBalance, 2008 年 12 月 11 日, 東京

平尾雅彦(招待講演)「環境影響を考慮した化学プロセス設計にむけて」, 化学工学会 第 40 回秋季大会, 2008 年 9 月 26 日, 仙台

M. Hirao, H. Sugiyama, U. Fischer, K. Hungerbühler, “IDEFO Activity Modeling for Integrated Process Design Considering Environmental, Health and Safety (EHS) Aspects” 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 2008 年 6 月 2 日, リヨン, フランス

Y. Kikuchi and M. Hirao, “Comprehensive approach to interpret local risks and global impacts for risk-based decision making: A case study on metal degreasing”, Society of Environmental Toxicology and Chemistry Europe 2007 Annual Meeting, 2007 年 5 月 21 日, ポルト, ポルトガル

〔図書〕(計 1 件)

平尾雅彦(監修)「中小企業の洗浄工程における VOC 排出抑制対策マニュアル」, 日本産業洗浄協議会(編), 日刊工業新聞社 (2008).

〔その他〕

環境省・日本産業洗浄協議会「VOC 排出削減抑制 産業洗浄における自主的取り組みマニュアル」(2007)

環境省・日本産業洗浄協議会「VOC 排出抑制 産業洗浄現場における VOC 対策事例集」(2008)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平尾 雅彦 (HIRAO MASAHIKO)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号 80282573

(2) 研究分担者

淵野 哲郎 (FUCHINO TETSUO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号 30219076

(3) 研究協力者

Konrad Hungerbühler  
スイス連邦工科大学・教授