

HTTR-ISシステムの系統設計のための 化学プラントの事故事例研究

Case Study on Chemical Plant Accidents for Flow-Sheet Design
of the HTTR-IS System

本間 洋之 佐藤 博之 笠原 清司 大橋 弘史*
原 輝夫 加藤 竜馬 坂場 成昭

Hiroyuki HOMMA, Hiroyuki SATO, Seiji KASAHARA, Hirofumi OHASHI*
Teruo HARA, Ryoma KATO and Nariaki SAKABA

原子力基礎工学研究部門
ISプロセス技術開発グループ

IS Process Technology Group
Nuclear Science and Engineering Directorate

February 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

HTTR-IS システムの系統設計のための化学プラントの事故事例研究

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニット
本間 洋之^{*1}、佐藤 博之、笠原 清司、大橋 弘史*、原 輝夫^{*2}、加藤 竜馬^{*3}、坂場 成昭

(2007年1月5日受理)

化石資源に依存した我々の生活は、その化石資源の枯渇や化石資源の大量消費による気候変動や酸性雨などの脅威に晒されている。このため、二酸化炭素のような温暖化ガスの発生がなく、また、環境汚染の心配がない水素が、将来の重要なエネルギー媒体として広く認知されており、燃料電池の開発普及により、近い将来には水素の需要が大きく増大するものと考えられている。大量の水素需要に応えるため、水を原料とした原子力エネルギーによる水素製造、とくに、高温ガス炉を用いた熱化学法 IS(ヨウ素-硫黄系)プロセスは、ゼロエミッションエネルギー戦略や実用規模への展開において、最も期待できる水素製造法である。

しかしながら、高温ガス炉による IS プロセス水素製造の技術基盤を確立するためには、我が国唯一の高温ガス炉である高温工学試験研究炉(HTTR)を用いた研究開発が不可欠である。HTTR は、日本原子力研究開発機構(原子力機構)の大洗研究開発センターに建設され、運転試験が行われている。原子力機構では、高温ガス炉によるISプロセス水素製造技術を実証するため、HTTR 接続ISプロセス(HTTR-ISシステム)の設計を開始した。HTTR-IS システムの設計に当たっては、IS プロセスプラントで発生する各種事故に対する予防保全、事後保全などを考慮する必要がある。そこで、IS プロセスプラントに関係する化学プラントでの事故事例を整理し、その結果を基に IS プロセスプラントの系統設計に必要な事故防止対策案を提示した。本報告はそれらについてまとめたものである。

大洗研究開発センター(駐在)：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

^{*1} 出向職員(㈱日立製作所)

^{*2} 出向職員(三菱重工業㈱)

^{*3} 出向職員(㈱東芝)

* Idaho National Laboratory

Case Study on Chemical Plant Accidents for Flow-Sheet Design of the HTTR-IS System

Hiroyuki HOMMA^{**1}, Hiroyuki SATO, Seiji KASAHARA, Hirofumi OHASHI*,
Teruo HARA^{**2}, Ryoma KATO^{**3} and Nariaki SAKABA

Nuclear Applied Heat Technology Division
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 5, 2007)

At the present time, we are alarmed by depletion of fossil energy and adverse effect of rapid increase in fossil fuel burning on environment such as climate changes and acid rain, because our lives depend still heavily upon fossil energy. It is thus widely recognized that hydrogen is one of important future energy carriers in which it is used without emission of carbon dioxide greenhouse gas and atmospheric pollutants and that hydrogen demand will increase greatly as fuel cells are developed and applied widely in the near future. To meet massive demand of hydrogen, hydrogen production from water utilizing nuclear, especially by thermochemical water-splitting Iodine-Sulphur (IS) process utilizing heat from High-Temperature Gas-cooled Reactors (HTGRs), offers one of the most attractive zero-emission energy strategies and the only one practical on a substantial scale.

However, to establish a technology based for the HTGR hydrogen production by the IS process, we should close several technology gaps through R&D with the High-Temperature Engineering Test Reactor (HTTR), which is the only Japanese HTGR built and operated at the Oarai Research & Development Centre of Japan Atomic Energy Agency (JAEA). We have launched design studies of the IS process hydrogen production system coupled with the HTTR (HTTR-IS system) to demonstrate HTGR hydrogen production. In designing the HTTR-IS system, it is necessary to consider preventive and breakdown maintenance against accidents occurred in the IS process as a chemical plant.

This report describes case study on chemical plant accidents relating to the IS process plant and shows a proposal of accident protection measures based on above case study, which is necessary for flow-sheet design of the HTTR-IS system.

Keywords: Hydrogen, Thermochemical Iodine-Sulphur Process, HTGR, HTTR, HTTR-IS System, Case Study, Chemical Plant Accidents, Flow-sheet Design, Accident Protection.

^{**1}Research Staff On Loan (Hitachi, Ltd. Power Systems.)

^{**2}Research Staff On Loan (Mitsubishi Heavy Industries Ltd.)

^{**3}Research Staff On Loan (Toshiba Co. Power Systems Company)

* Idaho National Laboratory

目次

1. はじめに	1
2. HTTR-IS システムの概要.....	2
2.1 HTTR-IS システムの目的.....	2
2.2 HTTR-IS システムの概念検討.....	2
3. 一般化学プラントにおける事故事例調査.....	4
3.1 調査方法.....	4
3.2 RISCAD による一般化学プラントの事故事例の分析.....	6
3.3 まとめ.....	11
4. HTTR-IS システムシステム設計への提案.....	12
4.1 HTTR-IS システムで懸念される類似事故の抽出.....	12
4.2 HTTR-IS システムにおける事故発生防止対策の提案.....	12
5. おわりに.....	19
謝辞.....	20
参考文献.....	20
付録.....	47

Contents

1. Introduction.....	1
2. Summary of the HTTR-IS system.....	2
2.1 Purpose of the HTTR-IS system.....	2
2.2 Pre-conceptual design of the HTTR-IS system.....	2
3. Trouble and accident information of chemical plants.....	4
3.1 Investigation method.....	4
3.2 Information of trouble and accidents occurred in chemical plants.....	6
3.3 Summary.....	11
4. Proposal to the system design of the HTTR-IS system	12
4.1 Assumed accidents at the HTTR-IS system.....	12
4.2 Proposal of the countermeasure for the assumed accidents.....	12
5. Concluding remarks.....	19
Acknowledgements	20
References.....	20
Appendix.....	47

1. はじめに

高温ガス炉は、原子炉出口で 950°C 以上の高温のヘリウムを供給できることから、ガスタービンを用いた高効率発電のみならず、化学プラントのプロセス熱源にも利用できる。第 4 世代原子炉システム国際フォーラム(GIF: Generation IV International Forum)では、超高温ガス炉 VHTR を用いてガスタービン発電や水素製造を行うシステムが候補システムのひとつに採択されるなど、日本をはじめとする欧米、中国、韓国、南アフリカなど世界各国で研究開発が進められている。

日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)では、我が国初の高温ガス炉である高温工学試験研究炉(以下、HTTR)を建設し⁽¹⁾、950°C という高温ヘリウムガスの炉外取り出しに成功する⁽²⁾とともに、高温ガス炉を用いた水素製造システムの実用化を目指した研究開発を進めている。水素製造方法の開発については、ヨウ素(I)と硫黄(S)の化合物を化学反応させて 900°C 程度の熱で水を熱分解して水素を製造する熱化学法 IS プロセスの研究開発を着実に進めてきており、2004 年には世界で初めて 30NL/h 規模の連続運転を約 1 週間行うことに成功した⁽³⁾。今後は、技術的成立性の確認を目指し、30Nm³/h 規模のパイロット試験⁽⁴⁾のステップを経て、1,000Nm³/h 規模の HTTR 接続試験(以下、HTTR-IS システム)⁽⁵⁾⁽⁶⁾の実施により原子力水素製造技術の実証を行う計画である。

HTTR-IS システムでは、原子炉の核熱を用いた世界初の水素製造の実証に加え、原子力機構で実証したシステムの産業界への引渡しを見据えて、安全性および経済性が実用的に満足できることを示すこと目的としている。原子力機構では平成 17 年度から HTTR-IS システムの概念検討を開始し、水素製造量 1,000Nm³/h 規模の HTTR-IS システムの基本的成立性を確認した⁽⁵⁾。今後はシステムのコンパクト化、合理化および機器設計等の検討を継続し、経済性のさらなる向上を図り、平成 21 年度末までに HTTR-IS システムの基本設計を完了させる計画である。基本設計において、水素製造設備は経済性向上の観点から原子力設備とは切り離し一般化学プラントとして原子炉に接続させることが重要である。このため非原子力級化に向けた検討に着手した⁽⁷⁾。非原子力級化を実現するためには水素爆発⁽⁸⁾等 IS プロセスにおいて想定される運転時の異常な過渡変化あるいは事故時においても原子炉の安全は確保されなければならない。その第一段階として、過去の一般化学プラントの事故事例を公開されているデータベースを基に HTTR-IS システムにおいても同様の事故が考慮される事故事例を抽出した。

本報では、関連する過去の事例を紹介するとともに、関連する過去の事故事例を基に HTTR-IS システムの系統設計、機器設計、システム設計の方針立案に必要な技術的情報について記す。

2. HTTR-IS システムの概要

2.1 HTTR-IS システムの目的

HTTR-IS システムの設計研究においては、高温ガス炉に接続する IS プロセス水素製造装置の商用炉への道筋を示すため、熱効率および水素価格等のユーザー要件の充足および原子力設備と化学プラントの接続に関する安全論理を確立する必要がある。そこで、HTTR-IS システムでは以下の項目を実証・確立し、必要なデータを取得することを目的とした。

- (a) 原子炉の熱を用いた水素製造の実証
- (b) 原子炉と化学プラント接続における安全設計および安全評価手法の確立ならびに高温隔離弁、高温ベローズ等の高温機器の実証
- (c) 原子炉と IS プロセスによる水素製造システムを調和させる運転制御技術の確立
- (d) 商用炉の経済性評価に必要なデータの取得

HTTR-IS システムでは、技術の実証はもとより、経済性の確証に向けた検討が重要である。経済性評価としては水素価格がひとつの指標となるが、貯蔵、輸送等を除く水素価格として、商用段階における水素製造価格 22 円/m³ を目標に設定した。そのためには高温ガス炉に接続する IS プロセスを非原子力級での製作を可能とするなどの設計上の課題を解決し、化学プラントの基準を準拠させる方針で設計・製作を行うことが必要である。しかし、原子炉と化学プラントを接続した例はなく、原子力機構では本課題を解決するために以下の研究課題を抽出し概念検討を開始した。

- IS プロセスに起因する 2 次ヘリウム系の除熱異常事象が原子炉に影響を与えないシステムの構築
- 原子炉で生成されるトリチウムの製品水素への移行量の評価⁽⁹⁾および低減化⁽¹⁰⁾
- IS プロセスの異常事象時に原子炉から IS プロセスを隔離する高温隔離弁の開発⁽¹¹⁾
- 水素爆発の原子炉施設への影響評価⁽⁸⁾およびその対策方針⁽¹²⁾

2.2 HTTR-IS システムの概念検討

原子力機構では、平成 17 年度から HTTR-IS システムの概念検討を開始した。HTTR-IS システムの概念検討に用いた HTTR に接続する IS プロセスの候補となる系統構成を図 2⁽¹³⁾に示す。HTTR-IS システムは原子炉、中間熱交換器(IHX)および IS プロセスの化学反応器群から構成され、原子炉と IHX の間を 1 次ヘリウムが循環し、IHX を介して 2 次ヘリウムへ熱を供給する。IS プロセスは、水素製造能力 1,000Nm³/h 規模を目指し、水素透過膜を設置しヨウ化水素分解率を向上させた HI 分解器、多重効用缶によりエクセルギー損失を減少し熱回収量を向上させた硫酸濃縮塔、触媒を担持した伝熱管を有する SO₃ 分解器等により構成する系統とした。なお、IS プロセスの熱効率向上に関する研究開発は IS プロセス開発⁽¹⁴⁾の一部として実施されており、HTTR に接続させる IS プロセス系統は、高効率化の研究成果を反映し、HTTR との境界条件⁽¹⁾⁽²⁾を考慮した上で基本設計の段階で決定する計画である。

概念検討における原子炉設備としては、2 次ヘリウム系の主配管は熱過渡のバッファの役割を持たせる蒸気発生器およびヘリウム冷却器を設置し、IHX へ戻る系統とした。IS プロセスの SO₃ 分解器、硫酸分解器および HI 分解器は主配管に対するバイパスとして配置し、それぞれ 2 次ヘリウムと熱交換を行う。蒸気発生器およびヘリウムガス冷却器は IS プロセスの化学反応器群の下流に配置することにより、IS プロセスにおいて急速かつ大きな温度変動が生じた場合においても蒸気発生器で 2 次ヘリウムの温度変

動を緩和し、原子炉の運転に影響を及ぼさないシステムを提案した⁽¹³⁾。また、IS プロセスの系統圧力は HTTR の 2 次ヘリウム系の圧力(約 4MPa)以下に設定し、IS プロセスと 2 次ヘリウム系とのバウンダリが万が一破損した場合にも、2 次ヘリウム系へのプロセス流体の混入を防ぐことを可能とさせる。温度変動緩和に対する運転制御特性は、モックアップモデル⁽¹⁵⁾を用いた試験により実証しており⁽¹⁶⁾、これにより IS プロセスには原子炉の除熱を期待しないで済むような安全設計を成立することが可能である。また、高温隔離弁の 1/2 サイズの開発⁽¹¹⁾により、高温環境におけるヘリウムのシール性能等を確認している。

上記の系統機器概念を基に配置概念の検討を行った⁽¹²⁾。配置概念図を図 3 に示す。想定される事故事象である水素爆発⁽⁸⁾による原子炉への影響を考慮し、水素を内包する HI 系は原子炉から隔離距離を確保するとともに、ミサイル効果を考慮し、水素内包設備と原子炉との間には他の IS プロセス機器を設置しないこととした⁽¹²⁾。また、硫酸系および HI 系の機器については機器損傷時等による有毒ガス等の拡散防止の観点から漏えい防止床構造とした建屋内に収納することとした。配置概念の検討の結果、敷地面積は 30m×103m とコンパクトな配置となる可能性があることを示した⁽¹²⁾。本システムにおいて、IS プロセスの水素分離にメンブレンリアクタ、コバルト系の分離による系統を組み込んで系統構成を最適化させた場合には、熱効率が約 43.6% (発電効率を 40%とした場合)で約 1,100Nm³/h の水素を製造できる見通しを得ている⁽⁵⁾。

3. 一般化学プラントにおける事故事例調査

3.1 調査方法

事故事例調査に先立ち、インターネットなどで利用可能な公開されている化学プラントの事故事例のデータベースを調べ、それから以下のデータベースを事故事例調査に用いることとした。なお、データの抽出に当たっては、1980年以前の古い事例では事故の記録が詳細でないものが多いこと、装置仕様や技術水準が近年より劣ることから除外し、1980年以降を調査対象とした。

① リレーショナル化学災害データベース (Relational Information System for Chemical Accidents Database: RISCAD)⁽¹⁷⁾

独立行政法人産業技術総合研究所および独立行政法人科学技術振興機構が共同で開発したデータベースで、以下の Web から検索が可能である。

<http://www.aist.go.jp/RIODB/RISCAD/>

RISCAD は 2002 年から公開されており、収録する事例は 1949 年から 2002 年の間に発生した国内外事故 4,186 件である。

② 失敗知識データベース⁽¹⁸⁾

独立行政法人科学技術振興機構が開発したデータベースで、化学関連の 1980 年以降の事故事例が 129 件登録されており、以下の Web から検索が可能である。

<http://shippai.jst.go.jp/fkd/Search>

③ 高圧ガス保安協会による最近の高圧ガス事故⁽¹⁹⁾

高圧ガス保安協会が設置している事故調査委員会が近年に発生した高圧ガス関連の事故 (2004 年以降の 25 件) をまとめたものであり、以下の Web から検索が可能である。

http://www.khk.or.jp/activities/incident_investigation/hpg_incident/recent_hpg_incident.html

④ JAEA 海外化学工場事故・トラブル情報⁽²⁰⁾

JAEA が国外の化学工場で発生した、主な事故・トラブル情報を公開文書から収集してデータベース化したものであり、以下の Web から検索が可能である。

<http://eventinfo.jnc.go.jp/index.html>

本データベースには、1990 年以降の事故事例が 164 件登録されている。

まず、上記データベースのうち最もデータ件数の多い RISCAD により調査を行った。その後 RISCAD にはない事例を失敗知識データベース、高圧ガス保安協会最近の高圧ガス事故、JAEA 海外化学工場事故・トラブル情報、有償で得られる高圧ガス保安協会偏の平成 17 年度事故事例検索システム⁽²¹⁾ から追加することとした。また、上記に含まれない最新の事故事例については、インターネットなどで調査した。

RISCAD では、発生年代、業種、発生事業、事故原因、装置区分、関連する化学物質などを特定してデータの抽出を行うことができるようになっている。抽出の結果は一覧表化され、事故の発生年の新しいものから順に概要が示される。また、事故件数の年代毎の増減などをグラフ化して表示させることも可能である。さらに、個々の事故事例詳細についてはデータシート化され、発生状況、被害状況、事故の概要、環境条件、工程、装置、推定原因などを個々に確認できる。調査は、以下の手順により行った。

① 事故発生件数の統計調査

データベースを基に、化学工業事故の年代毎件数推移を分析し、事故事例を分類 (装置 - 原因

－最終事象－発生工程)し、事故要因の発生件数をベースとした分析を行う。

② IS プロセスで懸念される類似事故の抽出

①の結果を基にして、IS プロセスと関連が深い装置・機器で発生した事故について分析を行い、IS プロセスにおける類似事故として可能性のあるものを抽出する。

②の結果から類似事故の事故要因を整理し、事故要因から懸念される HTTR-IS システムでの類似事故を整理し、その事故対策の提案を行った。

3.2 RISCAD による一般化学プラントの事故事例の分析

RISCAD には表 1 に示すような業種の事故事例がデータベース化されているが、HTTR-IS システムと類似の事故が予想される業種として化学工業をまず選定した。化学工業に含まれるデータ数は 530 件、内訳は国内事故が 486 件、海外事故が 44 件である。次に、化学工業以外の業種として石油製品・石炭製品製造業(データ数 176 件)、鉄鋼業(95 件)などでは水素を取り扱うことから、HTTR-IS システムと類似性のある事故事例の調査を行った。調査の結果、事故内容は化学工業の事故事例に包絡できることが分かった。化学工業事故をさらに最終事象、装置、工程、推定原因について分類し、発生件数に関する統計分析を行った。それぞれの分類項目について、表 2～表 5 に示す。表 2 には事故の最終事象の分類について示し、表 3 には事故が発生した装置の分類について示す。事故が発生した工程の分類について表 4 に示し、事故を引き起こした推定原因の分類を表 5 に示す。また、一般化学プラントにおける事故事例のうち IS プロセスで類似の事故の可能性のある事例について付録に示す。

3.2.1 化学工業事故の年代毎件数推移の分析

事故の統計的な傾向を把握するために最初に年代別の事故件数を整理した。化学工業の事故件数の推移を図 4 に示す。各棒グラフには表 2 の最終事象(非着火放出、火災、爆発)の第 1 分類のみを示してある。また、この化学工業の事故と対比させるために、データベース全体の事故件数を図 5 に示す。

(1) 発生事故件数および事故内容の傾向

- 図 4 の化学工業については、1970 年代初期が事故発生件数のピークであり、以降は徐々に件数が減少の傾向がある。
- これに対して図 5 のデータベースに含まれる事故全体では、1990 年頃がピークであり、その後は横ばいあるいは若干減少しつつある。
- 事故の最終事象としてはデータベース全体としても、また化学工業においても、爆発事象の比率が最も高く、火災、非着火放出と続いており、経年的な傾向も同様である。

(2) 化学工業自体の事故発生件数の低減化が産業全体に比べて早い時期から進められてきた理由

- 化学工業が古くからある産業であり、過去の発生事故を戦訓として、早い時期から安全管理の徹底が図られた結果と考えられる。
- 併せて、安全管理に関する近年の電子・IT 産業の発展に伴う計装・制御技術の進展、数値解析技術の発展に伴うプラント設計技術や運転技術の向上も事故発生件数を低減させたものと考えられる。

3.2.2 事故発生件数の分類(装置毎、原因、最終事象、工程)および分析

表 3 に示す RISCAD における装置の分類の中で IS プロセス主要機器と関連が深いと考えられる次の機器を抽出した。表 3 の分類は、第 1 分類のみとした。

- 反応容器および付属機器(対応する IS プロセス機器 : ブンゼン反応器や HI 分解器など)
- 貯槽・ポンペ(対応する IS プロセス機器 : 反応器や分離機器の手前に設置される混合器あるいはバッファ容器)
- 分離機器(対応する IS プロセス機器 : 硫酸濃縮塔や HI 蒸留塔など)
- 配管(対応する IS プロセス機器 : 硫酸、HI 用などの配管、バルブ)

- 加熱・冷却装置(対応する IS プロセス機器 : 硫酸、HI 用などの熱交換器)

なお、上記の IS プロセスの主要機器の機能は以下の通りである。

ブンゼン反応器 : ヨウ素、水および二酸化硫黄を反応させてヨウ化水素と硫酸を生成する機器

HI 分解器 : ヨウ化水素を分解し、ヨウ素と水素を生成する機器

硫酸濃縮塔 : 硫酸を酸素と二酸化硫黄に分解する機器

HI 蒸留塔 : ヨウ化水素を水素とヨウ素に分解する機器

混合器 : 生成、分解したものを混ぜ合わせる機器

バッファ容器 : 原料を溜めておく容器

抽出した装置の事故発生件数は、総数で 321 件であり、それぞれの事故発生件数と事故の原因、事象および事故の原因となった工程について分類した結果を図 6 に示す。図 6 から以下の特徴が分かる。

- ① 反応器関連の事故件数が突出して多く、これに続いて貯蔵・ポンベ、加熱冷却装置、分離機器、配管と続く。
- ② 原因は操作ミス等の人的要因や安全管理や設計ミス等の組織要因を併せた人災的な事故が全体として 30%程度と高い。
- ③ 物質・反応要因や刺激要因も装置毎でバラツキはあるものの、全体としては 30%前後と高い比率である。この中には上記の人的要因や組織要因が本質的な原因で 2 次的に異常反応に陥ったものや静電気などによる着火などが加わって事故に進展したものが含まれる。
- ④ 機器故障や腐食等が原因の設備・装置要因の事故も全体の 15%程度の比率を占めている。特に配管においては、この比率が 50%と非常に高い傾向があり、配管類は特に腐食に対する健全性維持が重要である。
- ⑤ 地震等の外部要因が原因となった事故は全体から見ると 1~2%と比率は低いものの事故発生対策上は地震等の外部要因は無視できない。
- ⑥ 最終事象としては全体に火災と爆発の比率が高く、この両事象で全体の 80%程度を占める。この中では貯蔵・ポンベと配管については漏えい事故の比率が 30%程度と高い。
- ⑦ 工程上の分類では、全体として生産・製造中の事故、また、貯蔵・ポンベにおいては貯蔵中の事故が 30%と生産・製造中の事故の 40%について多い。ただし、メンテナンス中や試験研究中の事故なども少なからず発生しており、特に配管についてはメンテナンス中の事故比率が他の機器よりも高い。

事故原因をより詳細に調べるため、上記の各機器について、図 6 に示すように事故原因を人的、組成、物質反応、設備装置などに分類し、その事故原因を分析した結果を表 6~表 10 に示す。なお、表 6~表 10 は、以下のように表 3 の第 1 分類で抽出した分類を記す。反応容器および付属機器について表 6 に示す。事故原因の特徴としては、全体としては人災的な要因(人的要因、組織要因)が高いのに対して物質・反応要因が 30%と最も高い。貯蔵・ポンベについては表 7 に示す。事故原因の特徴としては、人的要因と物質・反応要因が同等で高い。分離機器については表 8 に示す。反応容器と同様に物質・反応要因が 30%と最も高い。配管については表 9 に示す。材料の腐食などの設備・装置要因が 50%と非常に高

い。加熱・冷却については表 10 に示す。事故原因の特徴としては、人的要因、組織要因、物質・反応要因、設備・装置要因、刺激要因と全体的に分散している。なお、表 6～10 には、HTTR-IS システムにおける同類事故の可能性を併せて記してあるが、その詳細は 4 章にて記す。

3.2.3 高圧ガス保安協会による高圧ガス事故事例の分析

高圧ガス保安協会による最近の高圧ガス事故⁽¹⁹⁾に記載されている事故事例のうち、ISプロセスに関係が深いと考えられるのは、平成17年5月13日に愛・地球博瀬戸会場の燃料電池バスに燃料を供給する水素ステーションで起きた水素ガス漏れ事故事例である。その詳細を、高圧ガス保安協会で作成している平成17年度事故事例検索システム⁽²¹⁾で調査した。

愛・地球博会場では燃料電池バスのデモンストレーションが行われるとともに、燃料電池バスに水素を供給するための水素ステーションを会場内に2箇所設置していた。1箇所は水素ガスをトレーラで搬入して所内のタンクに貯蔵・供給するオフサイト方式を採用し、1箇所は都市ガスを改質して水素を抽出しコンプレッサで圧縮して貯蔵、供給するオンサイト方式を採用していた。都市ガス改質系統が故障や整備で使用できない場合においても、トレーラから配管を引き通して水素ガスを供給できるように設計されており、冗長系と信頼性を確保している。この都市ガスを改質して水素を貯蔵・供給するオンサイト式の水素ステーションで以下の事故が発生した。

事故の概要については高圧ガス保安協会の事故検索システムで次のように解説されている。

水素ステーションにおける燃料電池バスへの水素供給時に、充填開始してから数秒後、ディスプレイの充填ノズル付近から水素が漏れる音がしたため、すぐに充填停止ボタンを押して充填を停止した。同時にディスプレイ内のガス漏れ検出器が水素ガスを検知し、水素ステーション施設の運転を自動的に停止するとともに警備センターへガス漏れを通報した。これは、漏れ量は不明であるものの圧力21MPaの充填時において水素が漏れしたと結論付けている。充填ホースを詳細に確認したところ、カプラとホースの付け根から約12cmの位置で、フレキシ山部に5mm程度のクラックが確認された。原因は、想定していた耐圧疲労条件と異なり充填ホースの自重とセーフティカップリング重量の影響で充填ホースの曲げ半径が減少したことと充填作業を繰り返したことにより、疲労破壊が加速したものとみられている。対策として、充填ホースの曲げ半径減少を防止するため、カプラ根元へ保護管を取り付けるとともに、充填ホースの交換時期を短縮した。

本事故からHTTRに接続するISプロセスで懸念される事象としては、水素精製および水素貯蔵の構成機器において水素脆化または繰り返し作業による金属疲労—機器破損—水素漏れが想定される。これを防止するには、まず設計の段階で可能な限り繰り返し作業が発生しないシステムを構築することが重要である。そこで、系統上で上記事象が想定される箇所として伸縮継手、昇温・降温時の熱伸びを吸収するための曲がり部等が考えられ、予防保全の観点から、HTTR-ISシステムの前段階に実施されるパイロットプラントにおいて、伸縮継手部、曲がり部等供用期間中定期的に機器の減肉量を測定し、機器の交換基準を定める必要がある。水素ガスの漏れが発生した場合には、水素ガス漏れ検出器を設置し、漏れ検出時はシステムが安全側に動作する制御システムを構築して、運転員および作業員の安全を確保するとともに、漏れした水素ガスが水素爆発を発生させないように水素ガスの排気処理システムを導入することが必要と考えられる。さらに、このような事故が運転中に発生した場合に、装置の緊急停止と停止後の対応を運転手順書として整備しておく必要がある。

3.2.4 九州大学水素製造施設における爆発事故

インターネットで調査した事故事例のうち、2005年12月7日に九州大学伊都キャンパスの水素実証試験装置で発生した爆発事故について、九州大学のホームページに公開されている情報⁽²²⁾をもとに調査を行った。九州大学において事故を起こした水素ステーション実証試験設備は、「コンプレッサレスの高圧水電解水素ステーションの開発(経済産業省地域新生コンソーシアム研究開発事業)」において設置された施設であり2005年11月15日に試運転が開始された。

水素ステーションの心臓部である高圧縮水素エネルギー発生装置(High-compressed Hydrogen Energy Generator: HHEG)は、三菱商事が世界に先駆けて開発したコンプレッサを使用せずに水の電気分解により高圧の水素ガスを直接発生する装置である。2004年、その試作機が35MPaで2.5Nm³/hの水素製造を達成した。この研究の目的は、HHEGの高圧・大型化(圧力40MPa、水素製造能力30Nm³/h)を図り、電解特性、材料強度・耐久性、安全性などの評価解析を行い、併せて、風力等の自然エネルギーも利用できるオンサイト型水素ステーションを開発することと紹介されている。

九州大学では年末までの予定で試運転を行っていたところ、2005年12月7日に施設内のHHEGにおいて爆発事故が発生した。九州大学では、事故の原因を究明するとともに、事故の再発防止に向けて万全な対策を講じるべく調査を行っており、酸素配管系の破裂の40秒ほど前に認められたHHEG内の圧力上昇について、現場に残された破損物の調査や、残留物の分析、HHEGの記録データの分析などから、HHEGの心臓部である電解セルを収納する高圧タンク内で何らかの原因で異常が起こり、圧力が上昇したものと推察している。一方、事故時の装置の緊急停止動作により、自動弁が閉止し、蓄圧器の一部、およびHHEGの脱湿筒には水素ガスが残留し、また、事故時に噴出した黒色物と配管の一部から採取した水の分析などから、配管内の残存水はフッ素イオンを含み酸性を帯びていること(pHは2.5～6)、および微量の硫化水素および一酸化炭素を含むガスが存在していることが判明している。調査は継続中であるが、現時点では以下のように事故現象をまとめている。

- ① 何らかの原因で、電解セルタンク内において異常な反応が起こった。
- ② 電解セルタンクおよび酸素分離タンク内の圧力と温度が上昇した。
- ③ その後、降圧動作、および安全弁の作動により圧力は一旦低下した。
- ④ さらに何らかの反応が進み、再び圧力の緩やかな上昇が始まった。
- ⑤ 酸素分離系において何らかの原因で急激に圧力が上昇し、酸素配管で延性破壊を生じた。
- ⑥ 酸素の噴出、あるいは水素の燃焼に伴って一部の酸素配管材料が燃焼した。
- ⑦ 電解セルタンク内の水と反応生成物は、水循環配管を通過して酸素分離タンク側へ流れ、酸素配管の破断部から噴出した。

本事故の分析から、ISプロセスの設計で反映する必要がある項目のひとつとしてプロセス反応の異常があげられる。このとき、想定される反応とその発生物質を物質単位に評価し、安全システムを構築する必要がある。また、異なる化学物質同士が混入された場合の反応とその対策についても検討し、不必要な化学反応を受動的に起こさせないシステム構成を構築するのが望ましい。このため、不測の反応が起こった場合のプロセス異常検出システムとプロセス異常検出後の安全系へのインターロック動作などの制御システムの構築が重要である。特に、パイロットプラント、HTTR-ISシステム等のデモンストレーション段

階で、この制御システムを構築しておく必要がある。

九州大学における爆発事故は酸素系配管で起こっているが、IS プロセスにおいても酸素生成系、水素生成系のシステムを所有しているため類似の事故が起こり得る。この対策として、制御弁のシートリーク等を含めて不純物が極力混入しないようにするとともに、機器配置においても離隔距離を考慮しておくことで外部要因による二次災害を最小にできるものとする。また、異常停止、緊急停止などにおいてシステムを一旦停止後、系統内に残存するガスが再起動後に不測の反応を引き起こすこともあり得るため、停止後の残存ガス検出および残存ガス検出後の安全側へ動作する制御システムの構築なども必要である。一方で、事故時における異常時運転手引を予め整備し被害を極小化することも必要である。また、定期的なプロセスのサンプリングにより機器の性能確認を実施するとともに、兆候ベースの運転手引の整備を行い、異常事象は極力些細な段階で収束させることが重要である。

3.3 まとめ

化学プラントの事故事例について調査・分類・分析を行い、IS プロセスとの関連が深いと考えられる装置を抽出し、関連する事故発生件数を事故の原因、最終事象、工程に分類した。その結果、事故発生件数は反応器および付属機器が最も多く、物質・反応要因が主な事故原因であった。すなわち、高温腐食環境下での機器の損傷や通常運転状態から外れた化学反応により制御不能となったことが事故の要因となっていることがわかった。この状況に至るまでには、人的要因(操作ミス)の連鎖や化学反応状態を熟知していないことによりプラントの設計条件および運転制御条件の範囲設定に不備があり、それらを超える想定外の事象の発生が初期要因となっている。一方、貯蔵・ポンペが事故の原因となっているものは、人的要因と物質・反応要因が主体となっている。このうち、物質・反応要因に関係するものとして、容器に蓄積した不純物の開放時の反応促進による発熱や着火および容器の腐食による漏えいが発生していることがわかった。加熱冷却装置が事故の原因となっているものについては、刺激要因(打撃、摩擦、衝撃など)、組織要因(安全管理不備など)、物質・反応要因および人的要因とばらつきがある。装置本体の事故、電気系統の設備不良、電線管の接続部からのガスの漏えいなど発生している。これらの状況に至る主な要因は、定期点検や修理後の作業が不十分であったことから発生しているものである。分離機器が事故の原因となっているものも物質・反応要因が主体であり、不純物との接触、空気流入と装置内の熱による酸化が促進され、発火するなどがわかった。これも、貯蔵・ポンペと同様に容器に蓄積した不純物の影響についての検討が不足していたものである。配管事故の原因は設備・装置要因が主体で材料腐食が圧倒的に多い。これらは、材料選定はもちろんのこと、想定外の化学物質(例えば水の同伴)、不純物の影響、スラッジ等による配管の詰まりの影響によるものである。

4. HTTR-IS システム系統設計への提案

4.1 HTTR-IS システムで懸念される類似事故の抽出

前章で分類した IS プロセスと関連が深い反応器、貯蔵・ポンペ、分離機器、配管、加熱・冷却装置で発生した事故について、個々の事故事例を詳細に分析し、IS プロセスにおける類似事故として可能性のあるものの抽出を行った。前述した表 6～表 10 に抽出結果を示す。IS プロセスでの類似事故発生の可能性有無の判定においては事故発生時の条件、状況、環境、装置、事故の発生推移などが IS プロセスとは異なるケース、事故の原因が作業員や組織の単純な操作ミスによるもの、原因や詳細が不明なものについては、可能性無しの評価とした。

各装置について、IS プロセスにて類似事故の可能性のある件数／母数となる事故事例数の集計結果は次のとおりである。

- | | | |
|-----------|--------------|-------|
| ① 反応容器関連 | : 16 件／40 件 | (38%) |
| ② 貯蔵・ポンペ | : 9 件／26 件 | (35%) |
| ③ 分離機器 | : 1 件／11 件 | (9%) |
| ④ 配管 | : 14 件／22 件 | (64%) |
| ⑤ 加熱・冷却装置 | : 1 件／23 件 | (4%) |
| ⑥ 全体 | : 41 件／122 件 | (33%) |

上記のうち加熱・冷却装置については、類似性の事故の抽出比率が他に比べて低くなっているが、これは熱交換器の事故よりも IS プロセスでは使用しない乾燥機等の事故が大半を占めたことによるものである。

4.2 HTTR-IS システムにおける事故発生防止対策の提案

4.1 項における類似事故の事故要因を整理した結果を表 11 に示す。これらの事故要因を基にして、表 11 には HTTR-IS システムで懸念される事故事例を列記し、その事故防止するために事前に評価、開発等を行うべき項目を挙げてある。この事前に評価、開発等を行うべき項目に対して、HTTR-IS システムの設計で対処すべき項目をソフトとハードに分けて示すとともに、HTTR-IS システムの運転および保全において対処すべき項目を挙げた。以下に、各事故要因に対する HTTR-IS システムで懸念される事故事例の防止対策について記す。なお、上述した表 6～表 10 の事故事例データシートから IS プロセスで類似の事故の可能性のある個々の事例について付録に示した。

4.2.1 事故防止対策の考え方

表 11 に示す HTTR-IS システムにおける事故防止対策の概要を述べるに当たり、それが HTTR-IS システムの概念検討において実施した HAZOP スタディ⁽²³⁾における異常事象の分類とどのような関係があるかを先ず述べておく。HAZOP スタディでは異常事象を以下の 5 項目に分類した。

- (a) 可燃性物質の漏えい(発火温度以上:自動発火し、火災・爆発に至る)
- (b) 毒性物質の漏えい
- (c) 可燃性物質の漏えい(発火温度以下:着火源があれば火災・爆発に至る)
- (d) IS プロセスの除熱量の増大(2 次ヘリウムで加熱されているシステムの異常)

(e) IS プロセスの除熱量の減少(2次ヘリウムで加熱されているシステムの異常)

今回の事故防止対策の提案では、さらに詳細化し、上記の(a)~(c)の異常事象については、以下に記す(1)~(4)(表 11 の番号に相当)が該当し、(d)~(e)については(5)~(12)が該当する。

表 11 に記す各事象に対する事故防止対策の基本方針は以下の通りである。(1)、(3)、(4)の事故防止対策の水素ガス漏えい対策の具体化においては、HI 分解器を建屋内に配置し、水素ガス漏えい検出器を建屋内の空間部に数台設置する。検出器が漏えいを検知した場合は、「IS プロセス異常」の IS プロセス全体の異常を集約した警報を HTTR 中央制御室に 1 点設け、HTTR の運転員に IS プロセス異常を認識させると同時に、IS プロセス建屋の制御室にも警報を発報させ IS プロセスの運転員に適切な判断を仰ぐものとする。また、水素が建屋内に滞留しないように排気システムを設置し、警報と同時に排気システムを作動させるなどのインターロックを設ける。HI 分解器からの水素移送配管については二重管とし、HI 分解器とそれ以外の機器配置構成においても適切な分離配置とする。

(2)の残存物質の影響については、系統内の残存物質を検知するための圧力計などのプロセス監視計器や毒性物質の検出器を設置し、残存物質を検知した場合には IS プロセス建屋の制御室および現場に警報を発報させるとともに、残存物質を処理するインターロックを設ける。なお、インターロックの詳細については今後検討する。残存物質が毒性物質の場合、作業員の被毒対応のためのシャワールームを現場に設置する。毒性物質を含む移送配管は二重管構造とする。

(5)、(7)、(11)の異常反応、配管目詰まりおよび触媒流動による影響については、不純物が蓄積しない配管の引き廻しや機器配置とするとともに、触媒の流れ防止機器を設置し、不純物蓄積や触媒流れ出しによるプロセス変動は圧力計、流量計などプロセス監視計器にて検知し、系統を適切に作動させる。また、プロセスの組成などサンプリングシステムを設置し、早期異常検知を可能とする。

(6)、(8)の高温、腐食環境下でのセンサ損傷や安全機器の動作不良については、高温、腐食環境条件で設置する重要な機器およびプロセス計器は、多重化(多様化)し、片系が異常時は他系に切替えて運転する。また、重要な機器を制御する制御システムも多重化する。特に、設置許可上は多重化する必要がないという許可が規制当局から得られたとしても、パイロットプラントおよび HTTR-IS システムにおいては原子力機構が独自に多重化システムを構築することが肝要であるとする。

(9)は系統設計段階の電源計画時に検討し、(10)は動特性解析などの検討時に検討することとする。(12)のポンプキャビテーションについては、キャビテーション検知用のプロセス監視計器を設置し異常時はポンプ停止などのインターロックを設けることを考える。(13)は耐震設計と併せて検討し、(14)、(15)は最終段階の作業要領書作成段階時に検討することとする。

4.2.2 事故防止対策の概要

表 11 に記す各事象に対して提案した事故防止対策の概要を以下に記す。

(1) 材料腐食や熱劣化による漏えい事故防止対策

過去の化学プラントにおける事故事例のうち IS プロセスに関係する事故要因としては、材料腐食や熱劣化により漏えいする要因が最も多く、IS プロセスで想定される異常事象に硫酸や HI 等の高腐食性ガスおよび溶液による構成機器、配管・弁、シール材等の腐食-破損-漏えいおよび高温部でのクリープによる材料破損が考えられる。IS プロセスとしては、①腐食や劣化を抑える材料の開発ならびに選定(現在実施中)⁽²⁰⁾、②減肉や歪等の漏えい予兆の早期検知と交換や補修による漏えいの抑止(パイロットプラン

ト設計および運転で実施)、③漏えい発生時の安全性維持や被害拡大の防止、の3つが事故防止対策の柱となる。現在、耐食性の高い材料の選定中であるが、今後は、動特性解析等により漏えい発生時のシステム挙動について事前評価を行うことが重要である。

ソフト的な事故防止対策への反映事項としては、漏えい発生時の安全確保および2次被害などの拡大防止を考慮した制御設計を構築する必要がある。ハード的には、漏えい対象をガスか液体に分類した場合、ガス漏えいの場合、漏えい検知器、拡散防止フードおよびガス排気システムなどの設置が考えられ、液体漏えいの場合、拡散防止堰、漏えい検知器およびドレン処理設備などの設置を検討する必要がある。

運転および保全関係における事故防止対策としては、非破壊検査等による容器・配管等の減肉量の定期測定を行い漏えいの予兆を早期に察知し、また、機器の交換基準の整備を行い、適時交換することで漏えいの抑止を図る。万一、腐食および漏えいが発生した場合の対応および運転手順を整備しておくことで被害を極小化することも重要である。

(2) 定期検査時の装置内残留物の噴出、発熱、着火などの事故防止対策

化学プラントにおいてISプロセスに関係する事故要因の2番目に多い要因としては、定期検査時の装置内残留物の噴出、発熱、着火などである。ISプロセスで想定される異常事象としては、硫酸等の劇物の残存、点検時の流出(噴出)および残存水素ガス等の着火爆発などが考えられる。ISプロセスとしては、①装置中に物質が残存しないようなシステムならびに機器の設計、②開放点検前の物質残存状況の検知と残存があった場合の排出手順化、③物質の残存や流出も考慮した機器開放手順の構築や流出時の事故拡大防止対策化の3つを事故防止対策の方針として提案する。

事故防止対策におけるソフト設計時の反映事項としては、系統内圧力監視、残存ガス検知信号に基づくインターロック(警告システムおよび安全側へのシステム作動)の設定により、安全を確保する。ハード設計としては、ガス検知器(SO₂、水素検知器等)を設置する。また、直火防止として機器、配管の分離配置および機器の防爆仕様の採用が必要である。運転および保全関係における事故防止対策としては、残留物質の有無および残留物質検知後の残留物質の排出について点検手順(機器の開放手順)を整備し事故の拡大防止を図る。以上を反映させた設計は然るべきものであるが、過去に起きた事件事例件数からは軽視することはできず、十分に考慮していく必要がある。

(3) 事故の連鎖による被害の拡大事故防止対策

本事象は、系統内での局所的な機器破損から圧力低下(または上昇)し系統全体の圧力が変化し異常環境が拡大するものである。また、水素発生または送付部で爆発事故が発生し、連鎖事象として他工程の配管破損から硫酸等の劇物の漏えいすることが考えられる。ISプロセスとしては、漏えい発生を前提に想定される連鎖事故を断ち切る対策をシステム設計および制御設計と運転および予防保全へ反映することを事故防止対策の方針として提案する。まず、ISプロセス自身の動特性解析等により異常発生時の挙動を事前に評価しておく必要がある。事故防止対策におけるソフト設計時の反映事項としては、プロセス異常(圧力計、流量計)信号に基づくインターロックの設定を行う。ハード設計としては、可燃性ガス(水素)発生および送付部とそれ以外の機器配管の分離配置など隔離範囲の設定し系統のセグメント化を行う。また、動特性解析結果に基づく異常発生時の挙動検出器(インターロック用)を設置する。運転

および保全関係における事故防止対策としては、システム停止の手順を整備する。

(4) 可燃・爆発雰囲気形成と静電気や熱源接触による着火による事故防止対策

IS プロセスで想定される異常事象としては、水素発生および移送部へ空気が混入することにより爆発雰囲気を形成し、静電気や熱源接触により着火し爆発することが考えられる。IS プロセスとしては、①プラント機器内外からの徹底した漏えい抑止対策、②漏えいに備えた高温部や着火源対策を事故防止対策の方針として提案する。ハード設計としては、水素漏えいや大気の漏れ込み抑止するため水素発生機器や水素伝送配管の二重管化等にする。また、水素爆発を考慮し、水素発生・移送部機器は防爆仕様を採用する。プラント機器内外の漏えい検知器を設置し、爆発雰囲気を形成しないように強制排気システムを設置する。運転および保全関係における事故防止対策としては、水素漏えい時のシステム停止の手順を整備する。

(5) 反応異常による制御不能・暴走、腐食の加速などの事故防止対策

IS プロセスに関係する事故要因において多い要因としては、反応異常による制御不能や暴走、腐食の加速などである。IS プロセスで想定される異常事象としては、原材料含有不純物の蓄積や触媒性能の変化または大気等外部からの混入が引きがねとなって異常反応による制御不能や暴走および腐食環境の形成に至ることが考えられる。

IS プロセスとしては、①不純物も含めた物質の物性・特性の幅広い把握や反応挙動解析による想定外範囲の縮小、②システムや反応状態の監視による異常事象の早期検出、③異常事象時の機器の安全な停止等の手順化の 3 つを事故防止対策の方針として提案する。今後、新たに技術開発などが必要になるもののひとつとしては、不純物や大気混入時の反応および腐食への影響についての解析、試験である。また、動特性解析等による反応率上昇(低下)時のシステム挙動についても事前に評価しておく必要があると考える。

事故防止対策におけるソフト設計時の反映事項としては、開発結果における解析や試験の評価によるインターロック設定などにより安全を確保する。ハード設計としては、開発結果に基づく異常事象の早期検出を可能とする計測機器を設置する。運転および保全関係における事故防止対策としては、異常事象の早期検出を可能とするため、運転中の物質組成等の定期的なモニタリングを行う。

(6) 過熱等が原因となった制御用センサの異常による事故防止対策

IS プロセスで想定される異常事象としては、高温場や腐食環境場における制御用センサの損傷(動作不良含む)により制御不能に至ることが考えられる。IS プロセスとしては、①制御センサ耐久データを基にした交換等のメンテナンス計画整備、②重要なセンサ等制御機器の多重化を事故防止対策の方針として提案する。今後、新たに技術開発などが必要になるもののひとつとして、機器の選定において、実環境条件での耐久性試験を実施し評価結果により適用条件を明確化する必要があると考える。事故防止対策におけるソフト設計時の反映事項としては、制御機器の多重化に対応した最適な制御システムを構築する。ハード設計としては、センサの動作不良を想定し、重要制御機器における計測システムについては多重化システムとする。運転および保全関係における事故防止対策としては、耐久性試験の評価結果によりセンサの交換基準などメンテナンス計画を整備する。

(7) 配管の目詰まり・閉塞による事故防止対策

IS プロセスで想定される異常事象としては、腐食物や不純物の濃縮による配管や弁などの目詰まりおよび閉塞によりシステムが動作不良になることが考えられる。IS プロセスとしては、①原因の除外による目詰まり抑止、②目詰まりの発生や進行の早期検知、③目詰まり発生を想定した対策の機器や制御系設計ならびに運転保全への織込みを事故防止対策の方針として提案する。今後、新たに技術開発などが必要になるもののひとつとして、腐食物や不純物などの目詰まりの原因物質の発生を抑止する機器材料や原料物質を選定する必要がある。そのため、試験的な目詰まり要因(固体、化学物質)発生の確認および評価をしておく必要がある。事故防止対策におけるソフト設計時の反映事項としては、機器の目詰まりおよび閉塞検知(差圧計)信号に基づくインターロックの設定を行う。ハード設計としては、開発結果に基づく機器設計(機器材料)への反映を行う。目詰まり要因発生の確認および評価結果に基づき不純物除去用フィルタを設置する。機器の目詰まりおよび閉塞検知センサ(差圧計など)を設置する。運転および保全関係における事故防止対策としては、定期検査時の非破壊検査等により目詰まり状況を定期測定する。

(8) 安全機器の動作不良による事故防止対策

IS プロセスで想定される異常事象としては、異常時に設計想定条件を超えた環境が形成されることにより安全機器が機能喪失となることが考えられる。IS プロセスとしては、①不純物も含めた物質の物性・特性の幅広い把握や反応挙動解析による想定外範囲の縮小、②重要な安全機器の多重化を事故防止対策の方針として提案する。今後、新たに技術開発などが必要になるもののひとつとして、動特性解析等により異常発生時の挙動を事前に評価しておく必要がある。事故防止対策におけるソフト設計時の反映事項としては、制御機器多重化に対応した制御システム設計を行う。ハード設計としては、動作不良を想定した安全機器の多重化を図る。運転および保全関係における事故防止対策としては、保守時に安全機器の動作チェックを行う。また、安全機器の交換基準を整備する。

(9) 商用電源喪失による制御不良による事故防止対策

IS プロセスで想定される異常事象としては、商用電源喪失によりポンプや制御系が停止することで制御機能が喪失しシステムが暴走すること、局所的に熱負荷が増加(または喪失)することが考えられる。IS プロセスとしては、①商用電源喪失時の制御系機能の維持、②商用電源喪失時に対応する制御系や対応手順の整備を事故防止対策の方針として提案する。ハード設計としては、無停電電源および非常用電源などにより商用電源喪失時に機器および制御系が機能しない設計の必要性を検討する。具体的には、機器の重要度および機器および制御系の不動作時に想定される異常の規模を評価した上でハード対策を検討する。運転および保全関係における事故防止対策としては、商用電源喪失発生時の対応の手順を整備する。

(10) 立上げや停止時の反応不良による事故防止対策

IS プロセスで想定される異常事象としては、過渡状態で想定外のプロセスが進行することで想定組成から逸脱することが考えられる。IS プロセスとしては、①不純物も含めた物質の物性および特性の幅広い

把握や反応挙動解析による想定外範囲の縮小、②段階的開発により、問題点や懸念事項の早期の顕在化を事故防止対策の方針として提案する。今後、動特性解析等を活用したシステム挙動を事前に評価しておく必要がある。事故防止対策におけるソフト設計時の反映事項としては、立上げおよび停止時の動特性を制御システムへ反映(インターロックの設定)する。ハード設計としては、立上げおよび停止システム設計に基づく計測機器(インターロック用)を設置する。運転および保全関係における事故防止対策としては、立上げおよび停止の手順を整備する。

(11) 触媒流動の磨耗による事故防止対策

IS プロセスで想定される異常事象としては、SO₃ 分解器や HI 分解器での触媒流動により容器や配管が磨耗することで強度が低下し破損および漏えいすることが考えられる。IS プロセスとしては、①開発時の試験による触媒流動の磨耗への影響の定量評価、②腐食や劣化の事故要因とも併せた対策を事故防止対策の方針として提案する。今後、新たに技術開発などが必要になるもののひとつとして、試験的な事象発生の可能性を事前に評価しておく必要がある。事故防止対策におけるソフト設計時の反映事項としては、触媒流れ出し検出(差圧計)信号に基づくインターロックの設定を行う。ハード設計としては、触媒の流れ出しを防止する機器(メッシュ)および流れ出し検出(評価)用の差圧計を設置する。運転および保全関係における事故防止対策としては、非破壊検査等により配管減肉量を測定する。

(12) ポンプキャビテーションによる供給不良や振動の発生による事故防止対策

IS プロセスで想定される異常事象としては、系統内の温度、圧力、成分比率等が変動しポンプキャビテーションを発生することが考えられる。また、キャビテーションが原因となり連動事象として振動による締付け部の緩みや配管等の破損、または、液供給不足によるプラントシステムの機能低下や動作不安定となることが考えられる。IS プロセスとしては、①キャビテーション発生検知とインターロック設定、②キャビテーション発生等のポンプ不調時の対処手順の整備を事故防止対策の方針として提案する。今後、ポンプキャビテーション発生可能性の検討と試験的に評価しておく必要があると考える。事故防止対策におけるソフト設計時の反映事項としては、ポンプ異常検出(圧力、流量、音)信号に基づくインターロックの設定を行う。ハード設計としては、ポンプ異常検知器(圧力計、流量計、アコースティックエミッション法の導入)の設置を提案する。運転および保全関係における事故防止対策としては、ポンプキャビテーション発生等ポンプ不調時の対処手順を整備する。

(13) 大地震発生時の機器配管破損およびプロセスガス漏えいによる事故防止対策

大地震(S₁ 地震、S₂ 地震)には、機器配管本体および接続部が破損し水素等のプロセスガスが漏えいすることが考えられる。IS プロセスとしては、大地震発生時のプラントの運転対応手順化を事故防止対策の方針として考える必要がある。化学プラントに原子力級の耐震設計を導入する必要はないため、耐震クラスの設定は今後これを踏まえて検討する。一方で許認可とは別に耐震クラスの高い設計を行うことは肝要であり、配管支持間隔等の設定は HTR の基準地震動を考慮した上で行うことを提案する。事故防止対策におけるソフト設計時の反映事項として、大地震に伴う想定異常事象を整備するとともに、地震波検知によるシステムの緊急停止機構の採用を検討する。ハード設計としては、本体および接続部を耐震構造設計とする。また、地震波モニタの設置が必要である。運転および保全関係における事故防止対策

としては、異常時(地震時)対応手順を整備し被害の極小化を図る。

(14)建設・保全時の作業ミス・作業不良による事故防止対策

建設時や保守メンテナンス時には、作業ミスや交換部品の不良により異常事象が発生することが想定される。人的要因による事故の排除のためには、運転および保全関係において作業要領および検査基準を整備するとともに、安全文化の継続的な向上の努力が重要である。

(15) 試運転中の誤動作による事故防止対策

IS プロセスで想定される異常事象としては、試運転時に想定外のプロセスが進行する。また、制御ソフトの完成度が低いことによる制御不能などが考えられる。IS プロセスとしては、①開発を通じた制御ソフトの完成度向上、②物質の物性や特性の十分な把握を事故防止対策の方針として提案する。今後、動特性解析等を活用したシステム挙動を事前に評価する。事故防止対策におけるソフト設計時の反映事項としては、制御ソフトの完成度を向上させる。運転および保全関係における事故防止対策としては、異常レベルや認知および対処手順など試運転手順を整備する。

4.2.3 事故防止対策の実現に向けて

事故の多くは運転状態(機器環境)が想定範囲を外れた状況に陥ることが原因となったものである。すなわち、何らかの要因で、物質の反応状態、機器の運転条件、環境条件などが想定範囲から逸脱(異常事象が発生)し、プラントが制御不能となることで機器の損傷または初期要因が他の要因と結びつくことにより事故へ進展したものである。また、類似事故例において想定外とされた代表的な事象は、①機器の故障や破損(高温下の過酷な運転や腐食など)、②不純物の蓄積や触媒特性の変化等の影響(反応状態変化や目詰まり発生等)、③試運転、起動停止、定期点検時など通常以外の運転モードの影響(通常運転以外の物質や反応の状態)、機器の運転状態などの未把握、④地震や商用電源喪失などの外部事象(上記の機器の故障や破損へ進展)であり、本事象が最終的なシステム・機器設計、制御設計へ十分に反映されていなかったことが事故を防止できなかった本質的な要因と考えられる。

このような想定範囲外の事象を含めた事故要因も加えて、IS プロセスにおいて類似事故事象を防止するために必要となる対策を実現するに当たっての留意事項を以下にまとめて記す。まず、想定外範囲の事故事象に対する対策としては、

- プラント建設前の開発段階における、反応プロセスならびに材料・機器の耐久特性の広範囲の把握、ならびに、本結果の設計への反映
- 起動停止やメンテナンスのための機器開放など、通常とは異なるシステムプロセスにおける安全面の検証や設計データの取得
- 想定外となりやすい事象の設計条件や設計範囲へ考慮

が挙げられる。

一方、4.2.2 項に記した機器や制御系の適切な安全設計として、以下の項目に留意する必要がある。

- システム全体、ならびに各機器の運転状態のモニタリングシステムによる異常状態や兆候の早期発見
- 配管の二重化、漏えい検知機器設置、水素発生・移送部の他機器との隔離などによる安全管理

対策の徹底

- 異常発生時のシステムならびに機器の緊急停止等制御機能の付加、事故発生時の被害の拡大防止を想定した設備の配置など
- 可燃性ガスおよび毒性物質の漏えい検出器設置と異常検出後の制御インターロックなどシステムを安全側へ動作させる制御システムの構築
- 地震検知モニタの設置と異常地震波検知による制御インターロックなどシステムを安全側へ動作させる制御システムの構築およびシステム全体の耐震設計の反映
- 機器(計測器含め)の単一故障による制御インターロックなどシステムを安全側へ動作させる制御システムの構築
- 重要機器の多重化、多様化と計測制御システムの多重化、多様化の構築
- 商用電源喪失を考慮した電源システムの構築
- 機器の性能監視用検出器の設置と性能異常検知後の制御インターロックなどシステムを安全側へ動作させる制御システムの構築
- 機器、配管の目詰まりおよび閉塞検出器と異常検知後の制御インターロックなどシステムを安全側へ動作させる制御システムの構築

さらに、保守保全によるシステム全体ならびに各機器の健全性維持として、

- リスク分析(程度、確立)や材料特性・耐久性データを基にした保守保全計画の立案
- 保守点検による健全性の確認、適切な時期の機器部品の交換や更新

が重要である。

今後 HTTR-IS システムの設計において適切な時期に計測制御系を含めた系統設計を実施する計画である。

5. おわりに

HTTR-IS システムは原子炉に接続する化学プラントであることから、IS プロセスで事故が発生しても HTTR の安全は保たれなければならない。現在、システムの安全設計方針などを検討しているが、過去に発生した一般化学プラントと同様な事故の発生は必ず避けなければならない。そこで今回、一般化学プラントの事故事例を調査し、HTTR-IS システムにおいても同様の事故が懸念される類似事象の抽出を行い、類似事故の事故要因を整理し、想定される IS プロセスでの類似事象およびその対応策について提案した。

類似事故の整理結果から、事故は反応器および付属機器が最も多く、その原因は物質・反応が引きがねになっている。これは、高温腐食環境下での機器の損傷や化学反応が通常運転状態から外れた場合に制御が効かない状況となり発生している。この状況に至る要因は、人的要因(操作ミス)の連鎖で起こる場合と化学反応状態を完全に熟知せずにプラントの設計条件および運転制御条件を設定したことにより、想定範囲を超える事象の発生が初期要因となり、機器の破損、プラントの制御不能につながっている。貯蔵・ボンベが事故の原因となっているものは、人的要因と物質・反応要因が主体となっている。このうち、物質・反応要因に関係するものとして容器に蓄積した不純物の開放時の反応促進による発熱や着

火および容器の腐食による漏えいが発生していることがわかった。これらの状況に至る要因は、不純物による化学反応の影響や、材料腐食や熱劣化による漏えいによるものである。加熱冷却装置が事故の原因となっているものは、刺激要因、組織要因、物質・反応要因および人的要因とばらつきがある。装置本体の事故、電気系統の設備不良、電線管の接続部からのガスの漏えいなど発生している。これらの状況に至る主な要因は、定期点検や修理後の作業が不十分であったことから発生しているものである。分離機器が事故の原因となっているものも物質・反応要因が主体であり、不純物との接触、空気流入と装置内の熱による酸化が促進され、発火するなどがわかった。これも、貯蔵・ボンベ同様不純物の影響についての検討が不足していたものである。配管事故の原因は設備・装置要因が主体で材料腐食が圧倒的に多い。これらは、材料選定はもちろんのこと、想定外の化学物質（例えば水の同伴）、不純物の影響、スラッジ等による配管の詰まりの影響によるものである。以上の知見を基に事故防止対策について、開発、設計、運転・保全の項目に分類し、設計については、ソフトおよびハード設計に分類し提案した。

今後、HTTR-IS システムの設計を進める上では、HTTR-IS システム自身の建設コスト低減に向けた検討と同時に、想定される異常過渡および事故の発生防止の対策を行うことは極めて重要である。特に、水素製造は昨今の新しい技術開発である。事故防止に対しては十分な検討・対策を行い、過去の他プラントにおける失敗を十分に教訓として生かし、来るべき水素社会に備えて原子力による水素製造システムの開発を行っていききたい。

謝辞

本報における調査の一部にご尽力頂いた三菱重工業(株)の三木晋氏に感謝いたします。執筆にあたりご助言等を頂いた(独)日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 核熱応用工学ユニット長小川益郎氏、日野竜太郎研究主席、同ユニットコジェネレーション高温ガス炉設計評価グループリーダー國富一彦研究主席および同グループ西原哲夫主任研究員、同ユニット IS プロセス技術開発グループリーダー小貫薫氏に感謝いたします。また、同ユニット IS プロセス技術開発グループ久保真治副主任研究員には IS プロセス開発におけるこれまでの経験および動特性解析に関する貴重な知見を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- (1) S. Shiozawa, S. Fujikawa, T. Iyoku, K. Kunitomi, Y. Tachibana, "Overview of HTTR design features", *Nucl. Eng. Des.*, 233, 11-21 (2004).
- (2) S. Fujikawa, H. Hayashi, T. Nakazawa, K. Kawasaki, T. Iyoku, S. Nakagawa, N. Sakaba, "Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950°C in HTTR", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 41, 12, 1245-1254 (2004).
- (3) S. Kubo, H. Nakajima, S. Kasahara, S. Higashi, T. Masaki, H. Abe and K. Onuki, "A demonstration study on a closed-cycle hydrogen production by thermochemical

- water-splitting Iodine-Sulfur process," *Nucl. Eng. Des.*, 233, 347-354 (2004).
- (4) 寺田敦彦, 大田裕之, 野口弘喜, 小貫薫, 日野竜太郎, "熱化学水素製造法 IS プロセスのための硫酸分解器の開発," 原子力誌, 5, 1, 68-75 (2006).
- (5) N. Sakaba, S. Kasahara, H. Ohashi, A. Terada, S. Kubo, K. Onuki, K. Kunitomi, "Hydrogen Production by using Heat from High-temperature Gas-Cooled Reactor HTTR; HTTR-IS Plan," Proc. of ICAPP '06, 6024, 4-8 June 2006, Reno, US, (2006).
- (6) N. Sakaba, S. Kasahara, H. Ohashi, H. Sato, S. Kubo, A. Terada, T. Nishihara, K. Onuki, K. Kunitomi, "Hydrogen production by thermochemical water-splitting IS process utilizing heat from high-temperature reactor HTTR," Proc. of WHEC2006, S04-043, 13-16 June 2006, Lyon, France, (2006).
- (7) 大橋一孝, 西原哲夫, 國富一彦, "HTTR-IS 水素製造システムにおける安全設計の考え方," 原子力誌, 6, 1 (2007).
- (8) 村上知行, 西原哲夫, 國富一彦, "VHTR 水素製造システムにおける水素ガスの漏えい拡散特性および爆風圧評価の考え方," 原子力誌, 5, 4, 317-325 (2006).
- (9) H. Ohashi, N. Sakaba, T. Nishihara, K. Kunitomi, "Numerical study on tritium migration with isotope exchange reaction in IS process coupled with high-temperature gas cooled reactor," *J. Nucl. Sci. Technol.*, submitted.
- (10) N. Sakaba, H. Ohashi, T. Takeda, "Hydrogen permeation through heat transfer pipes made of Hastelloy XR during the initial 950°C operation of the HTTR," *Nucl. Mater.*, 353, 42-51, (2006).
- (11) 西原哲夫, 榊明裕, 稲垣嘉之, 高見和男, "HTTR水素製造システムの高温隔離弁の開発", 原子力誌, 3, 4, 381-387 (2004).
- (12) 佐藤博之, 坂場成昭, 大橋弘史, 西原哲夫, 國富一彦, "高温ガス炉 HTTR に接続する熱化学水素製造 IS プロセスのシステム評価," 第11回動力・エネルギー技術シンポジウム予稿集 OS8-8, (2006).
- (13) 坂場成昭, 本間洋之, 高橋才雄, 笠原清司, 大橋弘史, 西原哲夫, 小貫薫, 國富一彦, "高温ガス炉による水素製造 (11) HTTR-IS システム概念検討," 原子力学会 2006 春の年会予稿集 N49, (2006).
- (14) A. Terada, S. Kubo, H. Okuda, S. Kasahara, N. Tanaka, J. Iwatsuki, H. Ota, S. Ishikura, K. Onuki, R. Hino : "Development of hydrogen production technology by thermo-chemical water splitting IS process -Pilot test plan-," Proc. of GLOBAL2005, 427, October 9-13, Tsukuba, Japan (2005).
- (15) 稲垣嘉之, 武田哲明, 西原哲夫, 羽田一彦, 林光二, "高温ガス炉 HTTR を用いた水素製造システムの炉外実証試験計画," 原子力誌, 41, 3, 250-257 (1999).
- (16) H. Ohashi, Y. Inaba, T. Nishihara, T. Takeda, K. Hayashi, S. Takada, Y. Inagaki, "Development of control technology for HTTR hydrogen production system with mock-up test facility -System controllability test for loss of chemical reaction-," *Nucl. Eng. Des.*, 236, 13, 1396-1410 (2006).

- (17) リレーショナル化学災害データベース, (Online), Available from <<http://www.aist.go.jp/RIODB/RISCAD/>> (accessed 2006-12-1).
- (18) 失敗知識データベース, (Online), Available from <<http://shippai.jst.go.jp/fkd/Search>> (accessed 2006-12-1).
- (19) 高圧ガス保安協会ホームページ, (Online), Available from <http://www.khk.or.jp/activities/incident_investigation/hpg_incident/recent_hpg_incident.html> (accessed 2006-12-1).
- (20) 原子力機構ホームページ, (Online), Available from <<http://eventinfo.jnc.go.jp/index.html>> (accessed 2006-12-1).
- (21) 高圧ガス保安協会編, H17 年度事故事例検索システム(CD ロム), (2006).
- (22) 九州大学ホームページ, (Online), Available from <<http://www.kyushu-u.ac.jp/>> (accessed 2006-12-1).
- (23) Chemical Industries Association, "A Guide to Hazard and Operability Study," (1977).
- (24) 田中伸幸, 小貫薫, 清水三郎, 山口明久, "IS プロセス装置材料の高温硫酸中での耐食性 Alloy 800, Alloy 600, SUSXM15JISiC の耐食性," 材料と環境, 55, 320-324 (2006).

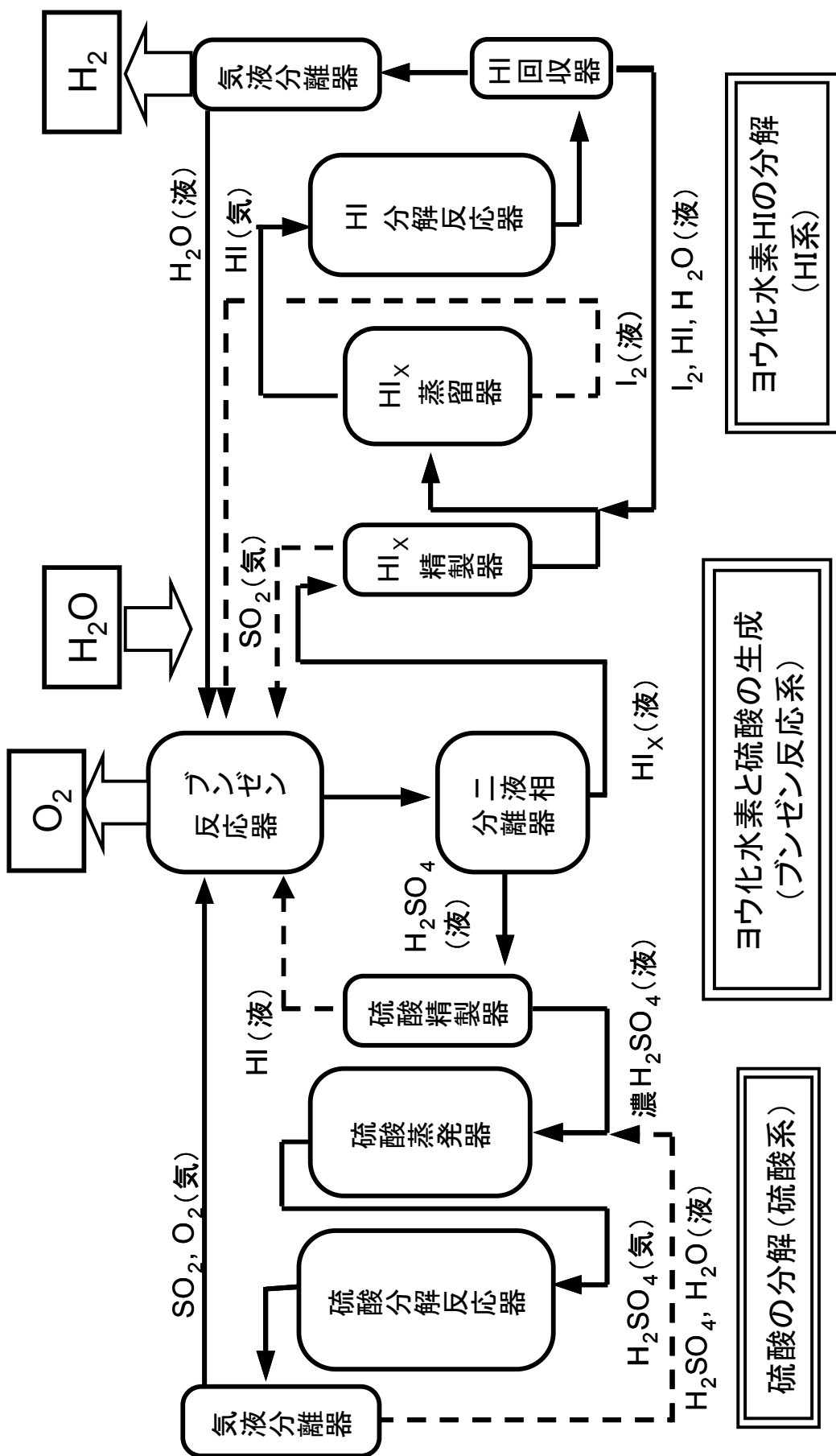


図1 ISプロセスの主要機器構成

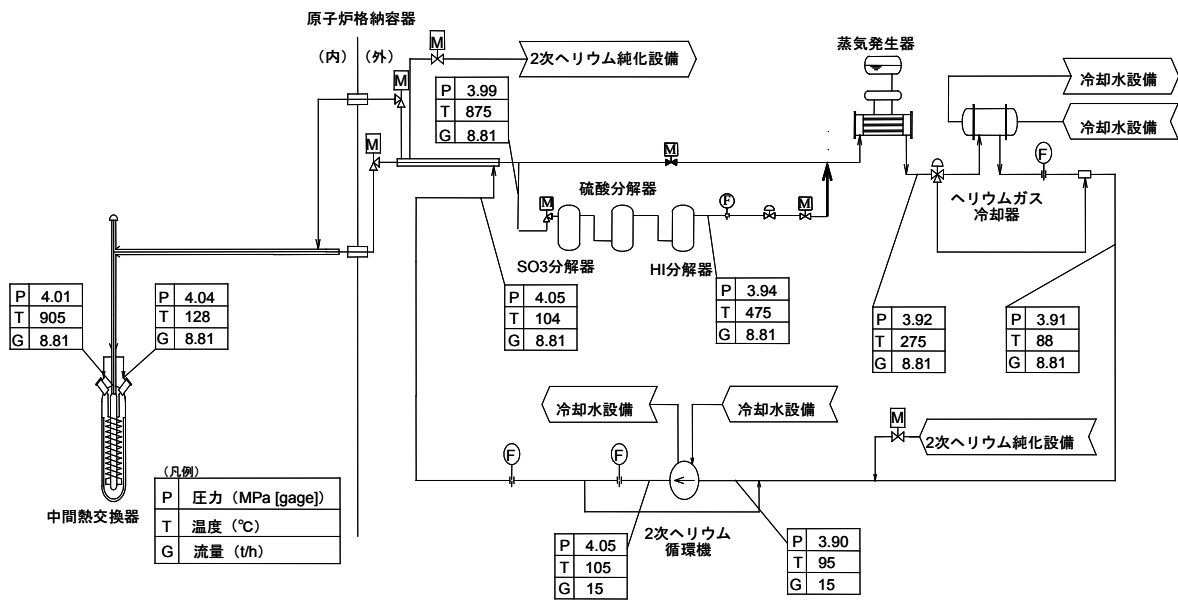


図2 HTTR-ISシステムの系統構成案 (HTTR 中間熱交換器より下流側を明示)⁽¹³⁾

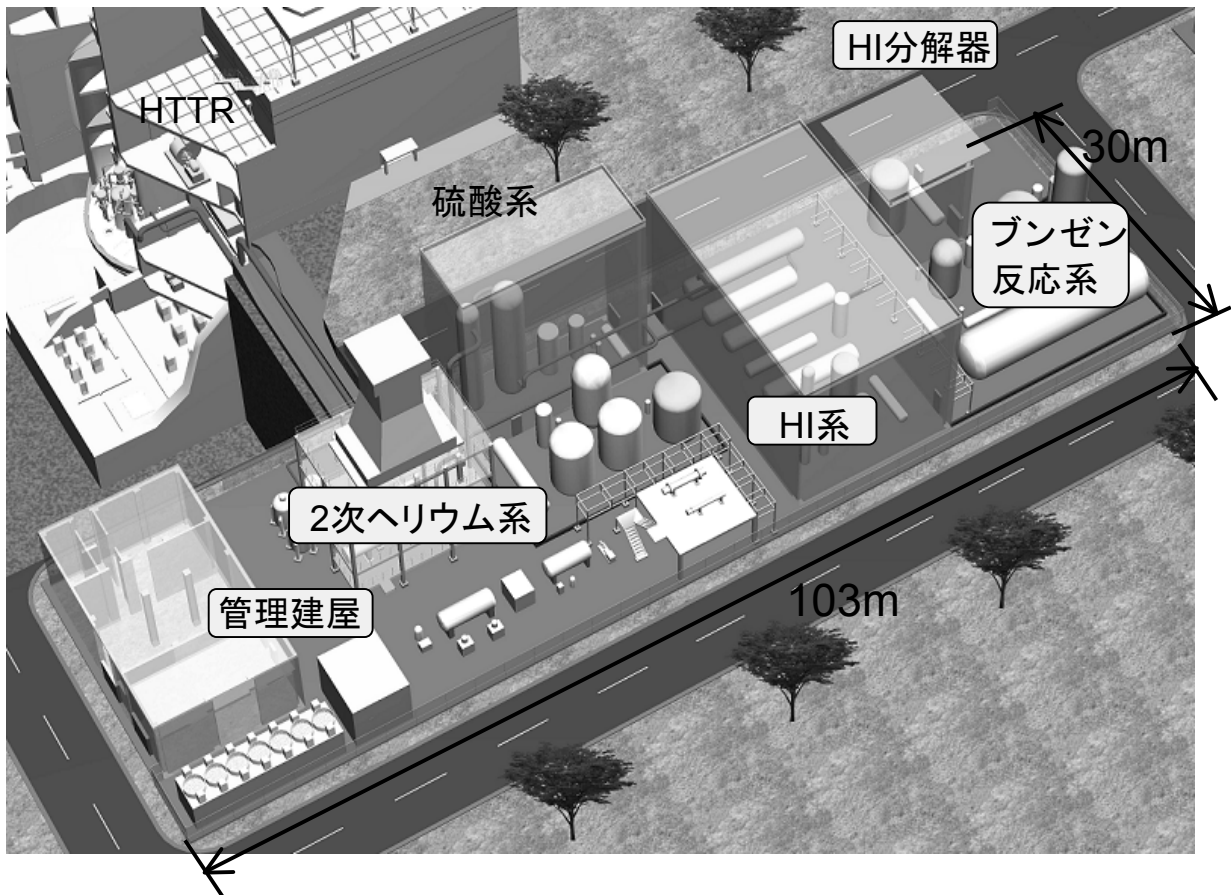


図3 HTTR-ISシステムの配置概念⁽¹²⁾

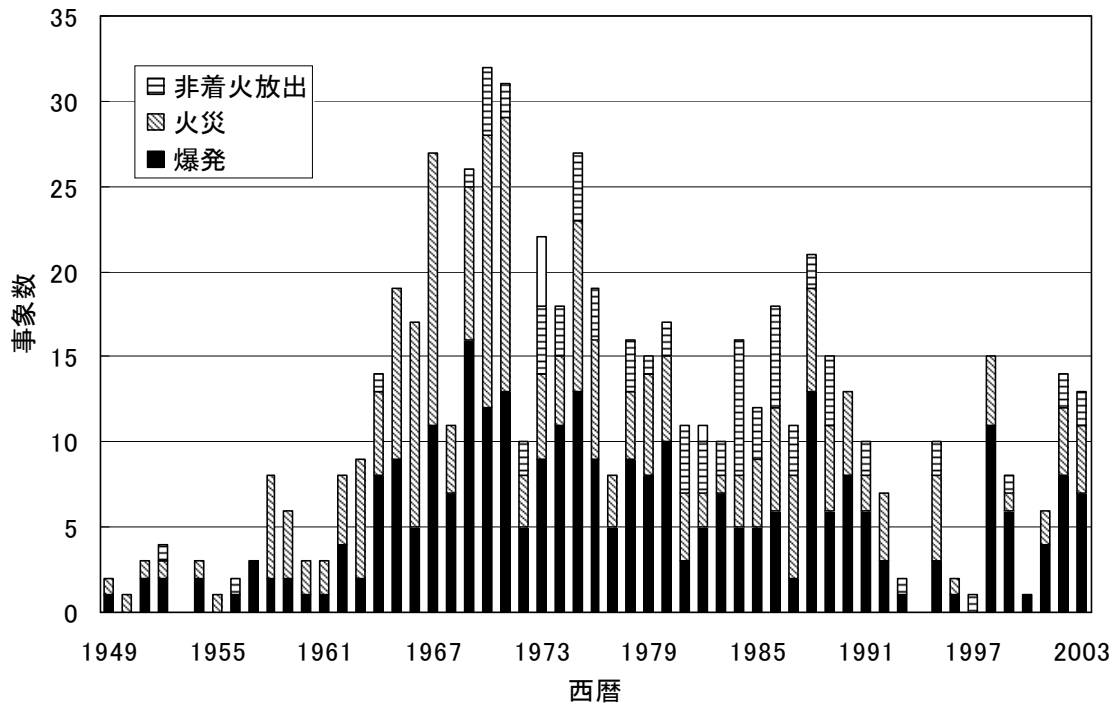


図4 化学工業の事故発生件数の推移(情報源:RISCAD⁽¹⁷⁾)

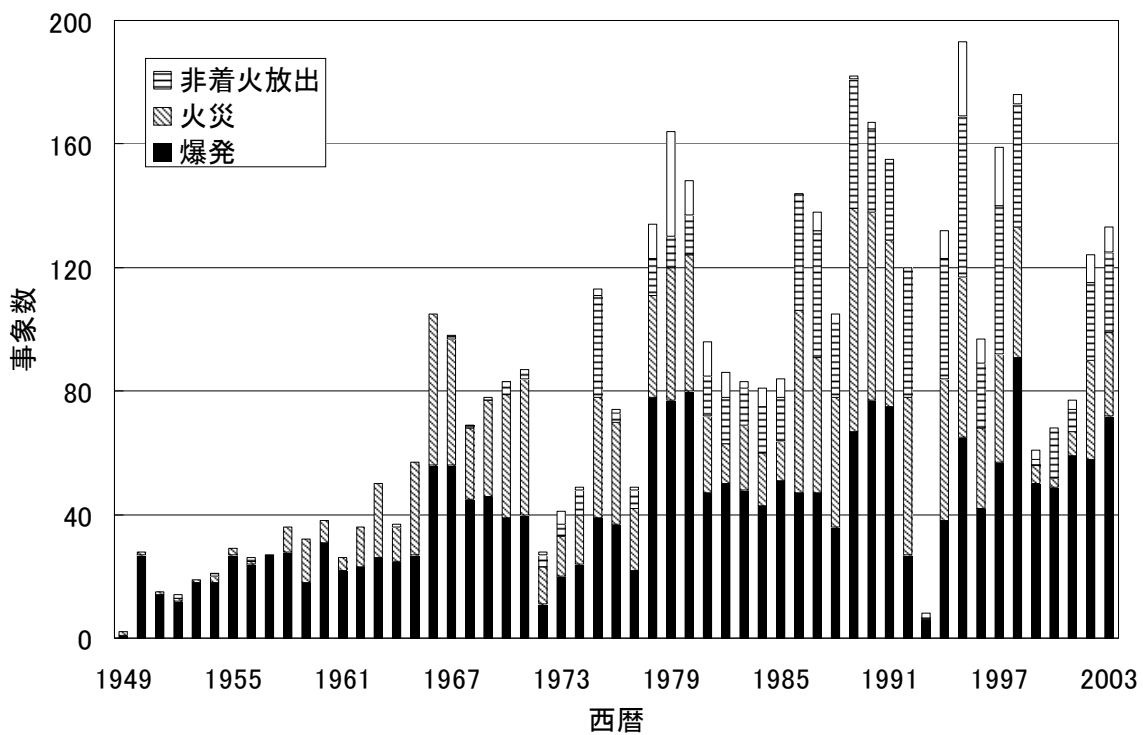
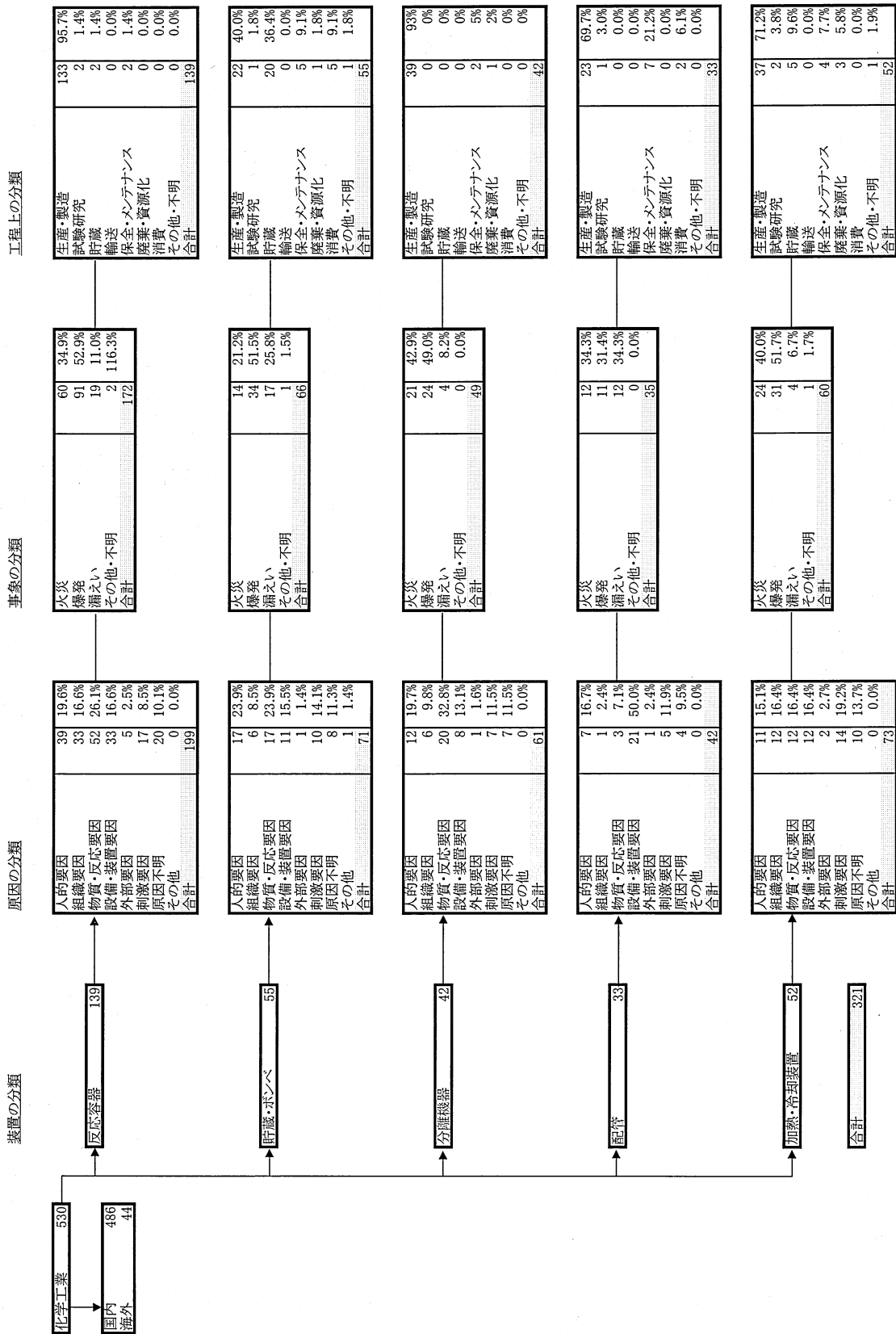


図5 一般産業全体の事故件数の推移(情報源:RISCAD⁽¹⁷⁾)



注記)原因の分類、事象の分類において、合計数が増えているのは重複して分類を行っているためである。

図6 化学工業における各装置の原因、最終事象、工程に分類される事故発生件数の分析

表1 業種の分類

コード	業種分類	コード	業種分類
1	農業	53	その他の卸売業
2	林業	54	各種商品小売業
3	漁業	55	織物・衣服・身の回り品小売業
4	水産養殖業	56	飲食料品小売業
5	金属鉱業	57	自動車・自転車小売業
6	石炭・亜炭鉱業	58	家具・じゅう器・家庭用機械器具小売業
7	原油・天然ガス鉱業	59	その他の小売業
8	非金属鉱業	60	一般飲食店
9	総合工事業	61	その他の飲食店
10	職別工事業(設備工事業を除く)	62	銀行・信託業
11	設備工事業	63	中小企業等金融業(政府関係金融機関を除く)
12	食料品製造業	64	農林水産金融業(政府関係金融機関を除く)
13	飲料・たばこ・飼料製造業	65	政府関係金融機関(別掲を除く)
14	繊維工業(衣服,その他の繊維製品を除く)	66	貸金業,投資業等非預金信用機関(政府関係金融機関を除く)
15	衣服・その他の繊維製品製造業	67	補助的金融業,金融附帯業
16	木材・木製品製造業(家具を除く)	68	証券業,商品先物取引業
17	家具・装備品製造業	69	保険業(保険媒介代理業, 保険サービス業を含む)
18	パルプ・紙・紙加工品製造業	70	不動産取引業
19	出版・印刷・同関連産業	71	不動産賃貸業・管理業
20	化学工業	72	洗濯・理容・浴場業
21	石油製品・石炭製品製造業	73	駐車場業
22	プラスチック製品製造業(別掲を除く)	74	その他の生活関連サービス業
23	ゴム製品製造業	75	旅館,その他の宿泊所
24	なめし革・同製品・毛皮製造業	76	娯楽業(映画・ビデオ制作業を除く)
25	窯業・土石製品製造業	77	自動車整備業
26	鉄鋼業	78	機械・家具等修理業(別掲を除く)
27	非鉄金属製造業	79	物品賃貸業
28	金属製品製造業	80	映画・ビデオ制作業
29	一般機械器具製造業	81	放送業
30	電気機械器具製造業	82	情報サービス・調査業
31	輸送用機械器具製造業	83	広告業
32	精密機械器具製造業	84	専門サービス業(他に分類されないもの)
33	武器製造業	85	協同組合(他に分類されないもの)
34	その他の製造業	86	その他の事業サービス業
35	電気業	87	廃棄物処理業
36	ガス業	88	医療業
37	熱供給業	89	保健衛生
38	水道業	90	社会保険,社会福祉
39	鉄道業	91	教育
40	道路旅客運送業	92	学術研究機関
41	道路貨物運送業	93	宗教
42	水運業	94	政治・経済・文化団体
43	航空運輸業	95	その他のサービス業
44	倉庫業	97	国家公務
45	運輸に附帯するサービス業	98	地方公務
46	郵便業	99	不明
47	電気通信業		
48	各種商品卸売業		
49	繊維・衣服等卸売業		
50	飲食料品卸売業		
51	建築材料,鉱物・金属材料等卸売業		
52	機械器具卸売業		

表 2 最終事象の分類

第 1 分類	第 2 分類
爆発	蒸気雲爆発
	沸騰液膨張蒸気爆発 (BLEVE)
	粉塵爆発
	ミスト爆発
	水蒸気爆発
	分解爆発
	破裂
	発破
	その他の爆発
火災	プール火災
	ジェット火災
	フラッシュ火災
	ファイアーボール
	その他の火災
非着火放出	漏えい(海洋・河川)
	漏えい(土壌・地面)
	漏えい(大気)
	漏えい(地下水)
	漏えい(その他)
その他・不明	

表3 装置の分類(1/2)

第1分類	第2分類	第3分類
反応容器および付属機器	バッチ反応器	常圧反応器(バッチ反応器)
		高压反応器(バッチ反応器)
	連続反応器	常圧反応器(連続反応器)
		高压反応器(連続反応器)
その他の反応容器		
貯槽・ポンペ	気体貯槽	常圧タンク(気体貯槽)
		高压タンク(気体貯槽)
		冷蔵タンク(気体貯槽)
		ポンペ
	液体貯槽	常圧タンク(液体貯槽)
		高压タンク(液体貯槽)
		冷蔵タンク(液体貯槽)
	固体貯槽	サイロ
		倉庫
制御機器	電気式制御機器	
	空気式制御機器	
	機械式制御機器	
分離機器	吸収、抽出、吸着塔	
	蒸留塔、蒸発器	
	ろ過機	
	遠心分離器	
固体処理装置	破砕機、粉碎機	ミル
		カッター
	集塵器	バグフィルター
		電気集塵器
		サイクロン
配管	配管、配管継手	直管
		エルボー(曲管)
		フレキ
		フランジ
		レデュース
		ティー(分岐管)
	バルブ	手動弁
		自動弁
加熱・冷却装置	熱交換器	加熱装置
		冷却装置
	炉	加熱炉
		焼却炉
	乾燥機	真空乾燥機
		常圧乾燥機
	冷却装置	冷却機
		冷凍機

表 3 装置の分類(2/2)

第1分類	第2分類	第3分類
原動機	発電機	
	モータ	
	エンジン	
	タービン	蒸気タービン ガスタービン
移送機器	液体移送装置	
	粉体移送装置	
	気体移送装置	
安全装置・設備	圧力安全装置	安全弁
		破裂板
		圧力放散口
	緊急遮断・停止装置	緊急遮断弁
		インターロック
	除害装置	中和装置
		フレアースタック
		集塵装置
		スクラバー
	抑制装置	爆発抑制装置
	緊急冷却装置	液抜きピット
	消火設備	消火栓
		スプリンクラー
	漏洩・拡散防止(検知)装置	框
防油堤		
キャッチタンク		
スチームカーテン		
ガス検知警報設備		
輸送装置	航空機	旅客機
		輸送機
		ヘリコプター
	船舶	客船
		コンテナ船
		タンカー
	自動車	ローリー
		トラック
		フォークリフト
	貨物列車	タンカー
		コンテナ
	その他の輸送装置	
	装置無し	#
その他・不明	#	

表 4 工程の分類(1/2)

第1分類	第2分類	第3分類
生産・製造	反応	バッチ反応
		連続反応
		その他の反応
	分離	蒸留
		ろ過
		遠心分離
		その他の分離
	移送・移動	粉体移送
		気体移送
		液体移送
		その他の移送・移動
	乾燥	
	粉砕	
	回収、抽出、除害	吸収
		吸着
		洗浄
		中和
		集塵
	操作	小分け
		混合
		洗浄
		濃縮
		仕込み、取り出し
		スタートアップ、シャットダウン
		試運転
		その他の操作
	その他の生産・製造	火工品製造
煙火製造		
加熱・冷却		
試験研究	試験、分析	前処理
		試験・分析
	実験	ラボスケール
		その他スケール

表 4 工程の分類(2/2)

第1分類	第2分類	第3分類
貯蔵	液体貯蔵	タンク(固定式)
		缶、瓶
		ボンベ(液体貯蔵)
	気体貯蔵	タンク
		ボンベ(気体貯蔵)
	固体貯蔵	ペレット
		粉体
		バルク
		梱包品
	その他の固体貯蔵	
その他の貯蔵		
輸送	移動	航空機輸送
		船舶輸送(海上、河川)
		列車輸送
		車両輸送
	荷役作業	
	パイプライン	液体輸送
気体輸送		
その他の輸送		
保全・メンテナンス	点検・検査	
	清掃	
	修理・改修	
廃棄・資源化	焼却	
	中間処理	
	最終処分	
	資源化	
	収集・運搬	
	保管	野積み
		容器
その他の廃棄・資源化		
消費	販売、取付け	
	使用	
	火薬類消費	発破
		煙火消費
	その他の消費	
その他・不明		

表 5 推定原因の分類

第1分類	第2分類	第3分類
人的要因	不適切な行動・操作	情報伝達・受取りミス
		操作・作業ミス
		判断・決定のミス
		操作能力の喪失・欠落
		その他の不適切な行動・操作
組織要因	その他の人的要因	
	安全管理不備	訓練・教育不足
		管理手法ミス
	設計ミス	組織体制の欠陥
事前評価不足		
	設備設計ミス	
	条件設定ミス	
物質・反応要因	混合系反応	誤混合
		不純物との接触による反応
	自己反応	分解
		重縮合
	発火	
	可燃性混合気の形成	
設備・装置要因	制御系不良	コンピューター誤作動・不具合
		制御不十分・不良
	機器不良	電氣的故障
		機能不良・喪失
		部品劣化・損傷
	材料損傷	疲労
		腐食
	変質	
	その他の材料損傷	
外部要因	自然災害	異常気象
		地震
		その他の自然災害
	交通事故	
	意図的原因	テロ
		放火
刺激要因	機械力	打撃
		摩擦
		衝撃
	点火源	火炎
		火花
		高温物体
		静電気
光		
蓄熱		
その他の刺激要因		
原因不明	特定困難	
	不明	
その他	#	

表6 事故事例データベースの集約(反応容器および付属機器)(1/3)

No.	発生日	発生日	発生国	事故名称	事故原因分類							事故要因分析	HTTR-ISシステムでの同類事故の可能性		RISCAD 事故ID
					人的	組織	物質 反応	設備 装置	外部	刺激	不明		その他	可能性 判定	
1	2002	日本	日本	製薬工場での爆発	○					○			引火の可能性のある危険物の取り扱い時に静電気で引火したものであり、作業実施上の安全管理が不相当で不十分		6038
2	2002	日本	日本	繊維原料工場から硫酸が漏えい			○						硫酸除去装置の一部が壊れ、これが原因の漏えい。壊れた原因には触れられていないが腐食が原因の可能性が高い	○	6060
3	2002	韓国	韓国	韓国の日系化学工場での爆発			○	○					試験中の事故。過熱が原因で制御装置が異常を起こして制御不良となったもの。また、近くの装置が連鎖爆発しており、被害が拡大	○	6089
4	1999	日本	日本	ポリエチレン製造中の火災事故							○		原因不明		4877
5	1998	日本	日本	界面活性剤製造装置処理槽火災	○								不適切作業にて反応器内に空気を侵入させ、爆発雰囲気を作り、静電気で引火したもの。判断や決定のミス	○	43
6	1998	日本	日本	ナフタリン酸化反応設備破裂			○						バルブ不具合が1次要因であるが、これが原因で続けて生じたポンプのキャピテーション、反応状態の変化、制御系の弁調整による爆発雰囲気形成、静電気で着火などが連鎖的に起り事故環境を作ったもの	○	44
7	1998	日本	日本	シヤンプー原料混合中の爆発事故	○								化学薬品の混合を誤った人的ミス		4840
8	1998	日本	日本	難燃材製造中の塩化水素ガスの爆発事故						○			反応器温度の異常上昇。原因は不明		4843
9	1997	日本	日本	反応釜中での薬品混合工程における硫化水素ガス漏えい事故			○						硫化水素ガスが吸収装置が取り付けられていたにもかかわらず、機器不良により漏れたもの	○	4562
10	1992	日本	日本	配管から漏えいした水素の爆発火災事故			○						配管溶接部が塩素により応力腐食割れを起こして水素が漏えいした	○	50
11	1992	韓国	韓国	ポリオール重合中の爆発・火災	○								運転再開時に投入量や操作ミスが重なったもの。また、反応器の温度上昇時に制御が効かない状況となったもの	○	107
12	1992	日本	日本	フェニレンスルフィド合成中の発火	○								作業員が持ち場を離れたことによる人的災害		195
13	1991	日本	日本	ジソプロピルパーオキシドカーボネイト反応槽の爆発事故			○						反応器の温度管理が不十分であり、それが要因となつて可燃性の分解ガスが発生したもの		75
14	1991	日本	日本	シアノノルボルネン製造中の爆発	○								操業2バッチ目の事故で不慣れによる操作ミスが原因		113
15	1990	日本	日本	過酸化水素の爆発			○						詳細不明		134
16	1990	日本	日本	ジメチルジブチルペルオキシルキシシンの爆発			○						不純物との接触による反応が原因と推定		226
17	1990	日本	日本	医療中間体製造中の爆発	○		○						材料腐食と安全管理不備		194

表6 事故事例データベースの集約(反応容器および付属機器)(2/3)

No.	発生年	発生国	事故名称	事故原因分類						事故要因分析	HTTR-ISシステムでの同類事故の可能性		RISCAD 事故ID
				人的	組織	物質 反応	設備 装置	外部 刺激	不明		その他	可能性 判定	
18	1989	日本	酸化水素合成樹脂製造装置からの危険物漏えい事故			○				触媒の投入量が多く、急激な反応によって、反応槽に穴があいたもの	○	54	
19	1989	日本	フッ素ゴム重合用混合モノマの充填容器加温中の容器爆発事故						○	原因不明		3911	
20	1989	米国	ポリエチレン製造中の爆発		○					原因不明		104	
21	1988	日本	澱粉分解反応缶の破裂	○						反応機に冷却水を循環(自動冷却)に切り替えさせていない単純人的ミス		7	
22	1988	日本	ゴムの加硫促進剤製造工場での反応物移し変え中の爆発事故	○						通常操作の中に不適切な行動・操作があったと考えられるもの。詳細不明		3733	
23	1988	日本	塩素化パラフィンの発火			○				詳細不明		120	
24	1988	日本	硝酸ナトリウムを主剤とする剥離剤の爆発	○		○				詳細不明		239	
25	1987	日本	過酸化ナトリウム溶液の加熱混合工程における火災事故			○				詳細不明		3577	
26	1986	日本	重合器フレンジのガスケット部分の老化に伴うエチレンオキシド爆発事故				○			反応器のフレンジのガスケット部分の老化により可燃物が噴出し、静電気により着火爆発したもの	○	18	
27	1986	日本	水蒸気反応タンク内で触媒(パラジウムアルミナ)抜き出し中の火災			○				活性化された触媒に空気が入り込んだことにより乾燥し発火したもの	○	21	
28	1986	日本	o-ニトロクロロベンゼンの爆発			○				配管中に固体物が詰まり、配管の開塞が生じたもの。通常の反応では想定していない不純物が実際には生成	○	198	
29	1985	日本	異常反応によるオートクレーブの爆発事故							異常反応にて、急激に温度及び圧力が上昇したため、安全弁の作動が間に合わず爆発	○	3325	
30	1984	日本	ジメチルスルホキシドと水素化ナトリウム混合物の爆発		○					反応が制御を超えて進んだもの	○	204	
31	1984	日本	反応器への仕込み中におけるカリウムターシャリーブトキシドの漏えい事故		○					作業員の不適切作業		3312	
32	1983	日本	AS樹脂製造中の爆発					○		停電により、反応制御ができなくなり、反応が進行してしまつたもの	○	102	
33	1983	独国	ニトロアントラキノン製造中の爆発		○					テスト運転中の誤動作	○	157	
34	1982	日本	医薬品試作中発生した水素ガスが静電気火花により爆燃			○				水素ガスが発生し、静電気で着火したもの。詳細は不明		33	

表6 事故事例データベースの集約(反応容器および付属機器)(3/3)

No.	発生年	発生国	事故名称	事故原因分類							事故要因分析	HTTR-ISシステムでの同類事故の可能性		RISCAD 事故ID
				人的	組織	物質 反応	設備 装置	外部 刺激	不明	その他		可能性 判定	HTTR-ISシステムで懸念される事象	
35	1982	日本	攪拌タンクのダクト内の可燃性ガスへ引火、 爆発	○										35
36	1982	日本	終業中の溶解釜内の火災			○						○	装置停止時に局所的に反応が進んでしまったもの	36
37	1981	日本	攪拌タンク内の硝化綿の自然発火			○							保管状況不良による自然発火	40
38	1980	日本	α-ピネンの爆発		○								詳細原因不明	202
39	1980	日本	内圧上昇での反応釜破砕による(αピネン +活性白土)の火災事故										原因不明	2988
40	1980	日本	遠心分離機に注入中におけるトルエン、テト ラヒドロフランの火災事故										原因不明	2966

表7 事故事例データベースの集約(貯蔵・ポンプ)(1/2)

No.	発生年	発生国	事故名称	事故原因分類					事故要因分析	HTTR-ISシステムでの同類事故の可能性		RISCAD 事故ID	
				人的	組織	物質 反応	設備 装置	外部 刺激		不明	その他		可能性 判定
1	2003	日本	化学工場で定期整備中のタンクから硫化水素が漏えい	○						定期整備のため上部の板を外したところ硫化水素が噴出したもの	○	タンク開放時の残留物の噴出	6244
2	1999	日本	定期点検中のクレオソート剤タンクの爆発事故			○				定期点検時に沈殿物である不純物を含む化学原料が少しずつ熱を蓄え、自然発火した可能性がある	○	容器に蓄積した不純物の開放時の反応促進発熱や着火	4844
3	1999	日本	不溶性硫黄貯蔵タンク検査中の二硫化炭素の爆発事故							定期検査中にタンク内に残っていた可燃物に火がついたもの	○	同上	4852
4	1998	中国	液体窒素タンクの爆発事故							原因不明			4568
5	1998	日本	貯蔵中の灯油の爆発および延焼事故	○						灯油タンクに何かの火が着火して爆発したもの			4836
6	1996	日本	反応器爆発事故			○				窒素シールの不完全による引火爆発などが想定される			80
7	1995	日本	阪神大震災における窒素ガス充填設備の容器からの窒素ガス漏えい事故					○		阪神大震災が原因となり容器からのガス漏えいが発生したもの	○	大地震による機器や配管の破損。	4501
8	1993	日本	エポキシ樹脂製造設備爆発火災			○				漏れ込みにより異常反応を起こし、噴出と静電気による着火			78
9	1991	日本	溶接作業中における漏えいガスへの引火爆発事故	○						溶接作業中にガスが漏えいして引火したもの			4312
10	1990	米国	廃水タンクの爆発	○						不適切な作業を行った人的要因			121
11	1990	日本	バルブ閉止不完全の酸素アセチレンバーナー吹管からの漏えいアセチレンガスへの引火爆発事故	○				○		同上			4168
12	1990	日本	バルブ開放作業中のモンランガス漏えいによる自然発火火災事故	○						同上			4061
13	1989	日本	容器肩部の可溶栓からの黒煙噴出事故							バルブを急激に開いたことにより高压ガスが噴出し、摩擦熱、あるいは断熱圧縮熱が発生したもの			3909
14	1988	日本	過酢酸製造プラントの爆発			○				移送中のオーバーフロー			125
15	1988	日本	残留過酸化水素水の分解による真空用クッションタンク内の圧力上昇による爆発事故				○			容器の腐食部からの流出	○	腐食による漏えい	3822
16	1988	日本	LPガスバーナーライザーの液量調整弁内の亀裂からのガス漏えい事故				○			弁内の腐食損傷部からの漏えい	○	腐食による漏えい	3790
17	1987	日本	ハイボ液製造作業中の塩素ガスの漏えい事故	○						温水の温度が上昇して安全栓が溶けたもの	○	安全機器他の設計条件を越えた異常反応の発生	3588

表7 事故事例データベースの集約(貯蔵・ポンプ)(2/2)

No.	発生年	発生国	事故名称	事故原因分類						人的	組織	物質 反応	設備 装置	外部 刺激	不明	その他	事故要因分析	HTTR-ISシステムでの同類事故の可能性		RISCAD 事故ID
				人的	組織	物質 反応	設備 装置	外部 刺激	不明									その他	可能性 判定	
18	1987	日本	ガス溜め用タンクにおける異常昇圧による塩素ガスの漏えい事故													原因不明			3683	
19	1985	日本	アルキルアルミニウム漏えい火災	○												分解点検中に充分なガス抜きができなかったことによる人的要因	○	メンテナンス等時の機器分解作業条件が不十分で、残留物が残存	22	
20	1985	日本	ガス管切断によるリン酸貯蔵用銅板製タンクでの火災事故	○												ガス管切断による人的要因			3376	
21	1984	印国	ボパールでのインシアン酸メチル漏えい事故	○	○											プラント自体の安全設計ミス			73	
22	1984	印国	インシアン酸メチル貯蔵中の漏えい			○	○									材料腐食による漏えい	○	腐食による漏えい	193	
23	1983	日本	木板でたたいた衝撃による残葉の爆発事故	○		○										作業者の作業が規則を外れたことによる			3237	
24	1982	不明	ニトログリセリン廃酸の爆発			○							○			詳細不明			152	
25	1981	日本	塩素容器の充填作業中における減圧用ブロー管からのガス漏えい事故	○												作業員の操作ミス			3002	
26	1980	日本	5-クロロ-1,2,3-チアジアゾールのアミノ化反応中の爆発													詳細不明			200	

表8 事故事例データベースの集約(分離機器)

No.	発生年	発生国	事故名称	事故原因分類						事故要因分析	HTTR-ISシステムでの同類事故の可能性		RISCAD 事故ID
				人的	組織	物質 反応	設備 装置	外部 刺激	その他 不明		可能性 判定	HTTR-ISシステムで懸念される事象	
1	2000	日本	ヒドロキシルアミンの爆発事故							原因不明			83
2	1998	日本	遠心分離機火災	○						バルブの閉め忘れにて空気の混入により爆発混合ガス形成			41
3	1991	米国	酸化エチレンの爆発			○	○			定期補修後の事故。機器不良や不純物との接触が原因			139
4	1989	ベルギー	酸化エチレン製造中の爆発			○	○	○		蒸留塔での不純物との接触が原因と見られる			138
5	1988	日本	危険物製造所(高沸点減圧連続蒸留設備)の爆発炎上				○			制御不良により蒸留塔温度が上昇して、高沸点物質が発熱反応を起こした	○	温度や圧力が制御範囲を外れた場合の2 次的な反応の発生懸念	1
6	1987	英国	水素化分解装置の爆発・火災	○						装置が異常を示したが異常を確認できずに安易に運転の再開を行った判断ミス			146
7	1985	日本	エピクロヒドリンとジメチルスルホキシド共存系の爆発			○				詳細不明			115
8	1985	日本	ブロムメチレンジオキシベンゼンの爆発		○	○				設計ミス。詳細不明			169
9	1984	日本	植物油重合物の酸化発熱による自然発火			○				空気流入と装置内残熱により酸化が促進され、発火したものの			27
10	1983	日本	吸着塔のタール分の発火			○				詳細不明			192
11	1982	英国	過プロピオン酸の爆発		○	○				設計ミスとあるが、詳細は不明			141

表9 事故事例のデータベースの集約(配管)(1/2)

No.	発生年	発生国	事故名称	事故原因分類						事故要因分析	HTTR-ISシステムでの同類事故の可能性		RISCAD 事故ID
				人的	組織	物質 反応	設備 装置	外部 刺激	不明 その他		可能性 判定	HTTR-ISシステムで懸念される事象	
1	1999	日本	配管補修中の蒸気の噴出事故	○		○				操作ミスとバルブ損傷が重なった漏えい事故		4845	
2	1998	日本	ガス発生剤製造中の爆発事故						○	原因不明		4839	
3	1995	日本	反応器火災事故	○						保全工事を電動ポンプで行ったため、火花が反応器の可燃性ガスに引火したもの	○	47	
4	1995	日本	阪神大震災における水素製造設備からの水素ガス漏えい事故					○		地震によりバルブステーションのねじ継手からの水素漏えい	○	4504	
5	1991	日本	矢板打込準備作業中における埋設窒素導管の破損によるガス漏えい事故	○						ミスによる配管の破損		4251	
6	1991	日本	ガス充填溶着機ターミネータブル上のガスへの引火による爆発事故					○		静電気が原因の引火		4257	
7	1989	米国	米国石油会社でポリエチレン製造工場大爆発	○						ラインの取付ミスにより、可燃性ガスの噴出が発生したもの	○	76	
8	1989	日本	ジクロロブテン製造施設における液体塩素受入配管からのガス漏えい事故				○			配管の結露による外面腐食によるピンホールの発生	○	3880	
9	1989	日本	液体塩素貯槽の払い出しポンプ冷却ラインパイプの破孔による液体塩素漏えい事故				○			配管の外面腐食による減肉化	○	3924	
10	1986	日本	触媒の自然発火による火災			○				設備内洗浄により触媒が活性化され、また、バルブをとおして空気が侵入したため、発火したもの	○	34	
11	1986	日本	合成ガス配管からの漏えいガスへの静電着火による爆発事故			○				配管への亀裂	○	3522	
12	1986	日本	テレフタル酸製造工程中の酢酸スラリー漏えい事故	○			○			スラリーによる配管の詰まりが原因で原料と酸化用空気のバランスが崩れて発熱したもの	○	3465	
13	1985	日本	配管腐蝕による移送配管からの液化塩素漏えい事故				○			配管の雨水等による腐食	○	3331	
14	1985	日本	曲り部分の配管肉厚の減少による漏えい水素ガスの爆発事故				○			腐食と触媒の流動による磨耗の相乗効果により配管肉厚が極端に減少したもの	○	3367	
15	1985	日本	塩素配管の弁のリークにより移動した残留水素の爆発事故				○		○	弁のリークにより水素が移動して爆発雰囲気を形成したもの	○	3358	
16	1984	日本	フロン113、114製造プラントの運転中における配管損傷による塩素ガス漏えい事故				○			腐食ガスである塩素と配管材の鉄の反応による腐食	○	3258	
17	1984	日本	ガスケット劣化による環流塔でのフロンガス噴出事故				○			水分とフッ化水素との反応熱によりガスケットが劣化	○	3298	
18	1984	日本	液抜き配管の部分破損による液体酸素噴出事故				○			残留不純物の濃縮と着火	○	3285	

表9 事故事例のデータベースの集約(配管)(2/2)

No.	発生年	発生国	事故名称	事故原因分類							事故要因分析	HTTR-ISシステムでの同類事故の可能性		RISCAD 事故ID
				人的	組織	物質 反応	設備 装置	外部 刺激	不明	その他		可能性 判定	HTTR-ISシステムで懸念される事象	
19	1982	日本	脱水機点検中におけるガスと製品の噴出事故				○					機器不良		3127
20	1981	日本	水素主成分の混合ガス漏えいによるメタノール製造設備での中毒事故				○				配管フランジ部からのガスの漏えい		3013	
21	1980	日本	試運転中におけるステンレス製高圧パイプの爆発事故							○	原因不明		2954	
22	1980	日本	リボイラーフランジ部からの漏えいによる火災事故							○	原因不明		2985	

表10 事故事例のデータベースの集約(加熱冷却装置)(1/2)

No.	発生年	発生国	事故名称	事故原因分類					事故要因分析	HTTR-ISシステムでの同類事故の可能性		RISCAD 事故ID
				人的	組織	物質 反応	設備 装置	外部 刺激		不明 その他	可能性 判定	
1	2002	日本	放射性物質焼却装置の排気管が破裂			○	○			・焼却装置の事故 ・電気系統の設備不良にて気化物質の濃度が増したものの		6049
2	2001	日本	メッキ工場で爆発						○	原因不明		6008
3	1998	日本	スチレンモノマープラントの燃焼炉の爆発事故						○	原因不明		4592
4	1998	日本	ビタミン剤製造中の乾燥機の爆発事故	○						・乾燥機の事故 ・詳細不明		4832
5	1995	日本	天然ガス処理プラントの運転中における再生ガスヒータ亀裂からのガス漏えい火災事故				○			再生ガスヒータの事故		4522
6	1995	日本	燃焼装置への接続不完全による漏えいガスへの焼却炉残火の引火火災事故				○			燃焼装置へ接続が不完全で外れたもの		4540
7	1992	日本	熱交類の増締め作業中における爆発火災事故						○	原因不明		4392
8	1991	日本	アンモニア合成装置使用中における配線管からの漏えいガスへの引火事故	○						加熱炉の定期修理終了後、配線管のつなぎ目からガスが漏れたもので、作業不良	○	4205
9	1989	日本	クレゾール化合物製造中での乾燥機の爆発			○				・乾燥機事故 ・残留物と新規導入物が反応		2
10	1988	日本	感光材中間体(NAS-5)を熱風乾燥中出火		○					・乾燥機事故 ・乾燥機フィルタの目詰まり		6
11	1988	日本	クメンヒドロペルオキシドの爆発・火災		○	○				・熱交換器の設計ミス ・詳細不明		143
12	1988	日本	N-ニトロソメチルウレアの爆発			○				冷蔵庫事故		186
13	1988	日本	繊維会社におけるアルミニウムとはく離剤の反応による加熱炉の爆発事故			○				・加熱炉事故 ・炉内に入れた物質同士が反応		3738
14	1986	日本	製造所における作業工程中の火災		○					加熱炉内が過熱され、温度が上昇		16
15	1986	日本	過酸化ベンゾイルを小分け作業中の爆発事故						○	原因不明		3527
16	1985	日本	ダクト火災			○				・乾燥炉事故 ・付着物と仕込物の反応		24
17	1984	日本	医薬品の中間原料を製造中、その最終工程(乾燥)で粉塵爆発		○					・乾燥機事故 ・粉体に着火		26
18	1982	日本	栓が不十分であったことによるエチルエーテル漏えい・爆発事故	○						試験管の栓が不十分で漏えい		3163

表10 事故事例のデータベースの集約(加熱冷却装置)(2/2)

No.	発生年	発生国	事故名称	事故原因分類						事故要因分析	HTTR-ISシステムでの同類事故の可能性		RISCAD 事故ID	
				人的	組織	物質 反応	設備 装置	外部 刺激	不明		その他	可能性 判定		HTTR-ISシステムで懸念される事象
19	1981	日本	設計ミスによる水蒸気爆発に伴うスポンジチタン製造工場の火災		○						乾燥機の設備設計ミス			37
20	1981	日本	アルゴンガス流入での圧力・温度上昇による真空乾燥機でのガス噴出事故	○							・真空乾燥機 ・バルブ操作ミス			3083
21	1980	日本	耐圧試験の準備中における残留ガス爆発事故	○							残留ガスが乾燥炉バーナーの火に引火			2906
22	1980	日本	排ガス燃焼中におけるダクト破壊事故				○		○		炉で燃焼中に排ガスがダクトから漏えい			2967
23	1980	ベルギー	脱水気流乾燥機でのMBSの爆発事故						○		乾燥機事故			2973

表 11 HTR-ISシステム事故防止対策への提案(1/3)

番号	事故要因	類似事故件数	HTR-ISシステムで懸念される事故事象	HTR-ISシステム事故防止対策提案			運転・保全
				事前評価・開発等	ソフト	ハード	
1	材料腐食や熱劣化による漏えい	12	<ul style="list-style-type: none"> 硫酸、H₂等の高腐食性ガスおよび溶液による構成機器、配管・弁、シール材等の腐食・破損・漏えい 高温部でのクリープによる材料破損 	<ul style="list-style-type: none"> 耐食性の悪い材料の開発 異常運転条件下での材料評価試験による設計データの取得 動特性解析等による漏えい発生時のシステム挙動の事前評価 	漏えい発生時の制御設計	<ul style="list-style-type: none"> (a) ガスの場合 <ul style="list-style-type: none"> 漏えい検知器の設置 拡散防止フードの設置 排気システムの設置 (b) 液の場合 <ul style="list-style-type: none"> 溢れ防止堰の設置 漏えい検知器の設置 ドレン設備の設置 	<ul style="list-style-type: none"> 非破壊検査等による容器・配管等の減肉量の定期測定 交換基準の整備 腐食・漏えい発生時の対応・運転手順の整備 (被害の最小化)
2	定期検査時の装置内残留物の噴出、発熱、着火など	7	<ul style="list-style-type: none"> 硫酸等の副物の残存、点検時の噴出 残存水素ガス等の着火・爆発など 	—	<ul style="list-style-type: none"> 圧力監視、ガス検知信号に基づきインタロック(警告システム)の設定 	<ul style="list-style-type: none"> (a) ガス検知器の設置 (SO₂、水素検知器等) (b) 直火防止 <ul style="list-style-type: none"> 機器配管の分離配置 防塵仕様の採用 	<ul style="list-style-type: none"> 点検手順(機器の開放手順)の整備 残留物質排出手順 残留物質の有無の確認手順
3	事故の連鎖による被害の拡大	1	<ul style="list-style-type: none"> 系統内での局所的な機器破損→圧力低下(上昇) <ul style="list-style-type: none"> ⇒系統全体の圧力変化(異常環境の拡大) 水素発生・送付部での爆発事故発生 <ul style="list-style-type: none"> ⇒他工程の配管破損・硫酸等の副物の漏えい(連鎖事象) 	<ul style="list-style-type: none"> 動特性解析等による異常発生時の挙動の事前評価 	<ul style="list-style-type: none"> 圧力計、流量計信号に基づくインタロックの設定 	<ul style="list-style-type: none"> 系統のセグメント化(隔離範囲の設定) (例:可燃性ガス(水素)発生・送付部とそれ以外の機器配管の分離配置) 開発結果に基づき計測機器(インタロック用)の設置 	<ul style="list-style-type: none"> システム停止手順の整備
4	可燃・爆発雰囲気形成と静電気や熱源接触による着火	1	<ul style="list-style-type: none"> 水素発生・送付部への空気の混入による爆発雰囲気の形成 静電気や熱源接触による着火・爆発 	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 水素発生機器や水素伝送配管の二重管の採用等による水素漏えいや大気の漏れ込み抑制 水素発生・送付部機器は防爆仕様の採用 漏えい検知器の設置 強制排気システムの設置 	<ul style="list-style-type: none"> 水素漏えい時のシステム停止手順の整備
5	反応異常による制御不能・暴走、腐食の加速など	6	<ul style="list-style-type: none"> 異常反応による制御不能や暴走 腐食環境の形成 <ul style="list-style-type: none"> ⇒原材料含有不純物の蓄積、触媒性能の変化、外部からの大気等の混入などが引き起こされるもの 	<ul style="list-style-type: none"> 不純物や大気混入時の反応および腐食への影響の解析・試験評価 動特性解析等による反応率上昇(低下)時のシステム挙動の事前評価 	<ul style="list-style-type: none"> 開発結果の制御設計への反映(インタロックの設定) 	<ul style="list-style-type: none"> 開発結果に基づき計測機器(インタロック用)の設置 	<ul style="list-style-type: none"> 運転中の物質組成等の定期的モニタリング(異常事象の早期検出)
6	過熱等が原因となった制御センサの異常	2	<ul style="list-style-type: none"> 高温場や腐食環境での制御用センサの損傷(動作不良含む)による制御不能 	<ul style="list-style-type: none"> 実環境条件下での耐久性能試験評価による適用条件の明確化(機器選定) 	<ul style="list-style-type: none"> 制御機器多重化に対応した制御ソフト設計 	<ul style="list-style-type: none"> 動作不良を想定した重要制御機器の多重化 	<ul style="list-style-type: none"> 交換基準の整備
7	配管の目詰まり・閉塞	2	<ul style="list-style-type: none"> 腐食物や不純物の濃縮による配管や弁などの目詰まり・閉塞による動作不良 	<ul style="list-style-type: none"> 腐食物や不純物などの目詰まりの原因物質を抑制する機器材料や原料物質の選定 試験的な目詰まり要因(固体、化学物質)発生の確認・評価 	<ul style="list-style-type: none"> 差圧計信号に基づくインタロックの設定 	<ul style="list-style-type: none"> 開発結果の機器設計(機器材料)への反映 <ul style="list-style-type: none"> 不純物除去用フィルタの設置 目詰まり評価用差圧計の設置 	<ul style="list-style-type: none"> 定期検査時の非破壊検査等による目詰まり状況の定期測定

表11 HTR-ISシステム事故防止対策への提案(2/3)

番号	事故要因	類似事故件数	HTR-ISシステムで懸念される事故事象	HTR-ISシステム事故防止対策提案			運転・保全
				事前評価・開発等	ソフト	ハード	
8	安全機器の動作不良	2	HTR-ISシステムで懸念される事故事象 異常時に設計想定条件を超えた震度が生じ、制御機能の喪失(系統の暴走)⇒制御機能の喪失(系統の暴走) ⇒局所的な熱負荷の増加(喪失)	・動特性解析等による異常発生時の挙動の事前評価	制御機器多重化に対応した制御ソフト設計	動作不良を想定した安全機器の多重化	・保守時の安全機器の動作チェック ・交換基準の整備
9	商用電源喪失による制御不良	1	・商用電源喪失によるポンプや制御系停止⇒制御機能の喪失(系統の暴走) ⇒局所的な熱負荷の増加(喪失)	—	商用電源喪失時の機能維持方針の策定	商用電源喪失時の制御設計への考慮 ・無停電電源の設置 ・非常用電源の設置	商用電源喪失時の異常時運転手引の整備
10	立上げや停止時の反応不良	1	・過渡状態での想定外のプロセス進行⇒想定組成からの逸脱	動特性解析等を活用したシステム挙動の事前評価	立上げ・停止時の動特性の制御システムへの反映(インタロックの設定)	立上げ・停止システム設計に基づく計測機器(インタロック用)の設置	立上げ・停止手順の整備
11	触媒流動による磨耗	1	・SO ₂ 分解器や田分解器での触媒流動による容器や配管の磨耗・強度低下・破損・漏えい	試験的な事象発生可能性の評価	差圧計番号に基づくインタロックの設定	・触媒の流れ出しを防止する機器(メッシュ)の設置 ・流れ出し評価用の差圧計の設置	非破壊検査等による配管減肉量の測定
12	ポンプのキャビテーションによる供給不良や振動の発生	2	・温度、圧力、成分比率等の変動によりポンプキャビテーションの発生 ・キャビテーションが原因となった連動事象の発生(振動による締付け部の緩みや配管等の破損、液供給不足によるプラントシステムの機能低下や動作不安定)	ポンプキャビテーション発生可能性の検討と試験的評価	圧力計、流量計番号、並びに、キャビテーション発生検知器番号に基づくインタロックの設定	ポンプキャビテーションの発生検知器(フコーステイックエミッション法)の導入	ポンプキャビテーション発生等ボンブ不調時の対処手順の整備
13	大地震による機器配管の破損・漏えい	2	地震による機器配管本体および接続部の破損・漏えい	耐震設計方針の策定(原子力級、一般化学プラント級)	・大地震に伴う想定異常事象の整備 ・地震波検知によるシステムの緊急停止機構の採用 ・耐震構造設計	・地震波モニタの設置	異常時(地震時)対応手順の整備
14	建設・保全時の作業ミス・作業不良	2	建設・保全時の作業ミス・作業不良	—	—	—	・作業要領の整備 ・検査基準の整備 ・安全文化の向上 ・教育訓練

表11 HTTR-ISシステム事故防止対策への提案(3/3)

番号	事故要因	類似事故件数	HTTR-ISシステムで懸念される事故事象	HTTR-ISシステム事故防止対策提案		
				事前評価・開発等	設計	運転・保全
15	試運転中の誤動作	1	HTTR-ISシステムで懸念される事故事象 ・試運転時の想定外のプロセス進行 ・制御ソフトの完成度が低いことによる制御不能	事前評価・開発等 動特性解析等を活用したシステム率 制御ソフトの完成度向上 動の事前評価	設計 ソフト ハード ー	運転・保全 試運転手順の整備 ・異常レベルの整備 ・認知・対処手順の整備

付録

一般化学プラントにおける事故事例のうち IS プロセスで類似の事故の可能性のある事例
(RISCAD⁽¹⁷⁾より抽出)

事故名称	繊維原料工場から硫酸が漏えい
発生年月日	2002/6/4
発生場所	愛知県 東海市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 非着火放出 [第2分類] 漏えい(大気)
人的被害	負傷者数 軽症1名
事故概要	ナイロン原料工場の煙突内部の硫酸除去装置の一部が壊れ、霧状の硫酸が工場敷地外にまで漏えいした。隣接する工場の従業員1名が顔の痛みを訴えた。消防の調べでは、工場周辺の植物の葉から微量の硫酸が検出されたが、人的にはほとんど被害がない濃度であった。同工場は事故発生から2日後に関係機関に連絡しており、県などから厳重注意を受けた。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 回収、抽出、除害
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器

事故名称	韓国の日系化学工場で爆発
発生年月日	2002/8/18
発生場所	京畿道 / 平澤市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] 分解爆発 [第1分類] 火災 [第2分類] その他の火災
人的被害	死者数 3名 負傷者数 重軽傷14名
事故概要	接着剤などを製造する化学工場で爆発が起きた。4階建て工場の骨組みだけを残して壁が吹き飛び、最大約150m離れた道路まで飛散した。火災が発生したが約30分後に鎮火した。作業員ら3名が死亡、14名が重軽傷を負った。接着剤を製造するための8,000Lの反応器に2種類の化学薬品を混合して試運転している最中に過熱により制御用センサが異常を起こし、反応器が爆発、近くにあった6,000Lの反応器が連鎖爆発して被害が拡大したという。事故が起きたのは韓国と日本の企業が設立した会社で、日本人技術者2名も軽傷を負った。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 操作 [第3分類] 試運転
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器 [第2分類] バッチ反応器

事故名称	界面活性剤製造装置処理槽火災
発生年月日	1998/3/24
発生場所	神奈川県 川崎市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 火災 [第2分類] その他の火災
人的被害	負傷者数 1名
事故概要	第2プラント精製工場において界面活性剤を製造する工程で、処理槽のマンホールを開け微粉体の吸着処理剤一袋を投入中、アルミ製漏斗のシュート部につまりが生じ、吸着処理剤を落下しやすくするため真空ラインを開放した。この際、マンホールと漏斗の隙間から外部の空気が窒素置換されていた処理槽内に侵入し、滞留していたエタノール蒸気と空気が混合し、爆発雰囲気を形成した。投入時に発生した静電気火花により着火し、処理槽から一瞬炎が吹きだし、作業員1名が火傷した。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 回収、抽出、除害 [第3分類] 吸着
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器 [第2分類] 連続反応器

事故名称	ナフタリン酸化反応設備破裂
発生年月日	1998/3/10
発生場所	神奈川県 川崎市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] その他の火災
人的被害	負傷者数 1名
事故概要	<p>ナフトキノン製造設備でナフタリン貯蔵タンクから混合器へ供給するポンプ2基(A系、B系)が同時にキャビテーションを起こし運転状態が不安定になり、B系混合器の破裂板が作動した。原因としては定期修理中に予備ポンプ(Bポンプ)サクシオン側ケーシング内にバルブの不具合から蒸気ドレンが流入し溜まっていた。スタートアップ約16時間後、当該ドレンがスチームジャケットの温度(138°C)で蒸気となり、並列に接続されている稼働中のA系およびB系へのナフタリン供給ポンプ(Aポンプ、Cポンプ)サクシオン側へ流入したことにより、キャビテーションが同時に起きた。この現象を防止するため、ポンプのガス抜きを実施したが、Cポンプのキャビテーションはおさまらず、ナフタリンとともに蒸気もB系混合器へ供給されることとなった。その結果B系混合器内の噴霧ノズル部分で静電気が発生した。同時にCポンプのキャビテーションの影響で、B系ナフタリンの供給量が急に落ち、風量は変わらなかったことから反応温度が低下し、そのためB系混合器の空気入り口弁で空気の流量を調整した。これらにより、爆発雰囲気中のナフタリンに静電気が着火源となり爆発したものと推定される。</p>
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 反応 [第3分類] バッチ反応
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器

事故名称	反応釜中での薬品混合工程における硫化水素ガス漏えい事故
発生年月日	1997/11/28
発生場所	埼玉県 上福岡市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 非着火放出 [第2分類] その他の爆発
人的被害	中毒者数 4名
事故概要	反応釜中で薬品を混合中にこの工程で発生する硫化水素ガスが、吸収装置が取り付けられていたにもかかわらず、漏れて従業員1名が吸入、臭いに気づいて駆けつけた他の従業員も次々と吸入した。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 操作 [第3分類] 混合
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器

事故名称	配管から漏えいした水素の爆発火災事故
発生年月日	1992/5/30
発生場所	神奈川県 川崎市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] その他の爆発 [第1分類] 火災 [第2分類] 漏えい(大気)
人的被害	—
事故概要	パラフェネチジン(PPD)の製造プロセスの還元反応中に、パラニトロフェネトール(PNP)の払い出し配管の手動バルブ閉止操作が不完全であったこと、またエア作動式流量系付きバルブを閉め忘れたことから水素が PNP 払い出し配管に流入し、払い出し配管溶接部の溶け込み不足および PNP 中の塩素により応力腐食割れを生じ、割れの貫通していた箇所から水素が保温カバー内に漏えい、配管保温部を伝わり PNP 受槽保温カバー内部に充満、ここで爆発範囲に見合う混合気が形成された。これに水素が噴出した際に発生した静電気火花が着火源となり爆発した。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 反応 [第3分類] バッチ反応
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器 [第2分類] バッチ反応器

事故名称	ポリオール重合中の爆発・火災
発生年月日	1992
発生場所	オランダ
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] その他の爆発 [第1分類] 火災 [第2分類] 漏えい(大気)
人的被害	死者数 3名
事故概要	負傷者数 11名
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 反応 [第3分類] バッチ反応
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器

事故名称	炭化水素合成樹脂製造装置からの危険物漏えい事故
発生年月日	1989/7/6
発生場所	神奈川県 川崎市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 非着火放出 [第2分類] 漏えい(その他)
人的被害	—
事故概要	分解ガソリン残渣(プリフラボトム油、第二石油類)を原料に触媒としてフェノール錯化合物を添加し重合反応させ、石油樹脂を製造する設備において、石油樹脂の重合に際し短時間に多量の触媒を添加したため急激な重合反応が起き、その後に重合槽本体に貫通穴を生じ、本体およびライニング間に浸入していた原料油等、またはライニング材のピンホールに充填していたエポキシ樹脂が軟化、剥離し内容液の一部が漏えいしたものと推定される。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 反応 [第3分類] バッチ反応
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器 [第2分類] バッチ反応器

事故名称	重合器フランジのガスケット部分の老化に伴うエチレンオキシド爆発事故
発生年月日	1986/4/29
発生場所	愛知県 名古屋市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第1分類] 非着火放出 [第2分類] 漏えい(大気)
人的被害	—
事故概要	ポリプロピレングリコール(PPG)の特殊銘柄(KL-200)生産のため、原料(ペンタエリスリトール、ジグリセリン)と触媒(水酸化カリウム)を PPG # 306-2 号重合器へ投入し、機内を窒素置換した後に原料のエチレンオキシドの予備吹き込みを行った。翌日エチレンオキシドの追加投入を行った際に、重合器フランジのガスケット部分の老化によりエチレンオキシドが噴出し、静電気により着火爆発した。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 反応 [第3分類] バッチ反応
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器 [第2分類] 連続反応器

事故名称	水添反応タンク内で触媒(パラジウムアルミナ)抜き出し中の火災
発生年月日	1986/2/13
発生場所	茨城県 北茨城市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 火災
人的被害	負傷者数 1名
事故概要	アセトフェノン誘導体の水添反応に使われた触媒を水添反応機内底部より回収するため、反応機マンホールを開放したところ、活性化された触媒(2Pα アルミナ)に空気が入り込んだことにより乾燥し発火した。メタノール蒸気に着火して、係員のもっていたバケツ(メタノール)にも引火し手および顔面に火傷を負った。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 操作 [第3分類] 仕込み、取り出し
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器 [第2分類] バッチ反応器

事故名称	o-ニトロクロロベンゼンの爆発
発生年月日	1986
発生場所	日本
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] 破裂
人的被害	—
事故概要	医薬品中間体のヒドロキシベンゾトリアゾール製造工場で、大きな爆発音と共に溶解釜が爆発し、工場周辺の建物が破損した。工場は外壁および屋根が全壊し、溶解釜は攪拌機と共に現場から約 70m 離れた海中に没していた。爆発に至る間には溶解釜の温度上昇が確認されていた。また溶解釜と液量計の間の還流パイプに原料である o-ニトロクロロベンゼンの黄色結晶が目詰まりし、還流パイプを閉塞していた。さらに採取した試料中には、通常の反応工程では生成することのない、o-クロロヒドラゾベンゼンやそのヒドラジン置換化合物が検出された。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 反応
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器

事故名称	異常反応によるオートクレーブの爆発事故
発生年月日	1985/11/26
発生場所	群馬県 館林市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] 破裂
人的被害	—
事故概要	工業用原料製造のための 50L オートクレーブでの試験を終え、製品化のため 300L オートクレーブで運転を開始したところ約 12 時間後に突然オートクレーブが爆発した。異常反応が起こり、急激に温度および圧力が上昇したため、安全弁の作動が間に合わず爆発に至った。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 反応 [第3分類] その他の反応
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器

事故名称	ジメチルスルホキシドと水素化ナトリウム混合物の爆発
発生年月日	1984/1/23
発生場所	神奈川県 座間市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] 破裂
人的被害	—
事故概要	内容積 50L のステンレス容器にジメチルスルホキシド(DMSO) 7L と水素化ナトリウム(NaOH)2kg を入れ、スチームで 65°C まで上昇させ、スチームのバルブを閉じた。一時間後に液温が 85°C を越えたため水冷したが、液温がさらに上昇し 90°C 越えたので従業員が避難したと同時に爆発した。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 反応 [第3分類] バッチ反応
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器

事故名称	AS 樹脂製造中の爆発
発生年月日	1983
発生場所	日本
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] その他の爆発 [第1分類] 非着火放出 [第2分類] 漏えい(大気)
人的被害	死者数 6名 負傷者数 6名
事故概要	アクリロニトリルとスチレンを触媒とともにモノマー混合槽に入れ、重合反応器への投入を準備していた時停電が発生した。そのため、反応中の反応器の安全措置を行っていたところ同混合槽内で徐々に重合反応が進行し、約 48 時間後に混合槽からモノマーが工場内に噴出し、何らかの着火源により大爆発を起こした。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 反応 [第3分類] バッチ反応
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器

事故名称	ニトロアントラキノン製造中の爆発
発生年月日	1983
発生場所	ドイツ
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] その他の爆発
人的被害	－
事故概要	ニトロアントラキノン製造設備(5,000t/年)の完成後、テスト運転していたとき誤操作により大爆発を起こした。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 反応 [第3分類] バッチ反応
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器

事故名称	終業中の溶解釜内の火災
発生年月日	1982/4/23
発生場所	埼玉県 八潮市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 火災 [第2分類] その他の爆発
人的被害	－
事故概要	ワニス製造において、熱重合反応後にバーナーおよび攪拌機を止めて作業を終了したところ(225°C)、炉の余熱と攪拌機を止めたため釜の底部が温まり重合反応が進み、油が発火点に達して炎上した。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 反応 [第3分類] バッチ反応
装置	[第1分類] 反応容器および付属機器

事故名称	化学工場で定期整備中のタンクから硫化水素が漏えい
発生年月日	2003/11/18
発生場所	山口県 熊毛郡平生町
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 非着火放出 [第2分類] 漏えい(大気)
人的被害	中毒者数 重体1名、軽症1名
事故概要	化学工場で有機ゴム薬品製造過程において生じる硫化水素を回収する直径約50cm、高さ約50cmの円筒形タンクから硫化水素が漏えいした。作業中の1名が意識不明の重体、1名が手足のしびれなどを訴えた。工場街への硫化水素の流出はなかった。警察の調べでは、タンクの定期整備のため上部の板を外したところ硫化水素が噴出したという。工場側は整備時のボンベ着用を指導しているが、2名とも着用していなかった。
工程	[第1分類] 生産・製造 [第2分類] 回収、抽出、除害
装置	[第1分類] 貯槽・ポンベ [第2分類] 気体貯槽

事故名称	定期点検中のクレオソート剤タンクの爆発事故
発生年月日	1999/1/1
発生場所	三重県 四日市市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] 分解爆発
人的被害	—
事故概要	クレオソート剤の貯蔵タンク(直径11.62m、高さ12.8m、容量1,180kL)から出火、黒煙をあげて炎上した。事故当時タンクは、定期点検のため、沈殿物(約220kL)を残して中身が抜かれていた。この沈殿物である不純物を含む化学原料が少しずつ熱を蓄え、自然発火した可能性がある。
工程	[第1分類] 保全・メンテナンス [第2分類] 点検・検査
装置	[第1分類] 貯槽・ポンベ [第2分類] 液体貯槽 [第3分類] 常圧タンク(液体貯槽)

事故名称	不溶性硫黄貯蔵タンク検査中の二硫化炭素の爆発事故
発生年月日	1999/1/20
発生場所	香川県 丸亀市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] その他の爆発
人的被害	負傷者数 6名
事故概要	爆発があったのはラジアルタイヤなどの原料となる不溶性硫黄の製造プラント。爆発時は不溶性硫黄を貯蔵するタンク(高さ約3m)のふたを開けて定期検査中だった。同社はタンク内に残っていた可燃性の二硫化炭素に火が付いたと話している。
工程	[第1分類] 保全・メンテナンス [第2分類] 点検・検査
装置	[第1分類] 貯槽・ポンベ [第2分類] 固体貯槽

事故名称	阪神大震災における窒素ガス充填設備の容器からの窒素ガス漏えい事故
発生年月日	1995/1/17
発生場所	兵庫県 神戸市
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 非着火放出 [第2分類] その他の爆発
人的被害	—
事故概要	阪神大震災(兵庫県南部地震)によって、窒素ガス充填設備に取り付けられていた容器(20本2列)の充填枝管が引っ張られて窒素ガスが漏えいした。
工程	第1分類] 消費 [第2分類] 使用
装置	[第1分類] 貯槽・ポンベ [第2分類] 気体貯槽 [第3分類] ポンベ

事故名称	残留過酸化水素水の分解による真空用クッションタンク内の圧力上昇による爆発事故
発生年月日	1988/9/12
発生場所	神奈川県 足柄上郡
発生業種	化学工業
最終事象	[第1分類] 爆発 [第2分類] その他の爆発
人的被害	負傷者数 10人
事故概要	真空用クッションタンク内に流入した90%過酸化水素水は、真空ポンプが停止して常圧になると底板鏡面部のピンホールやドレーンパイプの腐食した部分から流出した。流出した過酸化水素水は分解熱をだし、タンク内に残っていた過酸化水素水は、分解が進み真空用クッションタンク内の圧力も急激に上昇し爆発した。
工程	[第1分類] 貯蔵 [第2分類] 液体貯蔵 [第3分類] タンク(固定式)
装置	[第1分類] 貯槽・ポンベ [第2分類] 液体貯槽

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射核種の)放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻¹ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー一分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ² ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ² ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ジャンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1um=10 ⁻⁶ m

