

JAERI-Tech  
99-061



JP9950535



高温ガス炉水素製造システムにおける  
ガス漏えい検知方法の検討

1999年9月

西原哲夫・中村正志\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

---

編集兼発行 日本原子力研究所

高温ガス炉水素製造システムにおけるガス漏えい検知方法の検討

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

西原 哲夫・中村 正志\*

(1999年7月13日受理)

高温ガス炉水素製造システムでは、大量の可燃性ガスを原子炉の比較的近傍で取り扱うため、火災・爆発事故に対する原子炉の安全性を確保することは安全上重要な課題の一つである。

本システムで取り扱う可燃性ガスは酸素を発生することはなく自燃性でないため容器内等で自発的に燃焼を生じることはなく、かつ通常運転時は高压に維持されている。また、安全設計の工夫により、可燃性ガスが原子炉建家内に放出しないようにしている。従って、火災・爆発は大気中へ漏えいした可燃性ガスに何らかの原因で着火した場合のみ発生すると考えられ、影響緩和を図るためには漏えいの早期発見が是非必要である。

そこで、可燃性ガス等の漏えい検知に関する国内基準、国内・国外で採用されている漏えい検知器の検知原理、性能、信頼性、技術動向等の調査を行い、高温ガス炉水素製造システムに採用する漏えい検知方法を検討し提案した。この検討に際しては、漏えい検知に安全上のクレジットの有無、PA上の配慮を考慮した。

検討の結果、安全上のクレジットを要求する場合には、対象機器・配管をセグメントジャケットで覆い、赤外線光センサー（LD分光メタン検出装置）をジャケット内に設置するとともに、ジャケット内部の雰囲気ガスを接触燃焼式または熱線半導体式固体センサーに吸引する連続監視方式を提案した。一方、漏えい検知に安全上のクレジットを要求しない場合には接触燃焼式固体センサー（吸引式）を法規どおりに設置することとした。また、PA上の配慮をする場合には、固体センサーに加え、光センサー（SafEye相当）の追加設置が有効であろうと考える。

なお、シビアアクシデント相当の原子炉建家内漏えいを検知する場合には、上記の接触燃焼式または熱線半導体式固体センサー（吸引式）と光センサー（LD分光メタン検出装置）のジャケット内設置を提案した。

更に、本システムでは、ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求めないことによってコスト低減を図るため、原子炉建家内で可燃性ガスの漏えいが予想される機器・配管等を不活性コンパートメントに設置することと原子炉建家外で必要離隔距離内の機器・配管等を不活性トレンチ内に設置することを提案した。なお、この場合のガス漏えい検知器は接触燃焼式固体センサー（吸引式）で十分である。

---

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

\* 川崎重工業株式会社

Consideration on Developing of Leaked Inflammable Gas Detection System  
for HTGR Hydrogen Production System

Tetsuo NISHIHARA and Masashi NAKAMURA \*

Department of Advanced Nuclear Heat Technology

Oarai Research Establishment

Japan Atomic Energy Research Institute

Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 13, 1999)

One of most important safety design issues for High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) - Hydrogen Production System (HTGR-HPS) is to ensure reactor safety against fire and explosion at the hydrogen production plant.

The inflammable gas mixture in the HTGR-HPS does not use oxygen in any condition and are kept in high pressure in the normal operation. The piping system and/or heat transfer tubes which have the potential possibility of combustible materials ingress into the Reactor Building (R/B) due to the failure are designed to prevent the failure against any events. Then, it is not necessary to consider their self-combustion in vessels nor leakage in the R/B. The only one case which we must consider is the ex-building fire or explosion caused by their leakage from piping or vessel. And it is important to mitigate their effects by means of early detection of gas leakage.

We investigated our domestic standards on gas detection, applications of gas detectors, their detection principles, performance, sensitivity, reliability, their technical trends, and so on. We proposed three gas detection systems which may be applied in HTGR-HPS. The first one is the universal solid sensor system ; it may be applied when there is no necessity to request their safety credits. The second is the combination of the improved solid sensor system and enhanced beam detector system; it may be applied when it is necessary to request their safety credit. And the third is the combination of the universal solid sensor system and the existing beam detector system; it may be applied when the plant owner request higher detector sensitivity than usual, from the view point of public acceptance, though there is no necessity to request their safety credits.

To reduce the plant cost by refusing of safety credits to the gas leakage detection system, we proposed that the equipment required to isolate from others should be installed in the inertrized compartments.

Keywords: HTGR, Hydrogen Production System, Safety System, Fire Explosion, Gas Leak Detector

---

\* Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. ガス漏えい検知に関する調査結果 .....	2
2.1 ガス漏えい検知に関する基準 .....	2
2.1.1 高圧ガス保安法 .....	2
2.1.2 消防法 .....	2
2.1.3 労働安全衛生法 .....	3
2.1.4 その他 .....	3
2.2 ガス漏えい検知の現状 .....	3
2.2.1 ガス検知方式 .....	3
2.2.2 国内のガス漏えい検知器 .....	4
2.2.3 海外のガス漏えい検知器 .....	5
2.2.4 ガス漏えい検知警報システム .....	6
2.3 従来のガス漏えい検知器の問題点 .....	8
3 HTGR水素製造システムに用いるガス漏えい検知器 .....	10
3.1 ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求める場合 .....	10
3.1.1 原子炉建屋外 .....	12
3.1.2 原子炉建家内 .....	12
3.2 ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求めない場合 .....	12
3.2.1 原子炉建屋外 .....	12
3.2.2 原子炉建家内 .....	13
3.3 PA上の配慮等について .....	13
3.4 HTGR水素製造システムへの提案 .....	13
4. まとめ .....	15
謝辞 .....	15
参考文献 .....	16
参考1 高温ガス炉-水素製造システムの概要 .....	31
1.1 HTGR水素製造システムの概要 .....	31
1.1.1 2次系を有するシステム .....	31
1.1.2 2次系削除システム .....	31
1.2 HTTR水素製造システムの概要 .....	31
1.2.1 全体構成 .....	31
1.2.2 HTTR原子炉本体 .....	31
1.2.3 水素製造プラント .....	32

参考 2	原子力施設における火災爆発対策	39
2.1	発電用軽水型原子炉施設	39
2.1.1	安全設計審査指針	39
2.1.2	火災防護に関する審査指針	39
2.1.3	安全設計方針と適合のための設計方針	39
2.2	高速増殖炉もんじゅ	40
2.2.1	火災防護に関する安全設計基本方針等	40
2.2.2	安全設計方針と適合のための設計方針	40
2.2.3	ナトリウム漏えい検知器	41
2.3	HTTR	42
2.3.1	火災防護に関する安全設計基本方針等	42
2.3.2	安全設計方針と適合のための設計方針	42
2.4	水冷却型試験用原子炉施設等における火災爆発関連安全設計	42
参考 3	ガス漏えい検知器設置の実際	57
3.1	化学プラント	57
3.2	半導体工場	57
参考 4	可燃性ガスと爆ごう特性	59
4.1	可燃性ガスの定義	59
4.2	爆発限界	59
4.3	発火温度と発火源	59
4.4	爆ごう特性	60
参考 5	漏えいガスの拡散	66

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Investigation Results on Gas Detection .....	2
2.1 Domestic Standards on Gas Detection .....	2
2.1.1 The High Pressure Gas Safety Law .....	2
2.1.2 The Fire Laws .....	2
2.1.3 The Industrial Safety and Health Law .....	3
2.1.4 Others .....	3
2.2 State of Art on Gas Detection .....	3
2.2.1 Detection Methods .....	3
2.2.2 Domestic Applied Detector .....	4
2.2.3 Foreign Applied Detector .....	5
2.2.4 Leaked Gas Detection and Alarm System .....	6
2.3 Problems of Existing Gas Detector .....	8
3. Proposal of Gas Detector for HTGR - Hydrogen Production System .....	10
3.1 Credit Case .....	10
3.1.1 Ex-R/B .....	12
3.1.2 In-R/B .....	12
3.2 Non-credit Case .....	12
3.2.1 Ex-R/B .....	12
3.2.2 In-R/B .....	13
3.3 Considerations on Public Acceptance .....	13
3.4 Proposal of Gas Detector for HTGR - Hydrogen Production System .....	13
4. Conclusions .....	15
Acknowledgements .....	15
References .....	16
Appendix-1 HTGR-hydrogen Production System .....	31
1.1 HTGR-hydrogen Production System .....	31
1.1.1 System with Secondary Circuit .....	31
1.1.2 System without Secondary Circuit .....	31
1.2 HTTR-hydrogen Production System .....	31
1.2.1 Overall Arrangement .....	31
1.2.2 HTTR Reactor .....	31
1.2.3 Hydrogen Production Plant .....	32

Appendix-2 Countermeasures against Fire and Explosions in Nuclear Power Plant .....	3 9
2.1 Light Water Nuclear Power Plant .....	3 9
2.1.1 Review Guideline of Safety Design .....	3 9
2.1.2 Review Guideline of Fire Protection Design .....	3 9
2.1.3 Safety Design Principle and Approach to be fitted .....	3 9
2.2 Liquid-metal Fast Bleeder Reactor, MONJU .....	4 0
2.2.1 Fire Protection Design Principle .....	4 0
2.2.2 Safety Design Principle and Approach to be fitted .....	4 0
2.2.3 Leaked Sodium Detector .....	4 1
2.3 HTTR .....	4 2
2.3.1 Fire Protection Design Principle .....	4 2
2.3.2 Safety Design Principle and Approach to be fitted .....	4 2
2.4 Other Water Cooled Reactors .....	4 2
Appendix-3 Actual Conditions of Installed Detector .....	5 7
3.1 Chemical Plants .....	5 7
3.2 Semiconductor Works .....	5 7
Appendix-4 Detonation Characteristics of Inflammable Gases .....	5 9
4.1 Definition of Inflammable Gas .....	5 9
4.2 Explosion Limits .....	5 9
4.3 Ignition Temperature and Ignition Source .....	5 9
4.4 Detonation Characteristics .....	6 0
Appendix-5 Dispersion of Leaked Gas .....	6 6



## 1. はじめに

高温ガス炉（以下、HTGRと略す）の核熱を利用して水素を製造することは化石燃料の消費量と二酸化炭素の放出量を削減するための有効な手段として期待されており、昭和40年代後半以降多くの研究開発が実施されてきた。

HTGR水素製造システムでは原子炉に水素製造システムを接続し、多量の可燃性ガスを取り扱うが、これによって原子炉安全への脅威が増加することがあってはならず、特に火災爆発対策は安全上最も重要な課題の一つである。

現在、原研では、高温工学試験研究炉（以下、HTTRと略す）に接続する、天然ガス（メタンを主成分とする。以下、LNGと略す）の水蒸気改質による水素製造システムを計画中であり、HTGR水素製造システムへの適用まで視野に入れた火災爆発対策を検討している。火災爆発に関するこれまでの検討内容とその結果、及び現在検討中の内容は以下の通りである。

- (1) HTGR水素製造システムにおける火災爆発を原子炉建家内部における火災爆発と原子炉建家外部における火災爆発に大別し、原子炉建家内部での火災爆発に対しては設計基準事象（以下、DBAと略す）としては起こりえないようにするための対策（発生防止策）を提案するとともに、原子炉建家外部における火災爆発に対しては、十分な離隔距離を取ることがを先ず優先させることにし、原子炉施設の安全上重要な機器・構造物並びに運転員の安全を確保するために必要な離隔距離を評価する方法を提案した。<sup>(1)</sup>
- (2) この簡易評価方法には大きな安全裕度が含まれると予測され、これを合理化するため、HTGR水素製造システムにおける火災爆発の影響を現実的に評価するためのコードシステム開発に着手した。既に、屋外における液面火災解析モジュール、蒸発解析モジュール、移流拡散解析モジュール及び爆燃解析モジュールの組み込みを完了しており、現在、屋外爆ごう解析モジュールの組み込みを行っているところである。また、次年度には屋内爆ごう解析モジュールを組み込み、コードシステムの開発を完了し、パラメータ解析に着手する予定である。<sup>(2)</sup>
- (3) HTTRに接続する水素製造システムの概念設計を具体化するとともに、離隔距離を十分取れない場合の影響緩和策と可燃性ガス漏えいに関するPA対策を検討している。

原子炉施設の安全対策は深層防護の概念に基づくものでなくてはならず、従って、火災爆発対策においても事故の拡大を防止し、その影響を緩和するため漏えいの早期発見による漏えい箇所の隔離が重要となる。そこで、本検討では、小漏えい検出方法として既存の可燃性ガス検知を調査し、HTGR水素製造システムに採用しうる方式を検討・提案した。なお、本検討の結果は、別途検討中のプロセス計装による漏えい検出の限界と併せて総合的に詳細設計に反映する。なお、現在検討中のHTGR水素製造システムの概要については、参考1に示した。

## 2. ガス漏えい検知に関する調査結果

### 2.1 ガス漏えい検知に関する基準

化学プラント等における漏えいガス検知に関する基準を設けている法規は、高圧ガス保安法、消防法、労働安全衛生法の3つである。3法規の関連をFig 2.1に示す。

#### 2.1.1 高圧ガス保安法\*<sup>1</sup>

高圧ガス保安法では、一般高圧ガス対象設備と液化石油ガス対象設備に関して、製造設備におけるガス漏えい検知警報器の設置を義務づけ、ガス漏えい検知警報設備とその設置場所をTable 2.1に示すように定めている。また、高圧ガス保安協会では「液化石油ガス検知器検定規定」と「液化石油用ガス漏れ警報器検査規定」を定めている。(3)、(4)、(5)、(6)

2.1.2 以降に示すように、上記3法規のうち、ガス漏えい検知器については詳細に定めているのは、高圧ガス保安法の下部規則「一般高圧ガス保安規則関係基準」であり、これを満足するガス漏えい検知器であれば、既存の法規制は全てクリアできるものと考えられる。なお、ガス漏えい検知器の検査に関しては一月に1回の回路検査による警報確認と1年に1回の検知警報の機能検査が義務付けられているが、検定については記述されていない。

#### 2.1.2 消防法\*<sup>2</sup>

消防法では、防火対象物における消防用設備等の設置、維持義務等を定め、“ガス漏れ火災警報設備”を“消防用設備等”とし、その中継器、受信機、警報装置、配線、電源、非常用電源、検知遅延時間等を規定している。また、ガス漏れ火災警報設備のうち中継器と受信機については検定対象機器となっており、日本消防検定協会で行っている。(自動火災報知設備の検定も日本消防検定協会が行っている。)

同じく、危険物の貯蔵、取扱いに関し、製造所及び取扱所における屋外タンク及び配管系への漏えい検知装置の設置を義務づけている。但し、配管系の漏えい検知に関しては、点検箱におけるガス漏えい検知とプロセス計装(流量差、圧力、圧力差)による検知を要求しており、また屋外タンクに関する検出器の詳細は定めていない。(7)、(8)、(9)

---

\*1 一般高圧ガス保安規則；第12条第18号、第43条第1項第7号、第78条第1項第9号の5、第84条第1項第8号、液化石油ガス保安規則；第9条第19号、第75条第4号の2、一般高圧ガス保安規則関係基準第926号

\*2 消防法；第10条、第17条～第17条の3、消防法施行令；第1条の2、第21条の2、消防法施行規則；第24条の2の3、危険物の規制に関する規則；第22条の3の2第3項第10号、第28条の32第2項、危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示；第4条の41、第46条

### 2.1.3 労働安全衛生法\*<sup>3</sup>

労働安全衛生法では、毒性ガス及び酸欠に対する規制はあるが、可燃性ガスに対する規制はない。なお、「一般高圧ガス保安規則関係基準」に定める可燃性ガスに関するガス漏えい検知警報設備の防爆構造については、労働安全衛生法で定めており、社団法人産業安全技術協会が型式検定を実施している。<sup>(10)</sup>

### 2.1.4 その他

都市ガスの製造所等についてはガス事業法の適用を受けるが、検討中の”水素製造システム”は適用範囲外であるため、調査しなかった。なお、利用者側における都市ガス用ガス漏れ警報器に関しては、日本ガス機器検査協会が「都市ガス用ガス漏れ警報器検査規定」を定め、検定を実施している。

原子炉施設における火災爆発対策を参考2にまとめたが、従来は可燃性ガスを原子炉近傍で取り扱うことを可能なかぎり排除してきたため、ガス漏えい検知に関して詳細に定めたものはない。

## 2.2 ガス漏えい検知の現状

ガス検知器の主な産業用用途先は化学工業と半導体工業である。(参考3参照)

化学工業では、主として稼働中のプラントからの可燃性ガスや毒性ガスの漏えい検知(主として屋外)と、装置等の内部をメンテナンスする際の可燃性ガス、毒性ガス、酸素濃度の検知に使用されている。<sup>(3)、(4)、(5)</sup>

一方、半導体工業では、製造設備稼働中のプロセスガス濃度の監視制御、稼働中の設備からの可燃性(自然性、支燃性)ガス、毒性ガスや窒息性ガスの漏えい検知(主として屋内)と、装置等の内部をメンテナンスする際のこれらのガスの検知に使用されている。なお、半導体工業に用いられる特殊材料ガスは、毒性可燃性、自然性、支燃性、自己分解性、窒息性など危険な性質を持つものが多く、許容濃度も化学工業における毒性ガスの1/10~1/100と低い。<sup>(11)、(12)、\*4</sup>

### 2.2.1 ガス検知方式

ガス検知方式の分類をTable 2.2に示す。大別すると、実験室用ガス機器分析に用いられてきた検知方式から発展したもの(ガス機器分析用検知器~熱分解器と各種検知方式の組み合わせ)と、従来から現場用機器として使用されてきたもの(ガス検知センサ)とがある。前者は極低濃度検知に用いられ、特に半導体工業における非常に毒性の強いガスの漏えい検知やプロセスガスの極微量の不純物検知に用いられている。<sup>(11)、(12)、(13)、(14)</sup>

\*3：労働安全衛生法；第44条

\*4：化学工業におけるガス許容濃度の例

硫化水素：10 ppm、アンモニア：25 ppm、一酸化炭素：50 ppm

半導体工業における特殊材料ガス許容濃度の例

アルシン、セレン化水素：0.05 ppm、ジボラン：0.1 ppm、ホスフィン：0.3 ppm

本調査の目的は、メタン、水素、一酸化炭素を含む可燃性ガスの漏えい検出に使用するガス漏えい検知器の調査であり、ppb オーダーまでのガス検知は不要であると考えられるため、実験室用ガス機器分析から発展してきた極低濃度検知用検知方式については調査の力点を置かない。

## 2.2.2 国内のガス漏えい検知器

### (1) 従来型

現在、国内で市販されているガス漏えい検知器を Table 2.3 に示す。可燃性ガス検知用としては、固体センサを用いる接触燃焼式、半導体式、熱伝導式 ((1) - ①~③) 及び光学センサを用いる赤外線式、光干渉式 ((3) - ①~②) があるが、(3) - ①~②はガス分析用であり、漏えい検知のためのガス検知器として使用されているのは(1) - ①~③である。

Table 2.3 に示す(1) - ①~③の固体センサの詳細を Table 2.4 に、検出原理を Fig 2.2 に示す。接触燃焼式は検知範囲が広いものの、LEL (可燃下限界) 以上の高濃度域と ppm オーダー以下の低濃度域での検知には不向きである。一方、半導体式は低濃度域の検知には適しているが、% オーダー以上の高濃度域での検知には不向きである。更に、熱伝導式は高濃度域の検知には適しているが、1000ppm 以下の低濃度域の検知には不向きである。従って、ppm オーダーから LEL 以上の高濃度域までの全域をカバーする性能を有する全能センサはなく、できるだけ広い範囲をカバーしようとするれば、複数のタイプのセンサを併用せざるを得ない。

ガス漏えい検知センサは保安機器で、性能 (再現性、性能、応答速度、測定範囲、選択制、温度依存性、湿度依存性)、信頼性 (長期安定性、寿命、耐被毒性、耐環境性、故障時のフェイルセーフ、安全性)、経済性等が要求される。設置、性能、構造等に関しては技術基準が定められているが、高圧ガス用、液化ガス用、都市ガス用としての検定基準に合格しているセンサは接触燃焼式と SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いた半導体式だけであり、これらは 3×10<sup>-5</sup>cc/sec まで検知可能と言われている。なお、配管のメンテナンスのためのガス漏えい検知に関しては、別途、超音波式等の開発が進められており、超高感度、高応答速度、使用上のソフトが必要とされている。

### (2) LD 分光メタン検出装置

最近、東京ガス株式会社と株式会社アンリツが埋設ガス管からのガス漏えい検出用に高性能な検知器”LD 分光メタン検出装置”を開発した。このガス漏えい検知器の測定原理は「(1)国内のガス漏えい検知器」で示した” (3)光学式-①赤外線式”と同様であり、レーザ光路上のガス分子の量を検出するものであるが、下に示すように選択制に優れ、非常に高性能である。

ガス濃度を正確に出力するためには、レーザ光をメッシュ状に配置し、計算機によるデータ処理をせざるを得ないと考えられ、そのための R&D が必要になる。現状でそのまま利用する場合には、ある距離間での漏えい検知のみを要求するという割り切りが必要と考えられ、漏えい位置と漏えい規模を特定するために、後述する”ガス検知ロボット”や複数の従来型検知器との併用が必要になる。(15)、(16)、(17)、(18) 以下にその概要を示す。

従来型検出器の下記問題点の克服を開発目標とした。

水素炎イオン検出器 (FID) : 選択性なし、感度/応答速度不十分  
 接触燃焼式 : 選択性なし、感度/応答速度不十分  
 ガスクロマトグラフィー : 選択性/感度優秀、リアルタイム検出不可能

半導体レーザ採用の理由

直接波長変調可能、廉価、軽量、ポータブル化可能  
 光ファイバによる遠隔計測可能  
 ファイバカップラによる同時多数点計測可能

構成等

光源 : InGaAsP-DFB レーザ  
 発振閾電流 15mA、単一モード最大出力 7mW  
 温度による波長変化率 0.07nm/K  
 駆動電源による波長変化率 0.003nm/mA  
 受光器 : フォトダイオード

検出性能

検出限界 ; 0.07ppm-m (70ppb-m)

直線性 ; ~5000ppm-m

1.6~1.7  $\mu$ m、2f 信号による検出 (受光量が吸収以外の要因で変動する場合には 2f 信号を f 信号で規格化)

ppm-m の定義が LEL-m の定義と同様と考えられ、光路長 1m にて 0.07ppm まで検出可能という意味と解することができる。これは光路長 0.7mm/100% と同意義であり、0.7mm の開口部から 100%メタンが噴出しておれば、光がこの 0.7mm を通過すれば検出可能と考えられる。また、光路長が 200m なら平均濃度  $0.07/200=0.35$ ppb を検出可能と考えられる。(但し、あくまでも平均値)

なお、東京ガスはこれとは別に、LNG 基地用にガス検知ロボットを開発しているが、それには (1)-①のガス検知器を採用している。

2.2.3 海外のガス漏えい検知器

米国 MSA INSTRUMENTS 社のガス漏えい検知器” SafEye” は海外で多くの実績を有するが、法規制が複雑であるためか、日本国内では今まで普及していない。

測定原理は「(1)国内のガス漏えい検知器」で述べた” (3)光学式-①赤外線式”と同様で、光路上のガス分子の量を検出する。発光部と検出部の距離が離れている場合には、ガス濃度を検出するものではないため、既存の「一般高圧ガス保安規則関係基準」となじまなかったものと考えられる。以下にその概要を示す。なお、この方式にも” LD 分光メタン検出装置”と同様な問題がある。

原理 : 2 ビームの強度比を比較することによって炭化水素ガスの存在を検出

- ・ サンプルビーム ; 赤外域 ; 炭化水素に吸収される
- ・ レファレンスビーム ; 非赤外域 ; 炭化水素に吸収されない

#### 仕様

- ・ 検出距離 ; 最大 150m  
(long path unit = ~150m / short path unit = 1.5~85m)  
(長距離火炎検出器 = 60m / 火炎 0.3m × 0.3m 時)
- ・ 検出対象ガス ; C1~C8 の炭化水素ガス
- ・ 検出濃度 ; long path unit = 0~20LEL-m / short path unit = 0~5LEL-m
- ・ 応答速度 ; ガス = 5~20 秒、長距離火炎検出器 = 3~10 秒
- ・ 視野 ; ガス = 直線、長距離火炎検出器 = 90° コーン
- ・ ビーム ; ガス = 2.0~4.0 μm、長距離火炎検出器 = 4.0~5.0 μm
- ・ 長距離火炎検出器をマウント可能
- ・ 防爆型あり

#### 特徴

- ・ 利点 : 全天候型 (霧等による強度低下は両ビームとも等しい)  
(マウントしている温度計によって温度補正)  
開放空間における断面監視に適する  
低コスト (特定箇所監視装置を複数設置するより、初期/ランニングコストとも安い)  
酸素不要 (接触燃焼式等では、容器破裂/配管破断発生時に検出不能になる)
- ・ 欠点 : 特定箇所の監視には不向き

用途 : long path unit ; 貯蔵設備、敷地境界監視 (石油精製/石油化学工場)、パイプライン監視

short path unit ; 換気ダクト、乾燥炉等

#### 2.2.4 ガス漏えい検知警報システム

ガス漏えい検知警報システムは防災システムのひとつであり、その目的は各設備からの情報を迅速かつ的確に把握し、適切な対応を取り、災害事故を未然に防止することにある。

ガス漏えい検知警報システムについては、従来は個々別々に監視・管理する分散監視方式が採用されてきたが、最近では生産設備に係る情報を総合的に判断し、最適な対応を取るために中央に集中させる集中監視方式が採用される傾向にある。また、防災管理において最も重要なことは上述のように、現場での対応が迅速に取れることであり、システムがハード・ソフト両面で複雑化・巨大化すると操作者の対応が難しくなるため、自動化によって操作を単純化する方向に進んでいる。

しかし、自動化が進むとシステムダウンなどの際に致命的な被害を被る可能性があるため、将来は、分散化と多重化によって信頼性を確保する分散/集中併用監視方式へ移行するものと考えられる。各監視方式の比較を Table 2.5 に示す。<sup>(5)、(11)、(12)</sup>

### (1) ガス漏えい検知警報器の基本構成

ガス漏えい検知警報器の基本構成を Fig. 2.3 に示す。図から分かるように、ガス漏えい検知警報器は検知部と指示警報部に大別される。これら2つの部分が一体となって漏えいの危険のある場所の近くに設置される一体型と、検知部だけが漏えいの可能性のある場所に設置され、指示警報部はそこから離れた計装盤に設置される分離型がある。従来は一体型を設置するケースが多かったが、最近では集中監視方式の採用とともに分離型が設置されるケースが増えている。今後は、温度、風速、漏水、地震やプロセスの状態量等のさまざまな情報をインテグレートした総合監視システムへ発展するものと思われる。

また、ガス検知部は漏えいガスの導入方法によって、自然拡散式と吸引式の2つのタイプ (Fig. 2.4 参照) がある。自然拡散式では漏えいガスは自然に拡散し、検知部に到達し、侵透してガスセンサに接触する。環境条件の良いフィールドや室内ではガスの拡散より換気条件による対流効果が大きいため、検知遅れは比較的小さく、吸引式に劣らない性能を発揮する。自然拡散式は環境の良いフィールド内、屋内、屋外の漏えいガスの滞留しやすい場所に適している。吸引式では漏えいガスをポンプやイジェクタ・ポンプによって吸引し、ガスセンサに導く。フィルタやミスとセパレータ等によって前処理してセンサに導くことができるため、環境の悪い場所に適している。吸引式を採用する際には検知性能、検知器及びセンサの寿命、メンテナンスコスト等を総合的に判断して決定する必要がある。なお、サンプリング配管材としては、銅管、ステンレス管、硬質塩ビ管、ポリウレタン管、テフロン管等を使用するが、検知対象ガスによっては吸着、腐食、溶解等が生じるため選択には注意を要する。また、自然拡散式と吸引式はともに防爆構造とすることが可能である。

### (2) ガス漏えい検知警報システム

ガス漏えい検知警報器は、前述のように、漏えいガスを検知する検知部とその出力信号を増幅し指示及び警報表示する指示警報部から構成され、必要に応じて、総合的な指示、警報表示部が付加される。Fig. 2.5 に現在広く使用されているガス漏えい検知警報システムの構成例を、Table 2.6 に指示方式、警報方式等の分類を示す。

既に述べたように、ガス漏えい検知警報システムが集中監視方式へ移行するとともに様々な改善がなされており、最近では危険情報の事前予知、監視情報の管理等、総合防災監視システムへの拡張が可能なシステムへと実用化が進んでいる。<sup>\*5</sup>

総合防災監視システムの構成例を Fig. 2.6 に、小規模～中規模までの電力線搬送を利用した総

\*5 風向や温度等の環境条件と併せて複数のガス漏えい検知器からの情報を入手できれば、漏えい検知の信頼性向上と漏えい位置を迅速に特定するための情報入手が可能になるため、ガス漏えい検知警報システムは総合防災監視システムへ進化すると考えられている。しかし、総合防災監視システム化しても、現場要員による調査を省くことはできないと考えられる。

合防災監視システムの構成例を Fig. 2.7 に、ポケットベル・オートコールシステムを利用した総合防災監視システムの構成例を Fig. 2.8 に示す。総合防災監視システムでは、各種検知器の信号は増幅ユニット、スキャニングユニットを介して中央制御監視装置に伝送され、各種情報処理が行われ、CRT等に各種必要情報が表示されるとともに、内部に記録され、一定時間毎にプリントアウトされることになる。また、中規模以下の総合防災監視システムでは、検知器がオートメンテナンス機能を有する等インテリジェント化されるとともに、AC電力線搬送の利用が図られることになる。更に、各所に分散している要員に各種情報を伝達するために、ポケットベルオートコールシステムや多重信号伝送システムが利用されることになる。

### 2.3 従来のガス漏えい検知器の問題点

国内におけるガス漏えい検知器には、多くの場合、固体センサが用いられており、漏えいガスの導入方法として自然拡散式または吸引式が採用されている。この方法では、検査対象ボリュームを代表すると考えられるサンプリングガス中に含まれる監視対象ガスの量を監視している。従って、環境条件がどのように変動しても、または、たとえ検査対象ボリュームの一部だけが高濃度になっても、確実に漏えいを検知し警報発信可能とするためには、警報発信レベルを低くするとともに設置台数を増やさざるを得ない。しかし、現在の高圧ガス保安法等では、環境条件の変動等に対する考慮までは規定しておらず、法的に定めた設置位置、設置台数及び警報発信レベルは、あくまでも実用上問題ないよう経験的に設定された上限値と考えるべきであろう。参考3に記述したように、警報発信レベルを法規定の1/25以下に設定している例もあることから、これ以上のリスク低減方法はプラントオーナーのノウハウであると考えられ、公表されていない。また、固体センサの検知方式には種々の原理があるが、測定方法はいずれも極めて類似しており、異なる検知原理を有する複数の固体センサによって検出の多様性を主張することは困難であろうと考えられる。

一方、海外等においては、上記の方法以外に、長い配管や敷地境界等における検出用として赤外線を用いた方法も採用されている。赤外線を用いた方法では、検査対象断面を代表すると考えられる光路（検知器の送光部と受光部の間の光路、以下、検査パスと略す）上に存在する漏えいガス分子の量（総量）を監視している。この場合も、固体センサの場合と同様に、検査パスが、環境条件がどのように変動しても、検査対象断面を代表しているという保証はなく、設置位置、設置台数及び警報発信レベルは、実用上問題ないように経験的に設定されていると考えるべきであろうが、国内にそのノウハウはない。

また、現在我々が知り得た”LD分光メタン検出装置”と”SafEye”の相違点は光源と受光器のみと考えられ、これら2つを設置することによって検出の多様性を主張することも困難であろうと考えられる。

更に、いずれの方法においても、従来のままでは、万一漏えいが検出されてもどの位置から漏えいしているのかという詳細な情報を得ることは難しい。そのため、何れの方法においても、万一漏えいが検出された場合には、現場要員が携帯検出器を用いて詳細調査し、漏えい箇所を特定することが必要になる。



以上より、ガス漏えい検知器に原子炉施設の安全保護系並の”信頼性”を要求しようとする、漏えい検出の確実性と漏えい場所の特定機能が必要になると考えられる。ところが、上記のような現状を踏まえると、従来のガス漏えい検知器に原子炉施設の安全保護系並の”信頼性”を要求することは不可能であり、別途工夫が必要と考えられる。

なお、参考2に示すように、原子力施設においてガス漏えい検知に安全上のクレジットが要求されたことは過去にはない。

### 3. HTGR水素製造システムに用いるガス漏えい検知器

ガス漏えいの規模としては配管両端完全破断から微小漏えいまでが考えられるが、大規模漏えいについては、消防法に規定するように圧力（差）や流量等のプロセス計装にて検知可能であり、その信頼性も高い。従って、これまで述べてきたガス漏えい検知器はプロセス計装にて検知できない規模の漏えい検知に使用することになる。

一般に、漏えい規模が大きくなれば影響も大きくなると考えることができ、漏えい規模と漏えい検知の関係はFig. 3.1のようになる。即ち、ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求める必要があるか否かはプロセス計装の検出下限と関連しており、図中のケースBではガス漏えい検知に安全上のクレジットを求める必要があり、ケースC及びDではガス漏えい検知に安全上のクレジットを求める必要がない。

現在、プロセス計装の検出下限と検出下限における影響の大きさについては現在検討中であり、ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求める必要があるか否かは不明である。そこで、ここでは、クレジットを求める場合と求めない場合の2ケースについて、ガス漏えい検知器がどのようなものになるかを検討した。更に、PA上の配慮をする場合とシビアアクシデント相当の事故対策を考慮する場合のガス漏えい検知器について、この2ケースとは別に検討した。然る後にHTGR用として合理的なガス漏えい検知方法を提案した。

#### 3.1 ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求める場合

既に述べたように、既存のガス漏えい検出技術だけでは、検査対象が大きい、もしくは、広いため、環境条件の変動等に対して検出の信頼性を保証することが難しく、漏えい位置を特定できる可能性が低い。従って、既存技術だけでは、原子炉施設の安全保護系並の”信頼性”を確保することは困難と考えられる。しかし、従来と全く異なる測定原理を有する新しい検知器を早急に開発することは困難であり、まずは既存技術の改良を検討すべきと考えられる。

既存技術の改良によって上記の問題点を克服する方法としては下記の2つの方向が考えられる。

- ・環境条件の影響をうけないよう検出対象範囲を狭くし、漏えい位置の特定をし易くする。
- ・環境条件と併せて漏えい情報の処理を行うとともに、検出方法の高度化を図る。

一方、「2. ガス漏えい検知に関する調査結果」から分かるように、既存技術として利用可能な検出方法は下記の2つであり、これらと上記2つの改良の組み合わせを考えることにする。

- ・固体センサを用いる方法
- ・赤外線式光センサを用いる方法

ところで、ガス漏えい検出器にクレジットが要求される場合、当然、ガス漏えい検出器はMS

(Mitigation System) であり、多重性、多様性及び独立性が要求されることになる。しかし、固体センサの検知方式には種々の原理があるが、測定方法がいずれも極めて類似しているため、異なる検知原理を有する複数の固体センサの採用のみによって検出の多様性を主張することは困難である。一方、赤外線光センサを用いた検知方式である”LD 分光メタン検出装置”と”SafEye”の相違点は光源のみあり、同様にこれら2つを設置することによって検出の多様性を主張することは困難である。即ち、原子炉施設の安全保護系並の検出系とするためには、改良した両者をもに採用する必要がある。

固体センサを用いたガス漏えい検知器の改良を考えた場合、原理そのものは比較的単純でほぼ技術的には完成されたものであるため、これ以上の検出方法の高度化は困難であろうと考えられる。従って、この場合には検出対象ボリュームの縮小限定化を考えた方が得策であろう。改良策としては、”もんじゅ”の漏えい検知器と同様に、機器・配管等の周囲にセグメント化したジャケット構造を採用することによって、検出対象を小さく限定するとともに、各セグメントジャケット毎に吸引式検知器\*6を設置することが考えられる (Fig. 3.2 参照)。

但し、ガス漏えい検知にこのような方式が採用された例はないため、検出精度と信頼性の確認と併せて、吸引口の配置、ジャケットのサイジングおよび強度\*7、エアーポンプの容量決定等の具体的な設計のための R&D が必要である。また、配管に対してジャケット構造が大きくなるため、小口径配管への採用が困難になることも考えられるため、その場合の対応方法も併せて検討が必要である。

次に赤外線式光センサを考える。検出の多重性、多様性を確保するためには両方式の採用が必要であり、固体センサにはセグメントジャケットの採用が前提となるため、セグメントジャケット内での赤外線を用いた検出を考える。そこで、光ファイバとフォトダイオード用いており、光源と受光器を小型化し易い LD 分光メタン検出装置の採用を提案する (Fig. 3.2 参照)。\*8、\*9

\*6 : 自然拡散式については、吸引式に較べて不確実性が多く応答性の点でも劣るため、採用することは考えなかった。

\*7 : ガス漏えい時にジャケットが吹き飛ばされれば、検出の信頼性が損なわれるため、配管両端完全破断検出器検出下限以下の如何なる漏えいでジャケットが破損しないよう設計する必要がある。

\*8 : 固体センサ排気口に光赤外線式光センサを設け、漏えい時に固体センサから排出される燃焼生成ガス (二酸化炭素及び水蒸気) を監視することも考えられるが、この場合にはセンサが直列に配置されるため、独立性が損なわれ、また、固体センサ故障時に検出不能となるため除外した。

\*9 : 長距離監視する方法としては、発光部と受光部によって構成される1対のアレイを数多く機器・配管の周囲に3次元的に配置し、”検出方法の高度化”によって目的を達成するという方法も考えられるが (Fig. 3.3 参照)、セグメントジャケット内部での検出にこの方法を採用すれば、ジャケットそのものを巨大化させることになるため除外した。

なお、セグメントジャケット内の固体センサモニタリングロ入口付近を光が通過するように光源と受光器を配置する。但し、ガス漏えい検知にこのような方式が採用された例はないため、検出精度と信頼性の確認が必要である。

### 3.1.1 原子炉建屋外

原子炉建屋外に設置する機器・配管については、Fig. 3.2 に示すように、セグメントジャケットで覆い、ジャケット内部の雰囲気ガスを赤外線式光センサで連続監視するとともに、雰囲気ガスを固体センサに吸引し、漏えいガスの有無を連続監視する。

固体センサとしては、性能上は従来型の接触燃焼式固体センサで十分でもあるが、警報発生レベルを1/100LEL以下にする必要がある場合には、熱線半導体式とする。また、赤外線式光センサとしては、センサ小型化の可能性、使用実績等を考慮し、“LD分光メタン検出装置”を採用する。

なお、ジャケット内部に大気を吸い込む吸引口には粉塵防止のためのフィルタを設ける。また、塩害防止のためにSUS等の耐食性材料を採用する。

### 3.1.2 原子炉建屋内

原子炉建屋内への可燃性ガスの漏えいは設計対応によって設計基準事故から排除する予定であり、法規上はガス漏えい検知器を設ける必要はない。

## 3.2 ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求めない場合

ガス漏えい検知に安全上の求める必要がない場合には、従来の化学プラント等と同様に、ガス漏えい検知警報設備とその設置場所については「高圧ガス保安法」(Table 2.1)の、中継器と受信機については「消防法」の、屋外タンク及び配管系の漏えい検知装置については「危険物の規制に関する規則」の、メンテナンス時の酸欠対策とガス漏えい検知警報設備の防爆構造については「労働安全衛生法」の適用を受ける。

参考4から原料ガスと生成ガスの起爆下限界(LEL)は約4%程度であるとすれば、Table 2.1より警報設定値を約1% (=1/4LEL)とする必要があり、Table 2.3及びTable 2.4から最も適したガス漏えい検知器として従来型の接触燃焼式固体センサを選択することが出来る。このタイプのセンサは国内において多くの実績があり、防爆構造のものが市販されており、これを選択する。なお、繰返しになるが、PA上の配慮をすれば問題が複雑化するため、ここではPA上の配慮を一切していない。

また、現在詳細調査中ではあるが、メタンの場合には、参考4に示すように極めて強力な火薬を起爆剤とするかもしくは落雷の直撃を受けない限り着火即爆ごうに至る可能性は低く、また爆燃から爆ごうに遷移しにくいガスと言われており、影響(発生圧力とインパルス)は比較的小さくなり、ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求める必要は少ないと推測している。

### 3.2.1 原子炉建屋外

原子炉建屋外に設置する機器・配管については、極力、壁等で覆わず、開放空間に設置するも

のとする。Table2.1より、この場合には、高圧ガス設備相当の機器とLNGの受入設備について周囲20mについて1個以上のセンサを設置する必要がある。また、HTGR建家周辺的环境条件を考慮すると、粉塵等の影響と塩害の影響が懸念されるため、フィルタを設けた吸引式を採用し、更にSUS等の耐食性材料の採用が望ましい。なお、腐食性ガスを考慮する必要はないと考えられる。

### 3.2.2 原子炉建家内

原子炉建家内への可燃性ガスの漏えいは設計対応によって設計基準事故から排除する予定であり、法規上はガス漏えい検知器を設ける必要はない。

### 3.3 PA上の配慮等について\*10

ガス漏えい検知に安全上のクレジットを要求する必要がなくとも、PA上の配慮として、法規上定められている以上に厳しい監視しなければならない、その場合にはかなりのコストアップが見込まれるため、コストミニマムで最大の効果を得ることができる方法を採用したい。ここでは、屋外についてはSafEye相当の光センサによる原料ガス配管と生成ガス配管及び主要機器の監視を、屋内については熱線半導体式固体センサを要所に設置することを提案する。設置場所については、参考5に示す屋内外のガス拡散試験例や半導体工場における設置例を参考に、決めるものとする。なお、国内実績のないSafEye相当の光センサについては性能等の確認のためのR&Dが必要である。

一方、シビアアクシデント相当の事故に対する設計対応をアクシデントマネジメントの一環として考慮する場合には、漏えい量の影響が大きくなると予想されるため、可能な限り早期発見を目指したい。そこで、"3.2"で述べた原子炉建家内検知と同等の検知を行うことにする。なお、現時点では、原子炉建家内を空気雰囲気のままにするか、不活性化するか決まっていないが、熱線半導体式固体センサは不活性雰囲気でも使用可能である。また、可燃性ガスの漏えい前にHeガスが既に漏えいしていることも考えられ、これを検知しようとする場合、固体センサとしては熱伝導式センサの適用が考えられるが、検出感度が1vol%以上と接触燃焼式固体センサより1オーダー低いため、設置位置と設置個数について更なる工夫が必要になる。また、Heガス検出用の光センサに関しては今回未調査であり、Heガスの吸収スペクトルの調査と発光器の検討と選定が今後必要になる。

### 3.4 HTGR水素製造システムへの提案

既に述べたことから分かるように、ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求めれば、要求

---

\*10：安全への要求と安心のための要求の位置付けが最近混乱しているおり、将来、シビアアクシデントに対する設計要求がどう位置付けられるか不透明である。そこで、ここでは、設計基準事象に対し必要以上に厳しい検出を要求する場合を「PA上の配慮」とし、シビアアクシデント及びこれ相当の事故に対する設計要求とは区別した。

を満足する検知器及び検知システムの開発に多大のコストが必要になり、更にプラントコストの大きな増大をも招くことになる。従って、HTGR水素製造システムの実用化のためには、ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求めないシステムを構築することが急務である。

HTTR水素製造システムについては別途検討中であるが、既存のHTTRに水素製造システムを増設するため種々の制限を受け、問題が複雑化する。そこで、ここでは、将来のHTGR水素製造システムでガス漏えい検知を如何にすべきかを提案する。

なお、将来のHTGR水素製造システム（実用システム）では、合理化のために、参考図-1-2に示すように、二次系を削除するとともに、水素製造システムの大部分を原子炉建家内に設置することになると考えられる。以下、参考図-1-2をHTGR水素製造システムのベース概念とする。

一般論として、ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求めないシステムとするためには、まず、漏えいが予想される機器・配管等を不活性雰囲気中に設置し、火災爆発の発生防止を図るべきである。但し、全ての機器等を不活性雰囲気中に設置すればやはりかなりのコスト増が見込まれるため、漏えいと火災爆発の発生を想定しても、火災爆発の発生場所と安全上重要な構造物、系統及び機器との間に十分な離隔距離を確保できる場合には、機器・配管等を大気開放空間に設置すべきである。

参考図-1-2に示すHTGR水素製造システムでは、まず、原子炉建家内で可燃性ガスの漏えいが予想される機器・配管等を設置するコンパートメントを不活性化すべきであり、また、必要離隔距離内に設置する原子炉建家外の機器・配管等も不活性化されたトレンチ内に設置、もしくは外管内を不活性化した二重管とすべきである。但し、不活性コンパートメントと不活性トレンチの具体化に際しては、配管両端完全破断まで考慮した漏えいガスの処理、パイプホイップ対策、内部の負圧維持とメイクアップガスの供給及びメンテナンス性等を考慮する必要がある。なお、原子炉建家内コンファインメント圧力と不活性コンパートメント圧力の設定・維持管理等については、“もんじゅ”の1次系設置コンパートメントの例が参考になろう。

不活性コンパートメントと不活性トレンチにおいて、ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求めない必要はなく、接触燃焼式固体センサを半導体工場の設置例を参考に設置すれば、十分である。

一方、コストを考えた場合、必要離隔距離をできるだけ短くし、大気開放空間への機器・配管等の設置をできるだけ多くしたい。ところで、爆燃と爆ごうを比較した場合、発生圧力は爆ごうの方が1～2オーダ高いため、必要離隔距離の短縮化には屋外爆ごうの発生を否定することが極めて有効であり、試験データの取得に注力すべきである。

#### 4. まとめ

著者らは漏えいの早期検知方法について検討を行った。具体的には、可燃性ガス等の漏えい検知に関する国内基準、国内・国外で採用されている漏えい検知器の検知原理、性能、信頼性、技術動向等を調査の上、HTGR水素製造システムに採用する漏えい検知方法を検討し提案した。この検討に際しては、漏えい検知に安全上のクレジットを要求する場合としない場合について考慮した。また、PA上の配慮をする場合、どのような検知方法の採用が考えられるかについても検討した。

漏えい検知方法については、安全上のクレジットを要求する場合には対象機器・配管をセグメントジャケットで覆い、赤外線光センサー（LD分光メタン検出装置）をジャケット内に設置するとともに、ジャケット内部の雰囲気ガスを接触燃焼式または熱線半導体式固体センサーに吸引することによって連続監視する方式を提案した。一方、漏えい検知に安全上のクレジットを要求する必要のない場合には接触燃焼式固体センサー（吸引式）を法規どおりに設置すれば十分である。また、安全上のクレジットを要求する必要がなくともPA上の配慮をする場合には、法規通りに固体センサーを設置することに加え、光センサー（SafEye相当）の追加設置が有効であろうと考える。なお、設計上想定する必要はないが、シビアアクシデント相当の原子炉建家内漏えいを検知する場合には、上記の接触燃焼式または熱線半導体式固体センサー（吸引式）と光センサー（LD分光メタン検出装置）のジャケット内設置を提案した。

更に、HTGR水素製造システムでは、ガス漏えい検知に安全上のクレジットを求めないことによってコスト低減を図るため、原子炉建家内で可燃性ガスの漏えいが予想される機器・配管等を不活性コンパートメントに設置することと原子炉建家外で必要離隔距離内の機器・配管等を不活性トレンチ内に設置することを提案した。なお、この場合のガス漏えい検知器は接触燃焼式固体センサー（吸引式）で十分である。

#### 謝辞

本報告書作成に当たり、有益なご指導を戴いた核熱利用研究部 宮本喜晟部長、同部熱利用システム研究室 塩沢周策室長、高温工学試験研究炉開発部 HTTR計画室 茂木春義室長、ITER開発室 安全評価グループサブリーダー 羽田一彦氏に、また有益な助言と貴重な資料をご提供戴いた東京ガス株式会社、理研計器研究所、MSA ジャパン株式会社の関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 西原哲夫、羽田一彦、塩沢周策、「高温ガス炉—水素製造システムの安全設計の考え方の提案（火災・爆発事故対策を中心に）」、JAERI-Research 97-022、（1997）
- (2) 中村正志、西原哲夫、「高温ガス炉—水素製造システムの技術開発における火災・爆発挙動解析コードの開発・整備方法の検討、JAERI-Tech 98-002、（1998）
- (3) 省令補完基準 一般高圧ガス保安規則関係基準 昭和 61 年 8 月 30 日改正 高圧ガス保安協会
- (4) 省令補完基準 一般高圧ガス保安規則関係基準 平成 4 年 5 月 15 日改正 高圧ガス保安協会
- (5) 高圧ガス保安に関する情報紹介 No. 82 異常診断技術「漏洩検知」 昭和 57 年 3 月高圧ガス保安協会
- (6) 高圧ガス保安法法規集 高圧ガス保安協会
- (7) 消防関係法令集 近代消防社刊
- (8) 危険物関係法令集 消防庁危険物規制課編 全国加除法令出版株式会社 刊
- (9) 火災便覧第 3 版 日本火災学会編 1997 年 共立出版株式会社
- (10) 労働安全衛生法解釈総覧 財団法人 労働法令協会
- (11) 半導体工業用ガスハンドブック（改訂版） 安全工学協会編 1996 年 安全工学協会
- (12) 半導体工業用材料ガスハンドブック 安全工学協会編 1990 年 安全工学協会
- (13) 接触燃焼式可燃性ガス検知素子と検知部について 技術資料 理研株式会社
- (14) 理研センサ 技術概論 理研株式会社
- (15) レーザ分光法により大気中の微量成分を測る、田井秀男、MIA, Vol. 57, p9-12
- (16) DGPS 搭載メタン検知車、井関孝弥、非破壊検査 第 47 巻第 3 号（1998）, p173-176
- (17) Mobile GIS と連動した LD 分光メタン検出装置の開発 井関、大喜多、小坪、田井、木村、OQD-97-51、p13-18
- (18) Real-time monitoring of environmental methane and other gases with semiconductor lasers: a review, K. Uehara, H. Tai, and K. Kimura, Sensors and actuators, B 38-39(1997), 136-140



Table 2.1 ガス漏洩検知警報設備とその設置場所  
(一般高圧ガス保安規則関係基準抜粋)

機能		可燃性ガス又は酸素若しくは毒性ガスの漏洩を検知した上、その濃度を指示するとともに警報を発する		
性能	方式	接触燃焼方式		
		隔膜ガルバニ電池方式		
		半導体方式		
		その他		
	警報設定値 (雰囲気温度における)	可燃性ガス	爆発下限界の1/4以下	
		酸素	25%	
		毒性ガス	許容濃度以下	
		特定ガス	許容濃度の2倍以下	
	警報精度	可燃性ガス	警報設定値の±25%以下	
		酸素	警報設定値の±5%以下	
毒性ガス		警報設定値の±30%以下		
警報発信までの遅れ	警報設定値の1.6倍の濃度で30秒以内			
	検知警報設備の構造上または理論上これより遅れる特定ガスでは、1分以内			
指示計目盛り	可燃性ガス	0～爆発下限界		
	酸素	0～50%		
	毒性ガス	0～許容濃度値の3倍		
耐電源電圧変動	±10%でも警報精度が低下しない			
構造	十分な強度			
	取扱い及び整備が容易			
	ガスが接触する部分は耐食/防食性を有する			
	防爆性については、労働安全衛生法(昭和47年法律第57号)第44条の検定に合格			
	複数検出部から警報を受信する場合、受信回路は同時に複数の警報を発することができ、かつ当該場所を識別できること			
	受信回路は、作動所帯にあることを容易に識別可能とする			
	ランプ点灯または点滅と同時に警報			
設置	製造設備	建物内	ガスが漏えいし易い高圧ガス設備設置場所の周囲で、ガスが滞留し易い場所に、設備群の周囲10mに1個以上	
		建物外	ガスが漏えいし易い高圧ガス設備が他の高圧ガス設備、壁等の構造物に接近し、またはピット内のガスが滞留し易い場所に設けられている場合、設備群の周囲20mに1個以上	
			火源を含む製造施設の周囲のガスが滞留し易い場所に、周囲20mに1個以上	
		計器室	内部に1個以上	
		充填場所	毒性ガス充填用接続口1群の周囲に1個以上	
	貯蔵所または消費施設	建物内	ガスが漏えいし易い高圧ガス設備設置場所の周囲で、ガスが滞留し易い場所に、設備群の周囲10mに1個以上	
			昼夜連続運転の強制排気設備では吸引口毎	
		建物外	ガスが漏えいし易い高圧ガス設備が他の高圧ガス設備、壁等の構造物に接近し、またはピット内のガスが滞留し易い場所に、設備群の周囲20mに1個以上	
			特殊高圧ガスに係る充てん容器等が置かれる場合、容器群の周囲で、ガスが滞留し易い場所に、1個以上	
			シリンダキャビネットの内部に1個以上	

\* 検出部の設置高さは、当該ガスの比重、周囲の状況、ガス設備の高さ等に応じて定める。

\* 製造又は消費施設において昼夜連続運転されるされる強制排気設備においては吸引口毎に検出部を設置する。

Table 2.2 ガス検知方式の分類

分類	方式	検知対象ガスと検知範囲	動作原理と性能
ガス機器分析用検知器	質量分析計 (四重極型)	・ほとんど全ての化学物質 ・ppm～ppb	4本のボール状の電極があり、対角線上の2本のボールには同一電圧を、他の2本のボールには極性の異なる同一電圧をかける。この極性を高速に切り替えるとボール内を通過するイオンはボールに印可した電圧に比例し、質量数ごとに分離される。小型かつコンパクトで操作性に優れ低価格である。
	炎光光度式	・硫黄化合物、リン化合物、ホウ素化合物、ヒ素化合物 ・ppm～ppb	炎の中での原子特有の発光スペクトルを利用している。この発光を光電子倍增管によって光電変換し増幅する。この光電流はガス濃度に比例する。光学フィルタと組み合わせれば、選択性も非常に良い。他のガスの影響の程度は、検知ガスに対して50～1000の1以下
	化学発光式	・アルシン、ホスフィン、シラン、ジボラン、一酸化炭素、一酸化窒素、二酸化硫黄、他 ・ppm～ppb	検知対象ガスの含まれている試料ガスにオゾンと接触させると検知対象ガスは酸化され、一部が励起状態の不安定な酸化物となる。この酸化物は短時間で基底状態に戻る。この際の発光を光電子倍增管によって光電変換し増幅する。この電流出力はガス濃度に比例する。
	光イオン化式	・水素化物、有機溶剤、他 ・ppm～ppb	紫外線を検知対象ガスに照射してイオン化する。この時発生するイオン電流は検知対象ガスの濃度に比例する。照射する紫外線の波長を変えることによって、ある程度の選択性を持たせることができるが、一般的には選択性はない。
	赤外線吸光光度式	・異分子ガス ・100%～0.01%付近まで	ガスの赤外線吸収スペクトルの波長の違いと吸収量からそれぞれガスの種類、濃度を検知、測定する。低濃度の測定をするには反射鏡を用いて繰返し反射させ、測定セルの長さ(光路長)を数mから十数mにして測定する。
	光干渉計式	・ほとんどのガス、蒸気 ・100%～0.01%付近まで	ガスの光の屈折率差による干渉縞の移動量からガス濃度を検知する。干渉縞を直接目で観測していたものを、光電的に読み取らせる方法が実用化され、デジタル表示するものもある。
	水素炎イオン化式	・炭化水素類 ・数%～数ppm付近まで	炭化水素類のガス・蒸気を水素の炎の中に導くとイオン化し、炎の電気伝導度が増加する。この変化量からガス濃度を検知する。
化学反応と各種検知方式の組み合わせ	試験紙光電光度式	・水素化物、硫化水素、塩素、塩化水素、フッ化水素、臭化水素、ホスゲン ・数ppm～ppb付近まで	検知対象ガスに接触すると発色する試薬を含ませたテープ状の試験紙と、この発色度合を測定する透過又は反射型の光電変換部から構成される。検知器の出力は、試験紙上に反応物質が蓄積されるので時間に比例して大きくなる。
熱分解器と各種検知方式の組み合わせ	定電位電解式 半導体式イオン化検知器等	・ハロゲン化炭化水素、その他ハロゲン化合物、モノシラン、TEOS等シリコン化合物他 ・数100ppm～数100ppb付近まで	加熱白金線などに接触させて、ハロゲン分子、ハロゲン化水素などに熱分解して、又は酸化シリコンなどの微粒子上酸化物に酸化して、これらの反応性生物を各種検知器によって検知する。
ガス検知センサ	接触燃焼式 (熱線型)	・ほとんどの可燃性ガス、蒸気 ・爆発下限界～0.01%付近まで	ガスの接触燃焼による検知素子の温度上昇と電気抵抗変化からガス濃度を検知する。
	半導体式	・主に還元性の可燃性ガス及び毒性ガス・蒸気 ・数1000ppm～数10ppb付近まで	金属酸化物半導体への還元性ガスの化学吸着による電気伝導度の変化を利用した検知方式である。構造によって、焼結型、厚膜型、薄膜型などにわかれ、それぞれが固有の特徴を持っている。又、焼結型のうち細い白金線をコイル上にしたものに金属酸化物半導体をビート状に焼結したものは熱線型半導体方式と呼ばれている。
	定電位電解式	・水素化物、硫化水素、一酸化炭素、一酸化窒素、塩化水素、二酸化窒素、二酸化硫黄、他 ・数100ppm～数100ppb付近まで	隔膜を通して、電解液中に拡散吸収されたガスを定電位電解によって、酸化又は還元するときに生じる電解電流からガス濃度を検知する。
	隔膜電極式	・アンモニア、硫化水素、シアン化水素、二酸化炭素、他 ・数%～数ppm付近まで	隔膜を通して、ガスが内部液中に溶解したときの内部液のイオン濃度変化をイオン電極と比較電極を用いて測定し、ガス濃度を検知する。
	隔膜ガルバニ電池式	・酸素 ・100%～数ppm付近まで	隔膜ガルバニ電池の出力は、隔膜を通して、電解液中に溶存する酸素量に比例する。

Table 2.3 国内の市販ガス漏えい検出器の分類と性能、用途等

	検出対象ガス		性能		用途		
	検出方式	検出対象ガス	測定範囲	時定数	民生用	産業用	
(1)固体センサ	①接触燃焼式 ●直梁式	可燃性ガス一般	数100ppm～数10%	数秒 (拡散式の場合、更に2～3秒の遅れ有り)	ガス漏れ警報	可燃性ガス/溶剤ガスの検知警報 乾燥炉内温度制御	
	●ニューセラミック式	可燃性ガス一般	数100ppm～数%		ガス漏れ警報	可燃性ガス/溶剤ガスの検知警報 乾燥炉内温度制御	
	②半導体式 ●直梁式 ●熱線半導体式	可燃性ガス、毒性ガス 可燃性ガス、毒性ガス	数10～数1000ppm 数10ppm～数%		ガス漏れ、完全燃焼、空調・換気警報	可燃性ガス/毒性ガス/冷媒ガス/溶剤ガスの検知警報、 空調・換気/燃焼/乾燥炉内温度制御 可燃性ガス/毒性ガス/冷媒ガス/溶剤ガスの検知警報、 空調・換気/乾燥炉内温度制御	
(2)電気化学センサ	③熱伝導式	可燃性ガス、不活性ガス	1%～			可燃性ガスの検知警報、ガス製造濃度制御	
	①定電位電解式	一酸化炭素、酸化水素、アルシン、シラン、ホスフィン、ジボラン、ケルマン	数10～1000ppm			毒性ガス/半導体材料ガス検知警報	
	②隔膜分離式定電位電解式	フッ化水素、塩素、臭化水素	10ppb～100ppm			毒性ガス/半導体材料ガス検知警報	
	③隔膜イオン電極式	アンモニア	数～数100ppm			毒性ガス検知警報	
	④隔膜ガルバニア電池式	酸素	数ppm～100%			酸素/半導体材料ガス検知警報	
	⑤ジルコニア式	酸素	数100ppb～数10%			酸素検知警報	
	(3)光学センサ	①赤外線式	二酸化炭素、メタン、一酸化炭素	数10ppm～数10%		空調・換気警報	可燃性ガス/毒性ガス/冷媒ガス/半導体材料ガス/溶剤ガスの検知警報 空調・換気/燃焼/乾燥炉内温度制御、自動重排気ガス
②光干涉式		メタン、二酸化炭素、ブタン	100ppm～数10%			可燃性ガス/溶剤ガスの検知警報、乾燥炉内/ガス製造濃度制御	
③アーク紫外分光式		ハロゲン化炭化水素	10～数1000ppm			冷媒ガス/溶剤ガスの検知警報、	
④検知テープ式		毒性ガス、半導体材料ガス	10ppb～100ppm			毒性ガス/半導体材料ガス検知警報	
(4)その他		①水素炎イオン化式	炭化水素(冷媒、溶剤)	100ppb～数1000ppm			可燃性ガス/冷媒ガス/溶剤ガス検知警報
		②化学発光式	一酸化窒素	100ppb～数1000ppm			毒性ガス検知警報
		③紫外線吸収法	オゾン	10ppb～10ppm			
	④熱イオン化式	ハロゲン化炭化水素(冷媒、溶剤)	100ppb～1000ppm			冷媒ガス/溶剤ガス検知警報	
	⑤触媒酸化式	一酸化炭素	数～数100ppm			毒性ガス検知警報	
	⑥光イオン化式	毒性ガス、冷媒溶剤ガス	1～数100ppm			毒性ガス/半導体材料ガス/溶剤ガス検知警報	
	⑦熱電子化式	有機金属ガス	数～数10ppm			半導体材料ガス検知警報	

Table 2.4 固体センサの詳細

	①接触 燃焼式		②半導体式		③熱伝導式
	①従来式	②ニューセラミック式	①従来式	②熱線半導体式	
検出対象ガス	LPG、都市ガス、メタン、水素、エチレン、アセチレン、ガソリン、その他可燃性ガス	LPG、都市ガス、メタン、水素、エチレン、アセチレン、ガソリン、その他可燃性ガス	LPG、都市ガス、メタン、水素、一酸化炭素、その他可燃性ガス 硫化水素、フロンガス、その他毒性ガス	LPG、都市ガス、水素、天然ガス、一酸化炭素、アルコール、一般可燃性ガス、フロンガス、半導体材料ガス	LPG、都市ガス、メタン、水素、天然ガス、ブタン、炭酸ガス、アルゴン、ヘリウム、麻酔ガス
検出原理	可燃性ガスの酸化による発熱を抵抗素子の抵抗変化として検知	可燃性ガスの酸化による発熱を抵抗素子の抵抗変化として検知	可燃性ガスの酸化に伴う金属酸化物半導体内の酸素イオンの離脱による抵抗変化として検知	可燃性ガスの酸化に伴う金属酸化物半導体内の酸素イオンの離脱による抵抗変化として検知	可燃性ガスの通過による熱線抵抗体の温度変化による抵抗変化として検知
センサ	検知素子：白金 酸化触媒 アルミナ担体 補償素子：アルミナ+ガラス 図2参照	検知素子：耐熱合金 酸化触媒：セラミック アルミナ担体 補償素子：アルミナ+ガラス 図3参照	ヒータコイル 金属半導体+アルミナチューブ 図4参照	検知素子：白金 金属酸化物半導体 補償素子：不活性金属酸化物 図5参照	検知素子：白金 アルミナ+ガラス または不活性金属 補償素子：密閉 図6参照
検出範囲	数千PPM~LEL ほぼ比例	数百PPMオーダー~LEL ほぼ比例	数十PPM~数千PPM 比例しない：低濃度域のセンサ出力大	数十PPMオーダー~LEL 比例しない：低濃度域のセンサ出力大	LEL~100vol% ほぼ比例
温度、湿度の影響	殆どなし	殆どなし			環境の影響を受けない 酸素不必要
精度	良好	良好			
再現性	良好	良好			
取扱い等	容易	耐被毒性 感度劣化小 長期間安定	過酷な条件に強い耐性 長期間安定 長寿命	長期間安定 長寿命 選択性 小型化可能	長期間安定

Table 2.5 監視方式

監視方式 項目	分散監視方式	集中監視方式	分散/集中併用 監視方式	備考
異常事態の早期 認知	◎	◎	◎	異常発生及びその内容を管理者が明確に認知できること
設備増改築時の 管理	○	◎	◎	改造・増設に伴う防災関連設備の把握（製造装置付帯機器も含む）
工場全体の状況 把握	△	◎	◎	工場の保安設備稼働状況の全体把握
異常時の適切な 対応と第三者に よる把握	○	△	◎	関係プロセスの異常発生に対し、熟知した作業員が適切に対応する
制御の自動化	◎	◎	◎	緊急遮断弁の閉止など
システム異常時の 監視性能（多重化）	○	△	◎	システム異常によって監視機能が失われないこと
ハードの形状	◎	△	◎	監視点数との相関
設備の費用	◎	○	○	機器費用、工事費用

Table2.6 指示方式、警報方式等の分類

方式	分類		備考
指示方式	指示方式	常時独立指示	
		共通指示	スキヤニング・スイッチまたは手動スイッチによって選択指示
	表示方式	アナログ表示	
		デジタル表示	
		バーグラフ表示	
		グラフィック表示	
	指示単位	%LEL	
		vol%	
		ppm	
	外部出力	0~1V	
		1~5V	
		0~10mA	
		4~20mA	
伝送方式	個別伝送 (1:1方式)	電圧	
		電流	
	多重伝送	アナログ伝送	
		デジタル伝送	
警報方式	警報段数	1段	
		2段	
		多段	
	警報設定方式	個別設定	
		共通設定	
		設定表示	
	警報設定値	1/4LEL以下	
		許容濃度以下等	
	警報表示方式	表示ランプ	赤色灯、白熱電球、LED
		回転灯	バトライト
		音声	ブザー、サイレン、スピーカー
	故障指示	センサ異常	
		開路異常	
		電源異常等	
	警報モード	連続警報	
		断続警報等	
	テスト機能	テストスイッチ	
チェック端子			
自動診断機能等			
外部警報出力	ON-OFF接点		
	電圧出力		
	電流出力		
電源	商用電源	AC100V	
		50/60Hz等	
	計装用電源	DC24V等	
	内蔵電池	乾電池	
		蓄電池	Ni-Cd充電電池、Pb電池等
保安電源	停電時のバックアップ		
その他	取付方法	パネル取付型	
		ラック取付型	
		壁掛け型	
		自立盤型	

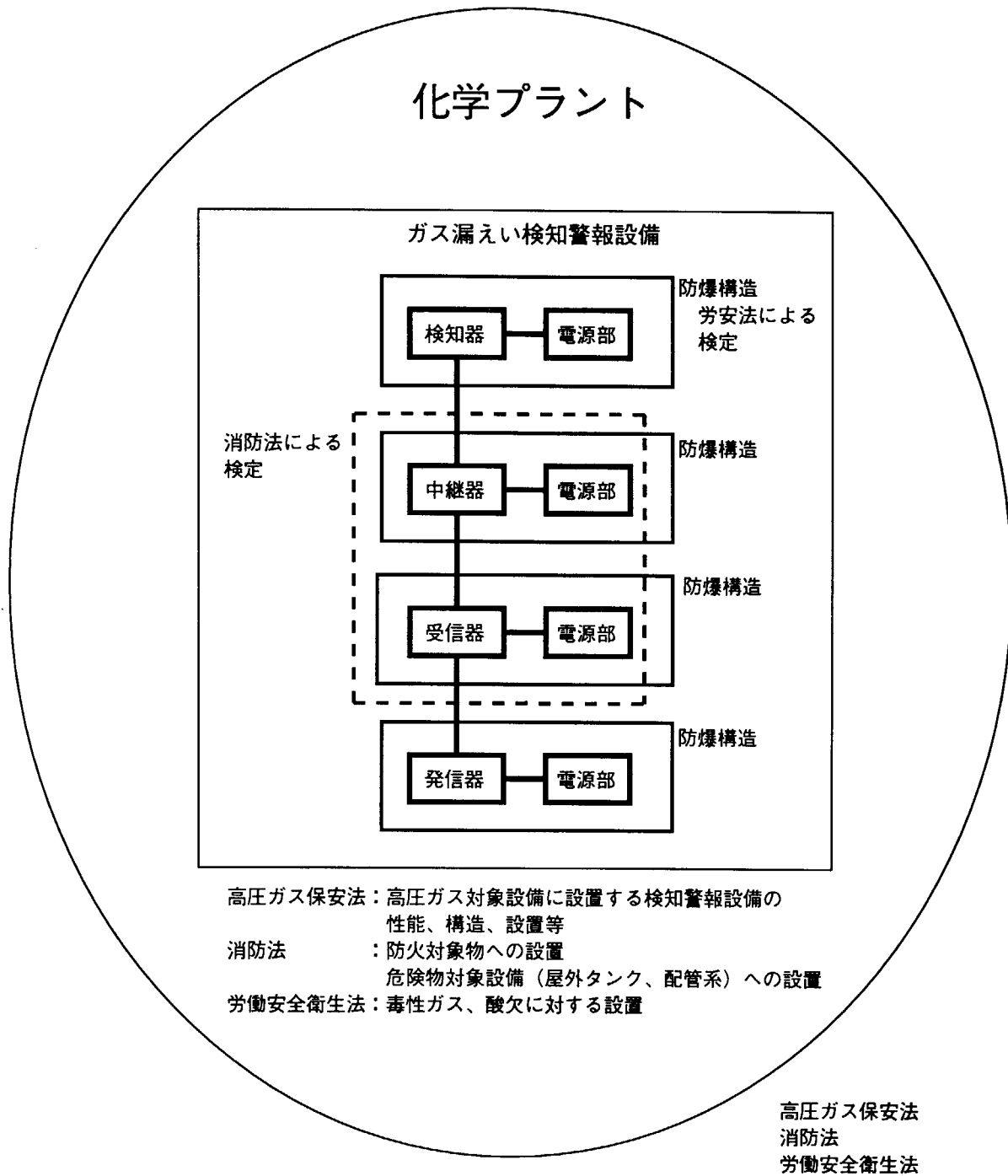
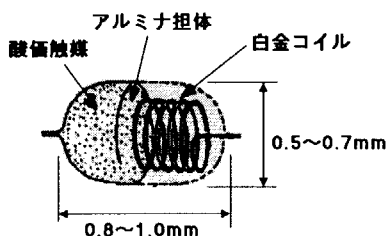
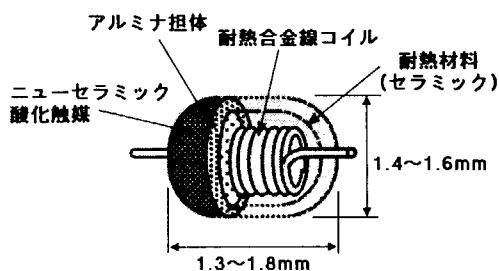


Fig. 2.1 化学プラントにおけるガス漏えい検知警報設備に関する法規制



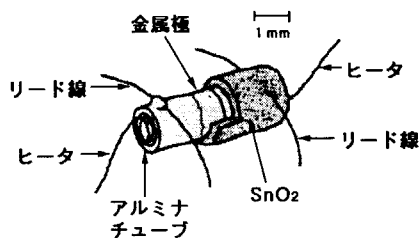
構造図

(1) 接触燃焼式固体センサ (従来型)



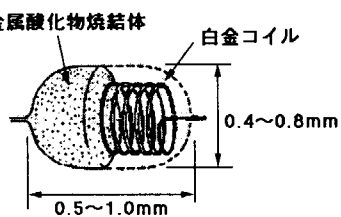
構造図

(2) 接触燃焼式固体センサ (ニューセラミック式)



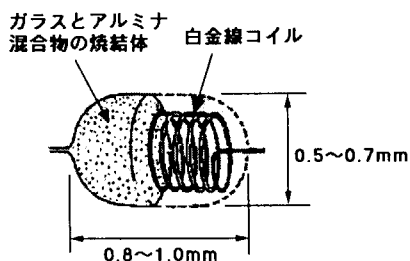
構造図

(3) 半導体式固体センサ (従来式)



構造図

(4) 半導体式固体センサ (熱線半導体式)



構造図

(5) 熱伝導式固体センサ

Fig 2.2 検出原理



検知部

指示警報部

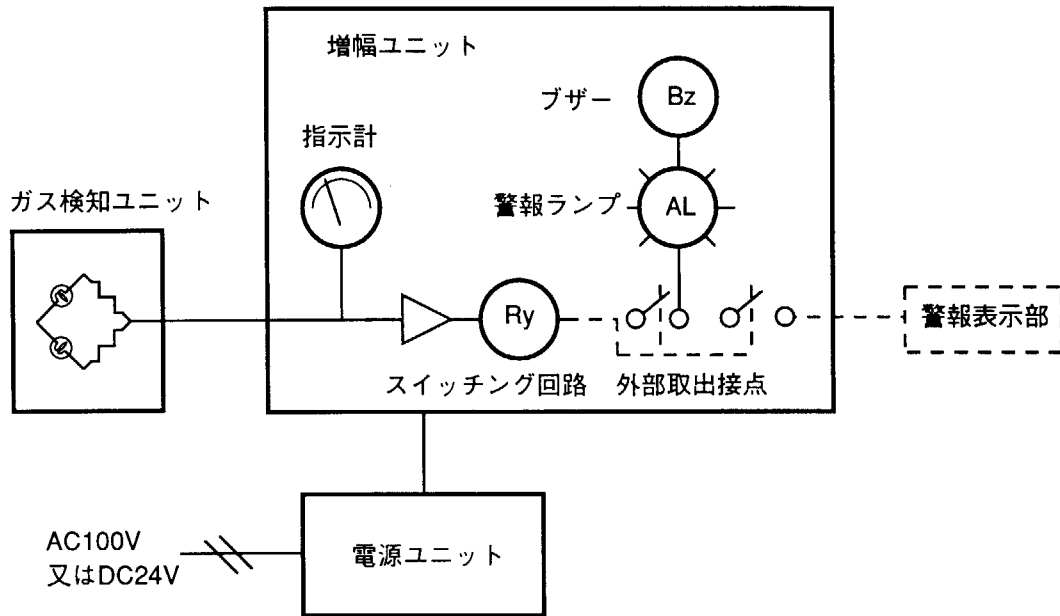


Fig 2.3 ガス検知警報器の基本構成

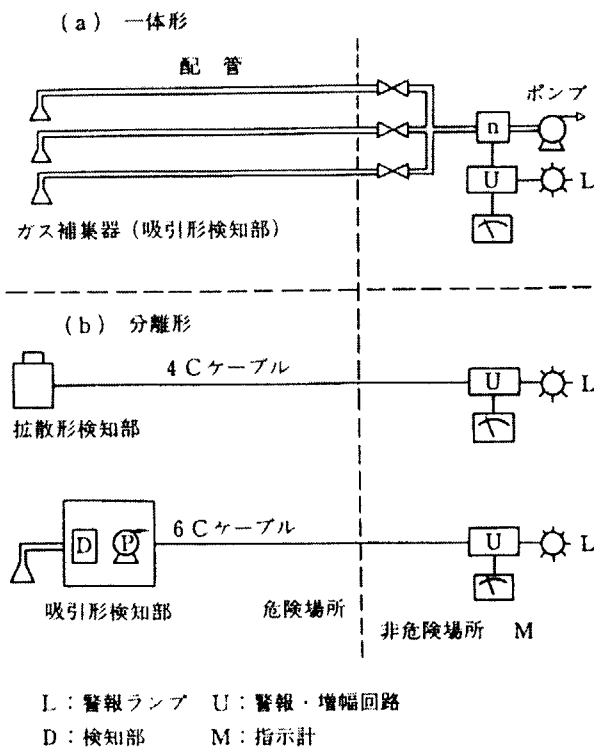
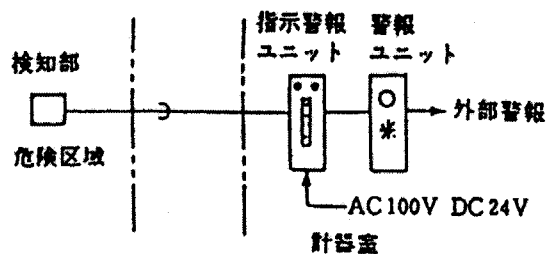
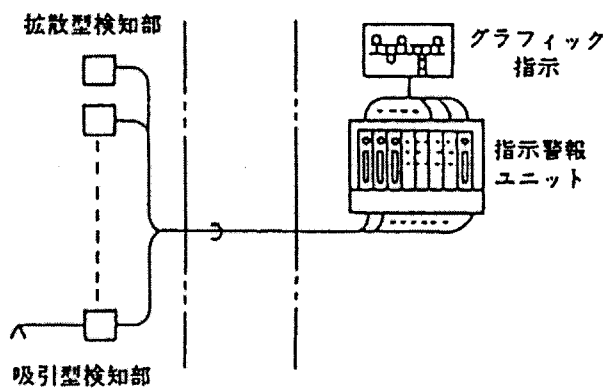


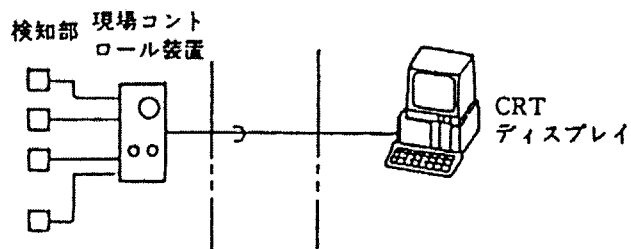
Fig 2.4 漏えいガスの導入方法



(a) 一点式構成例



(b) 多点式構成例



(c) 多点式構成例 (多重伝送)

Fig 2.5 ガス漏えい検知警報システムの構成例

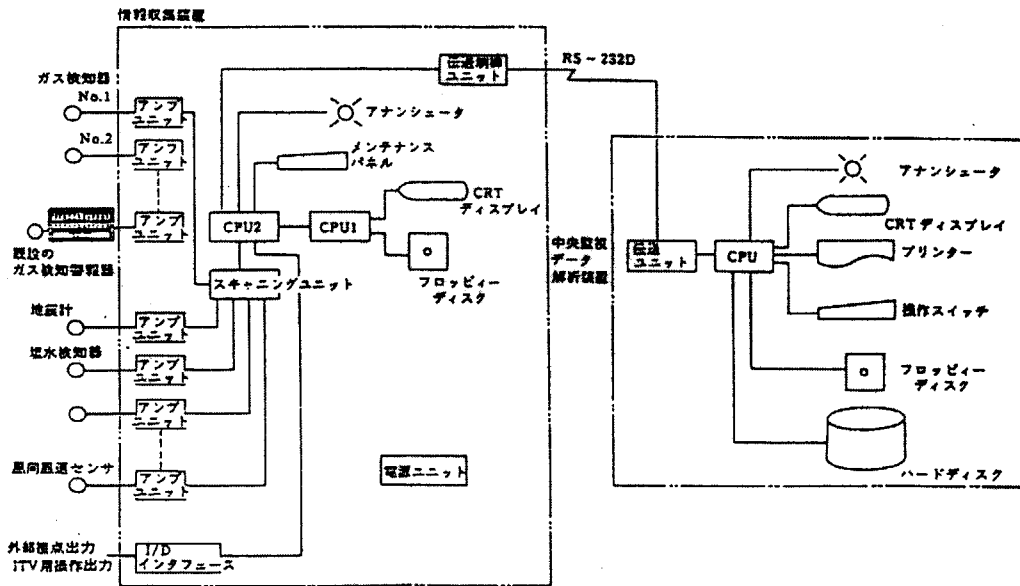


Fig 2.6 総合防災監視システムの構成例

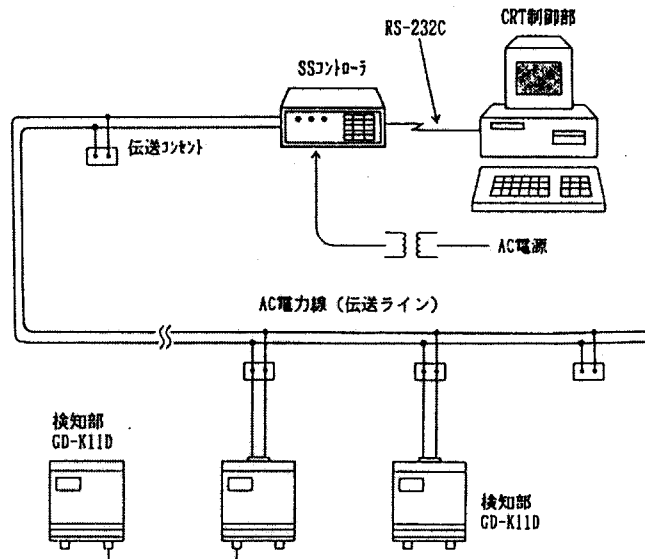


Fig 2.7 電力線搬送多重伝送方式総合防災監視システムの構成例

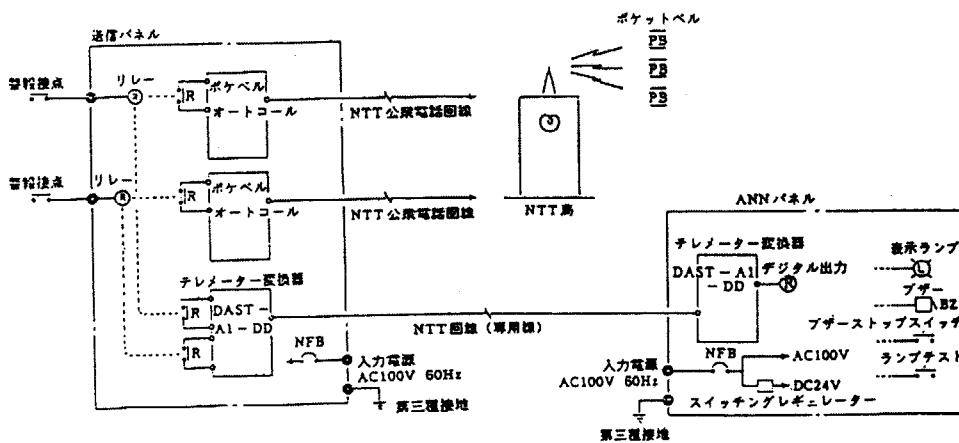


Fig 2.8 ポケットベル・オートコールシステムを利用した総合防災監視システムの構成例

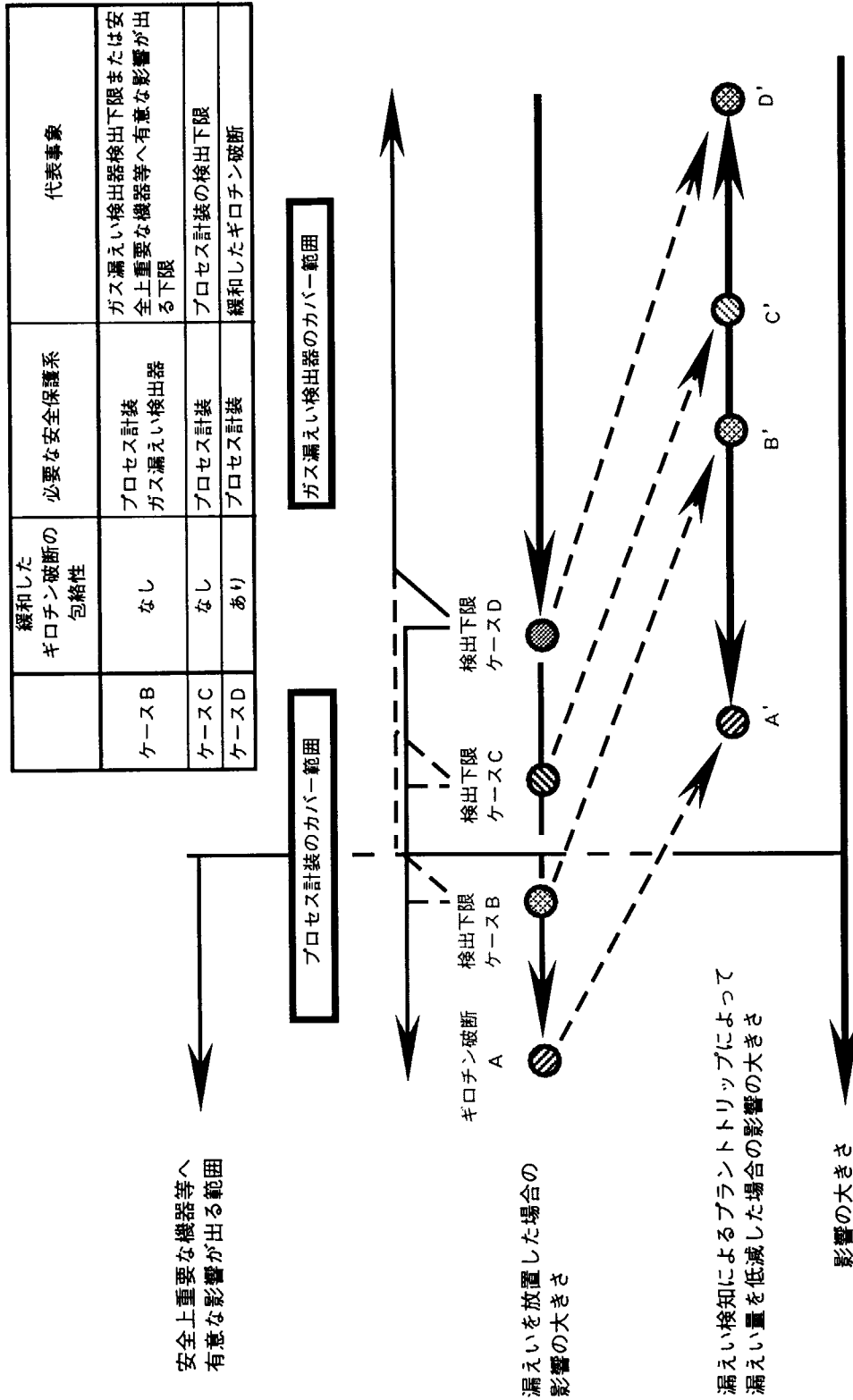


Fig. 3.1 漏えい規模の包絡性と漏えい検知



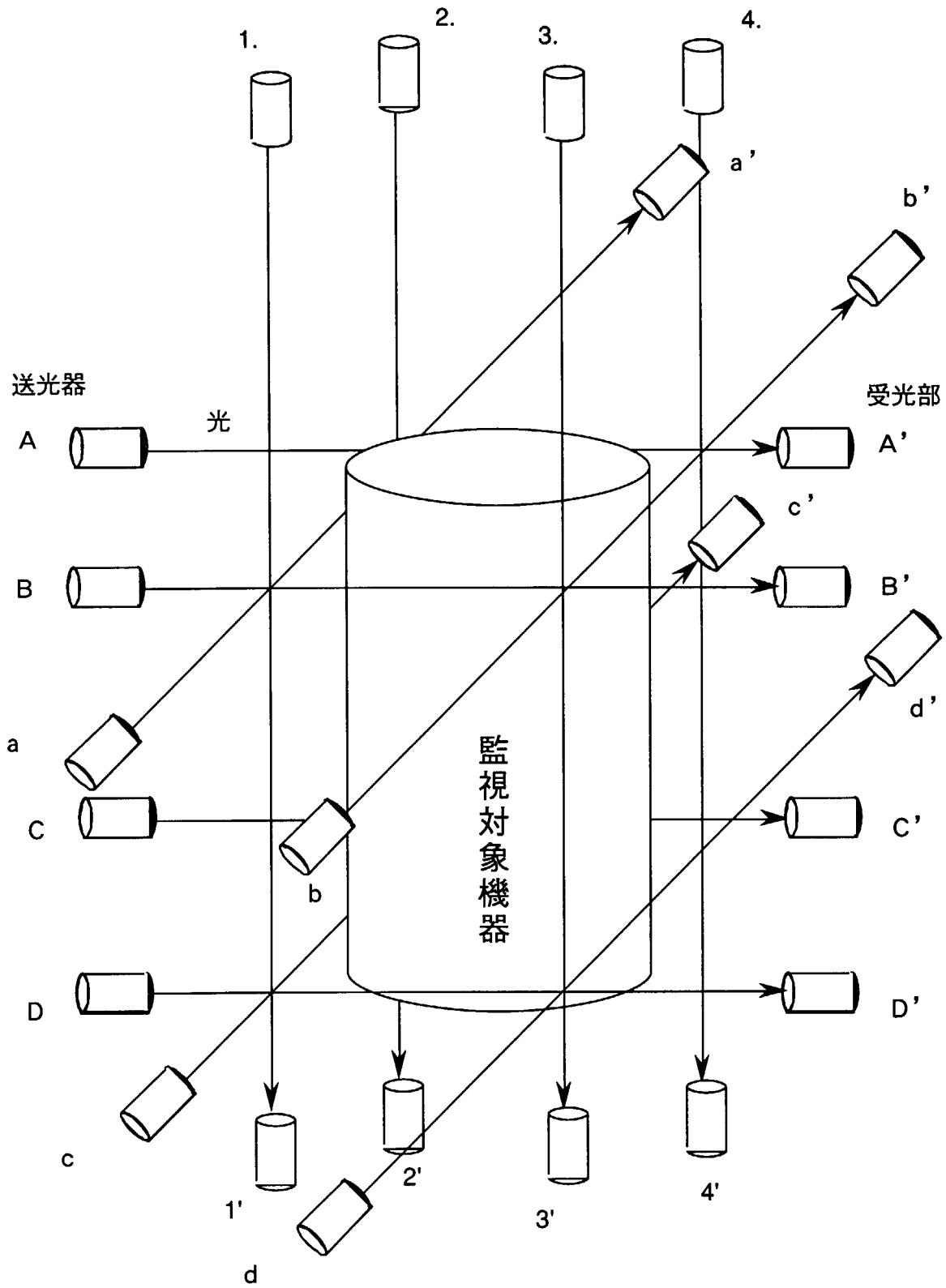


Fig. 3.3 光学式漏えい検知器の高度化

## 参考1 高温ガス炉—水素製造システムの概要

### 1.1 HTGR 水素製造システムの概要

#### 1.1.1 2次系を有するシステム

2次系を有するシステムの一例を参考図—1—1に示す。多量の可燃物を取り扱う水素製造プラントを原子炉建家外の十分離れた位置に設置し火災爆発の影響を無くすために、このシステムでは原子炉—1次系ヘリウム配管—中間熱交換器—2次系ヘリウム配管の一部までを原子炉建家内に、2次系ヘリウム配管の大部分と水素製造プラントを原子炉建家外に設置する。<sup>(1)</sup> また、2次系ヘリウム配管と水蒸気改質器の耐震クラスをC (S2) として設計することによって、これら同時破損による原子炉建家内への可燃性ガスの浸入を設計基準事象から排除する計画である。<sup>(2)</sup>

以上により、水素製造プラントの大部分を一般化学プラント並みに設計することができるため、水素製造プラントの経済性には優れるが、反面、2次系ヘリウム配管の設置によるコストアップとここでの熱損失の増大につながる。初期のHTGR水素製造システムでは、おそらくこのタイプが採用されることになると予想される。

#### 1.1.2 2次系削除システム

2次系削除システムの一例を参考図—1—2に示す。このシステムでは、原子炉—1次系ヘリウム配管—水蒸気改質器—蒸気発生器—原料供給配管、生成ガス配管、給水配管の一部までを原子炉建家内に設置する。<sup>(3)</sup> このシステムは究極のHTGR水素製造システムと考えられ、2次系削除による経済効果は大きいですが、多量の可燃性ガスを原子炉建家内に導入するため、解決すべき課題が多く、社会的な受容性の観点からも超えるべきハードルが多い。

### 1.2 HTTR 水素製造システムの概要

HTTR水素製造システムではHTTRの核熱を利用してLNGを水蒸気改質し、水素を製造する。HTTR水素製造システムでは、水素製造プラントを原子炉建家外の十分離れた位置に設置することによって、水素製造プラントの大部分を一般化学プラント並みに設計することを第一目標とし、2次系を有するシステムが採用されており、その概要は以下の通りである。<sup>(1)、(2)</sup>

#### 1.2.1 全体構成

HTTR原子炉本体、水素製造プラント及びHTTR原子炉本体の中間熱交換器と水素製造プラントを接続する高温二重配管の概略系統構成について、9年度までに原研が行った設計成果に基づく鳥瞰図及びフローチャートを模式的に各々参考図—1—3、参考図—1—4に示す。また、HTTR原子炉本体の系統配置を参考図—1—5に示す。また、プラント設置場所を参考図—1—6に、配置を参考図—1—7に示す。

#### 1.2.2 HTTR原子炉本体

HTTRは定格原子炉熱出力が30MWであり、この熱で原子炉冷却材(1次ヘリウム)は、高温試験運

転と称する運転モードにおいて、原子炉出口で950℃に昇温される。水素製造プラントは、HTTR 原子炉施設の運転モードとして、並列運転・高温試験運転のとき運転する。並列運転時には、原子炉からの原子炉冷却材は、二重管の内管内を通り、途中の分岐で流量比約2:1で分配され、約2/3が1次加圧水冷却器に、残り約1/3が中間熱交換器に導かれる。両熱交換器で冷却された原子炉冷却材は、ガス循環機で昇圧された後、両熱交換器の二重管の内・外胴環状部を通り、さらに、二重管の環状部を経て分岐部で再び合流し、定格出力時には395℃で原子炉に戻る。この結果、中間熱交換器では、定格出力時に約10MWの熱が原子炉冷却材から2次側のヘリウムガスに伝達される。この2次ヘリウムは、中間熱交換器出口で、定格出力時にノミナル905℃まで昇温することが許されている（中間熱交換器伝熱管の最高使用温度が955℃であるため）。

並列運転・高温試験運転時における原子炉の定格出力時主要条件、並びに、中間熱交換器の2次ヘリウム条件（出口温度905℃の場合）を参考表-1-1に示す。

### 1.2.3 水素製造プラント

水素製造プラントは、参考図-1-3、参考図-1-4に示したように、2次ヘリウム冷却系において、水蒸気改質器を起点としてヘリウム冷却器に接続する単管と高温二重配管との接続部まで、並びに、この範囲内の2次ヘリウム系機器の2次側及びその下流の設備（LNG供給タンクを含める）の総称であり、給水系、原料供給系、改質ガス系等を含む。水蒸気改質器入口での2次ヘリウムは、高温二重配管を通る間に放熱あるいは高温/低温2次ヘリウム間熱交換による熱損失により、中間熱交換器出口2次ヘリウム温度より降温し、中間熱交換器出口温度が905℃の場合に対して、保守的に、即ち、断熱材の劣化等を過大に見積り、880℃としている。

水素製造プラントでは、2次系ヘリウム配管と水蒸気改質器の耐震クラスをC (S2) として設計することによって、これらの同時破損による原子炉建家内への可燃性ガスの浸入を設計基準事象から排除する計画である。

一方、原子炉建家外の火災爆発に対しては水素製造プラントを原子炉建家から十分離れた位置に設置することによって一般化学プラント並の安全レベルで設計することを第一目標としているが、十分な離隔距離を取ることが實際上困難なことが予想される。この場合には、LNGを大量に貯蔵する供給タンクを常圧地下式とすることによってファイアボールの発生を防止するとともに、吸引ダクト、防爆型吸引ファン及びフレアスタックを備えたフードをタンク上部に設けることによって蒸気雲爆発の発生を防止する計画である。

なお、製造した水素を含む生成ガスも同様に別途設置するフレアスタックにて焼却処分する計画である。

### 参考文献

- (1) 羽田一彦、「高温ガス炉—水素製造システムの汎用性を有する安定な制御設計概念」、日本原子力学会誌、vol. 38, No. 10, pp834~844 (1996年)
- (2) 西原哲夫、羽田一彦、塩沢周策、「高温ガス炉—水素製造システムの安全設計の考え方の提案（火災・爆発事故対策を中心に）」、JAERI-Research 97-022、(1997)



- (3) Heiko Barnert, "Progress and Safety Aspects in Process Heat Utilization from Nuclear Systems", Proceedings of 3rd JAERI Seminar on HTGR Technologies, 241(1994)

参考表一 1 - 1 HTTR原子炉施設の並列運転・高温試験運転時における  
定格出力時主要条件

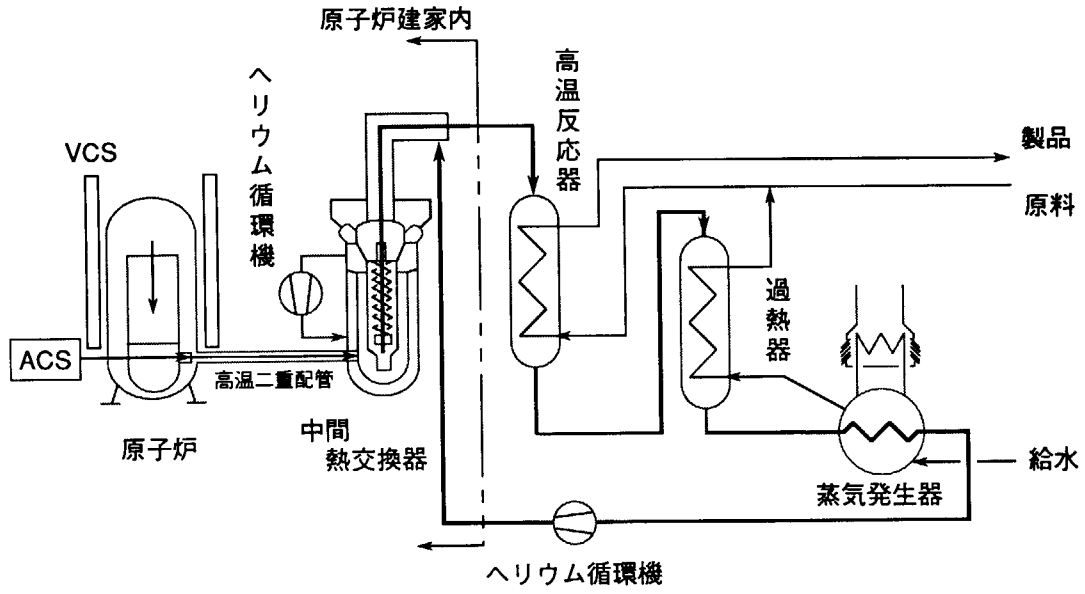
(1) 原子炉

熱出力 (MW)	30
原子炉冷却材 材質	ヘリウムガス
入口／出口温度 (°C)	395／950
入口／出口圧力 (kg/cm <sup>2</sup> g)	40.2／40.0
流量 (t/h)	36.5
原子炉圧力容器 材質	2・1/4Cr-1Mo鋼NT材
最高使用温度 (°C)	440
最高使用圧力 (kg/cm <sup>2</sup> g)	48

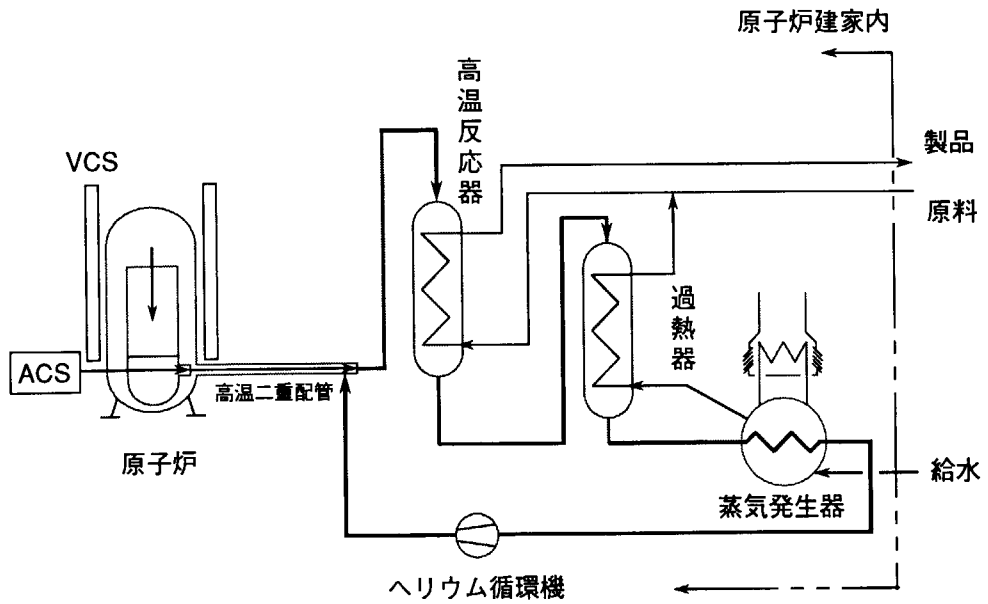
(2) 中間熱交換器

(条件：水素製造プラント接続時において2ヘリウム出口温度が905°C)

交換熱量 (MW)	10
2次ヘリウム入口圧力 (kg/cm <sup>2</sup> g)	41
2次ヘリウム流量 (t/h)	9.07
伝熱面積 (m <sup>2</sup> )	244
最高使用温度 (°C)	
伝熱管	955
2次冷却材入口室	350
低温管板	430
最高使用圧力 (kg/cm <sup>2</sup> g)	
伝熱管	3

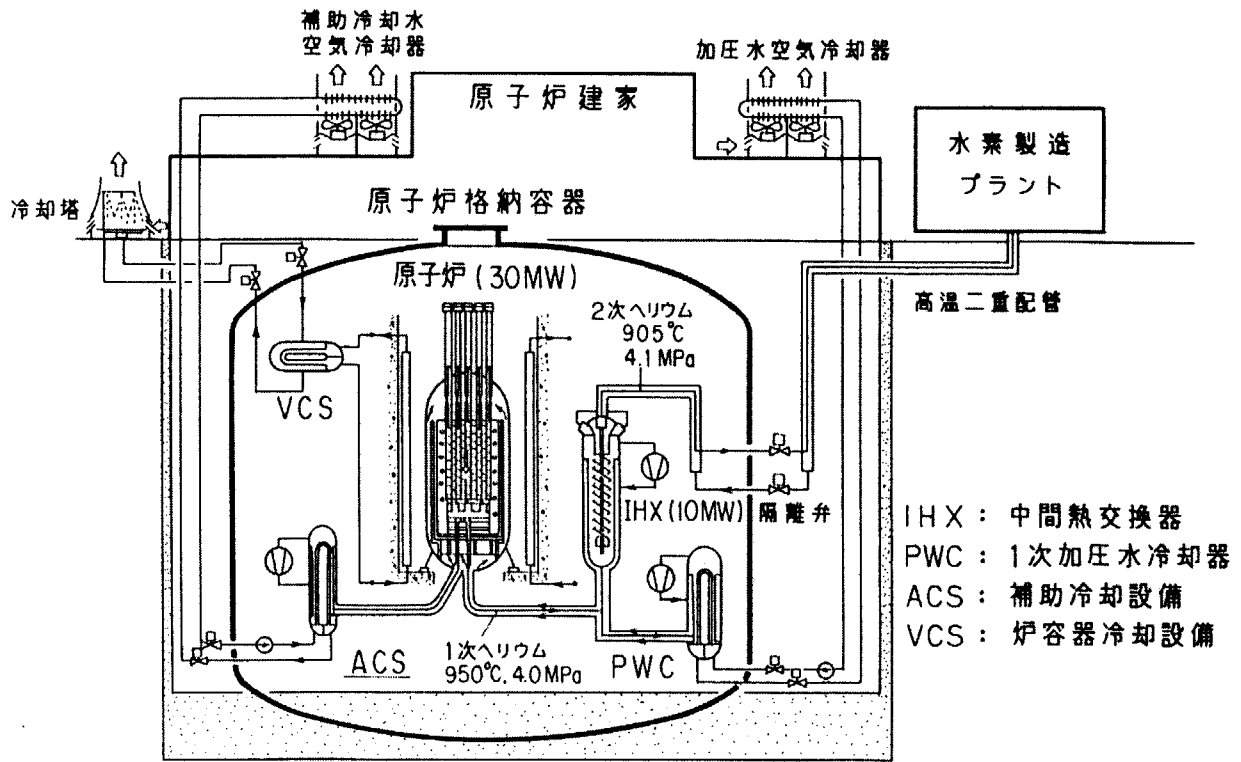


参考図-1-1 HTGR-水素製造プラントの系統構成  
(2次系を有する場合)

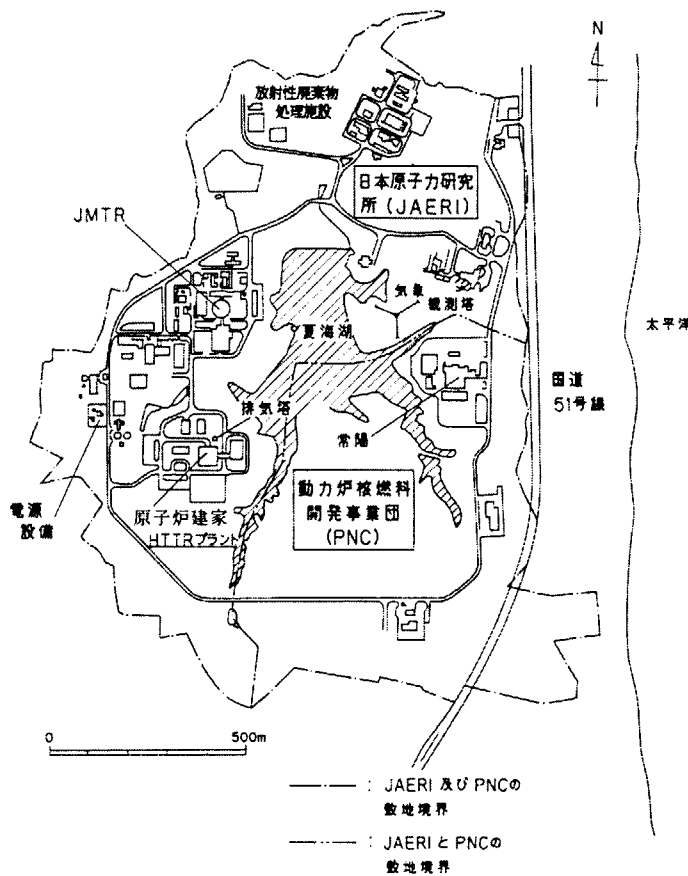


参考図-1-2 HTGR-水素製造プラントの系統構成  
(2次系削除システムの場合)

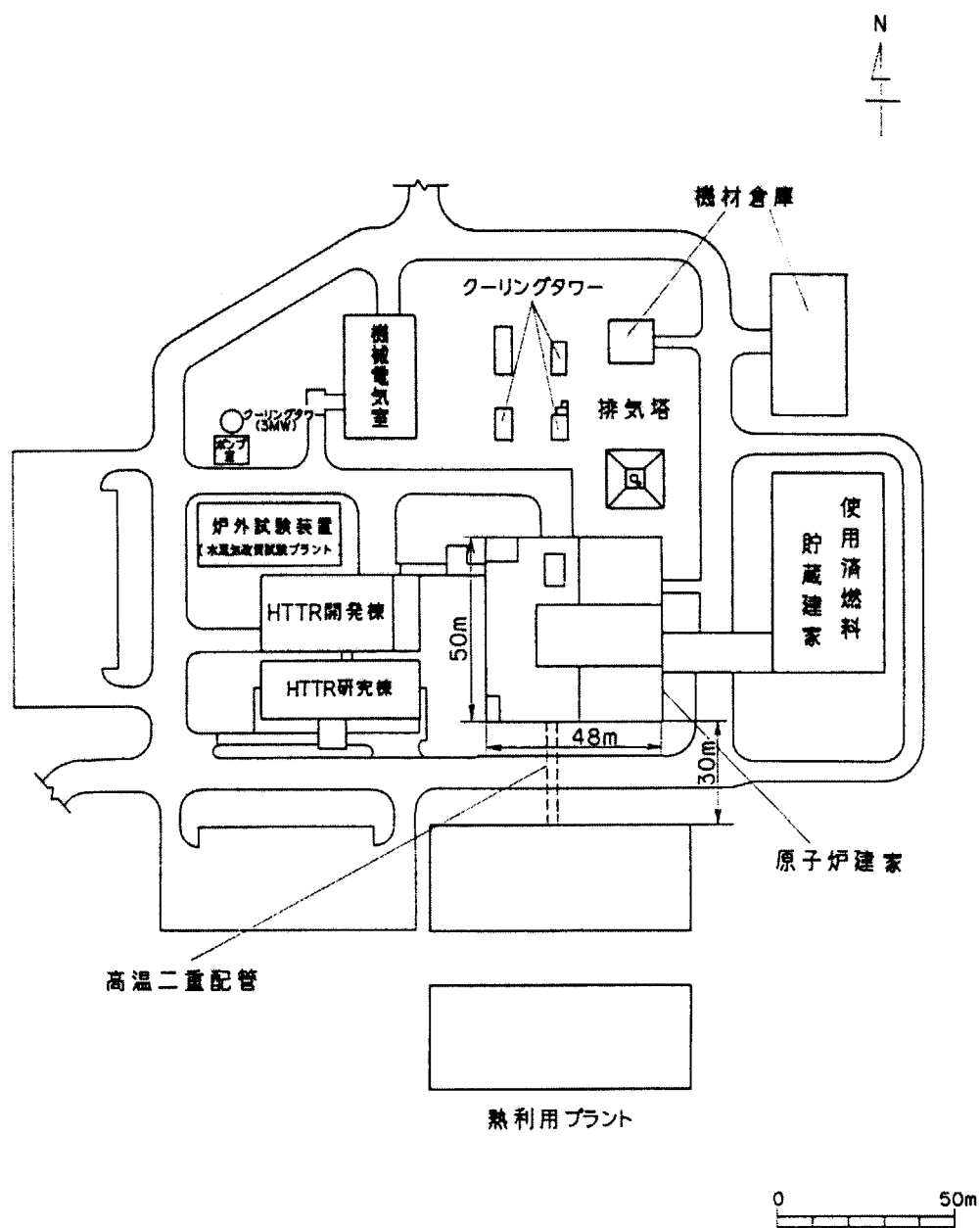




参考図-1-5 HTTR原子炉本体の系統配置図



参考図-1-6 HTTRプラントの設置場所



参考図 - 1 - 7 HTTR原子炉施設配置

## 参考2 原子力施設における火災爆発対策

### 2.1 発電用軽水型原子炉施設

#### 2.1.1 安全設計審査指針

原子力安全委員会は、発電用軽水型原子炉施設（以下、「軽水炉」と略す）の設置（変更）許可等に関する安全審査における各種指針を設けているが、そのうち、火災爆発に関連するものは参考表-2-1に示す「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」（以下、「安全設計審査指針」と略す）の4項目である。

「指針3.」では敷地境界外における爆発等に対する設計上の考慮を、「指針4.」では原子炉施設内部において発生する爆発等によるミサイルに対する設計上の考慮を、「指針5.」では原子炉施設内部において発生する火災に対する設計上の考慮を、「指針33.」では冷却材喪失事故後に格納施設内に発生する水素又は酸素に対する設計上の考慮を求めている。(1)、(2)

#### 2.1.2 火災防護に関する審査指針

一時期、特に海外の軽水炉において、火災が多発したため、原子力安全委員会は、「安全設計審査指針」を受ける形で、軽水炉の安全機能維持の観点から、火災防護に関して考慮すべき事項をまとめた。これが、参考表-2-2に示す「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」（以下、「火災防護審査指針」と略す）である。

従来の軽水炉では、「安全設計審査指針」に従って、多量の可燃物質を施設内に持ち込まないように設計していたため、「火災防護審査指針」では施設内に少量存在する可燃物の発火もしくは着火に対する設計上の考慮に力点が置かれている。(1)、(2)

#### 2.1.3 安全設計方針と適合のための設計方針

ここでは、沸騰水型軽水炉（以下、BWR と略す）の代表として「北陸電力能登原子力発電所」を、加圧水型軽水炉（以下、PWR と略す）の代表として「日本原子力発電敦賀第二発電所」を選択の上、設置（変更）許可申請書添付書類八の記載内容によって実際の設計でどのように考慮されているかを調査した。

##### (1) 北陸電力能登原子力発電所

設置許可申請書添付書類八に記載されている「火災に対する設計上の配慮」を参考表-2-3に、火災爆発に関連する安全設計方針を参考表-2-4に示す。

原子炉施設内への油の持ち込みに対しては、量の制限、火災検知及び消火による対応を、また、発火性又は引火性の液体又は気体を内包する系統に対しては、漏えい防止対策と電気計装設備の防爆化等による対応を考慮しており、更に一步進んだ漏えい検知までは考慮していないことが分かる。

なお、冷却材喪失事故後に格納施設内に発生する水素又は酸素に対しては、リコンバイナによる対応を考えている。設置許可申請書添付書類八の機器設計の項によれば、事象進展が緩慢であるため、事故発生後30分以内に中央制御室から手動操作により起動し、3時間以内に系等機能を発揮できれば十分としており、ここでも発生ガス濃度を監視することまでは考えていない。<sup>(3)</sup>

## (2) 日本原子力発電敦賀第二発電所

設置許可申請書添付書類八に記載されている火災爆発に関連する安全設計方針を参考表-2-5に示す。記載内容はほぼ北陸電力能登原子力発電所の場合と同様であるが、冷却材喪失事故に関してはBWRより更に事象進展が緩慢であるため、リコンバイナ等がなくとも対応措置が取れるとしている。<sup>(4)</sup>

## 2.2 高速増殖炉もんじゅ

上記のように軽水炉においては、多量の可燃物を原子炉施設内に持ち込まないように設計しているため、火災爆発に対しては火災検知と消火に力点を置けば、原子炉の安全を十分に確保できた。しかし、高速増殖炉においては減速材及び冷却材として液体ナトリウムを使用しており、このナトリウムが化学的に極めて活性であるため、漏えいは即激しい火災を意味する。

そのため、原子力安全委員会では、高速増殖炉原子炉施設の安全性を評価する際の基本的な考え方について調査審議を行い、検討結果として「ナトリウムが化学的に活性であるためナトリウム火災対策を考慮した設計が必要であること。」等を指摘し、「安全評価における選定事象の例として、蒸気発生器伝熱管からの小漏えい、1次冷却材漏えい事故、2次冷却材漏えい事故、1次ナトリウム補助設備からのナトリウム漏えい事故、蒸気発生器伝熱管破損事故」等を挙げた。

### 2.2.1 火災防護に関する安全設計基本方針等

設置許可申請書添付書類八に記載されている「ナトリウムに対する設計上の考慮」と「火災に対する設計上の考慮」を参考表-2-6に示す。表から分かるようにナトリウム漏えい検出設備を設置することを挙げており、漏えい検知器の設置を明記した原子力施設は「もんじゅ」が初めてである。<sup>(5)</sup>

### 2.2.2 安全設計方針と適合のための設計方針

火災爆発に関連する安全設計方針を参考表-2-7に示す。ナトリウムの特異性を設計上で考慮した以外は、軽水炉の場合とほぼ同様である。<sup>(5)</sup>



### 2.2.3 ナトリウム漏えい検知器

「HTTRに接続する水素製造システム」に採用するガス検知器の検討において参考にするため、「もんじゅ」に採用されたナトリウム漏えい検知器の概要を調査した。

「もんじゅ」では、ナトリウムを内蔵する機器、配管と保温層間の雰囲気ガスをサンプリング配管によって検出器に導き、サンプリングガス中にナトリウムエアロゾルが含まれる場合にこれを検出するガスサンプリング型ナトリウム漏えい検知設備として下記の3タイプを適宜使用している。これらはいずれも100g/hの漏えいを24時間以内に検出できる性能を有している。<sup>(6)</sup>

- ①ナトリウムイオン化検出器：サンプリングガス中にナトリウムエアロゾルが含まれる場合、ナトリウムエアロゾルが高温に保たれたフィラメントにより電離イオン化され、フィラメントとコレクタ間に電流が流れることを利用（参考図-2-1参照）
- ②差圧検出器：サンプリングガス中にナトリウムエアロゾルが含まれる場合、ナトリウムエアロゾルがサンプリングラインの途中に設置したフィルタに付着することによってフィルタ前後の差圧が増加することを利用（参考図-2-2参照）
- ③放射線イオン化検出器：サンプリングガス中にナトリウムエアロゾルが含まれる場合、ナトリウムエアロゾルがイオン化されたガスに付着することにより、イオン移動速度が減少し、イオン電流が減少する。この電流変化を標準イオン室でのイオン移動速度に基づいたイオン電流と比較し、電位差として検出できるようにした検出器（参考図-2-3参照）

主要なナトリウム配管の保温層は数メートル毎に仕切り板によってセグメント化されており、各セグメント毎にガスサンプリング型ナトリウム漏えい検知設備が1個設置されている。

なお、ガードベッセル等の容器内には更に接触型ナトリウム漏えい検出設備も設置されており、これは検出器の電極間にナトリウムが接触することにより、電極間の電気抵抗が低下することを検出するものである。

ここで注意すべき点は、このように高性能のガスサンプリング型ナトリウム漏えい検知設備を設置しているものの、安全評価上はこれに全くクレジットを要求していないことである。詳細が不明ではあるが、これらの検出器はナトリウム配管におけるLBBを保証するためだけに設置されているものと理解される。

また、ナトリウム機器、配管の設置されている部屋には更に火災検知器として白煙検知器が複数台されている。多くのナトリウム実験設備では白煙検知器がよく使用されている。先のもんじゅのナトリウム漏えい事故において漏えい検出より先に白煙検知器が警報を発したのは漏えい位置が保温層の外であったためである。

## 2.3 HTTR

## 2.3.1 火災防護に関する安全設計基本方針等

設置許可申請書添付書類八に記載されている「火災に対する設計上の考慮」を参考表－2－8に示す。表から分かるように、これは軽水炉における「火災に対する設計上の考慮」をベースに作成されている。<sup>(7)</sup>

## 2.3.2 安全設計方針と適合のための設計方針

火災爆発に関連する安全設計方針を参考表－2－9に示す。上記と同様に、軽水炉の場合とほぼ同様である。<sup>(7)</sup>

## 2.4 水冷却型試験用原子炉施設等における火災爆発関連安全設計

「水冷却型試験用原子炉施設に関する安全設計審査指針」、「核燃料施設安全審査基本指針」、「ウラン加工施設安全審査指針」、「再処理施設安全審査指針」、「放射性廃棄物埋設施設の安全設計審査の基本的な考え方」を参考表－2－10に示す。<sup>(1)、(2)</sup>

## 参考文献

- (1) 原子力安全委員会 安全審査指針集 監修科学技術庁原子力安全局原子力安全調査室  
株式会社大成出版社
- (2) 原子力規制関係法令集 監修科学技術庁原子力安全局 株式会社大成出版社
- (3) 北陸電力能登原子力発電所 原子炉設置許可申請書 昭和62年1月
- (4) 日本原子力発電敦賀第二発電所 原子炉設置許可申請書 昭和54年3月
- (5) 高速増殖炉もんじゅ発電所 原子炉設置許可申請書 昭和55年12月
- (6) 高速増殖炉開発実用化データ集 青木、能澤監修 株式会社テクノ・プロジェクト
- (7) 日本原子力研究所 大洗研究所 原子炉設置変更許可申請書 平成元年12月

参考表-2-1 「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」  
における火災爆発関連事項

番号	タイトル	内容	備考
指針 3.	外部人為事象に対する設計上の考慮	<ol style="list-style-type: none"> <li>安全機能を有する構築物、系統及び機器は、想定される外部人為事象によって、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。</li> <li>原子炉施設は、安全機能を有する構築物、系統及び機器に対する第三者の不法な接近等に対し、これを防御するため、適切な措置を講じた設計であること。</li> </ol>	「外部人為事象」とは、飛行機落下、ダムの崩壊、爆発等をいう。
指針 4.	内部発生飛来物に対する設計上の考慮	安全機能を有する構築物、系統及び機器は、原子炉施設内部で発生が想定される飛来物に対し、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。	「内部発生飛来物」とは、内部発生エネルギーの高い流体を内蔵する弁及び配管の破断、高速回転機器の破損、ガス爆発、重量機器の落下等によって発生する飛来物をいう。なお、二次的飛来物、火災、溢水、化学反応、電氣的損傷、配管の破損、機器の故障等の二次的影響も考慮するものとする。
指針 5.	火災に対する設計上の考慮	原子炉施設は、火災発生防止、火災検知及び消火並びに火災の影響の軽減の3方策を適切に組み合わせて、火災により原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。	「火災により原子炉施設の安全性を損なうことのない設計」とは、「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」に適合した設計をいう。
指針 3 3.	格納施設雰囲気制御する系統	<ol style="list-style-type: none"> <li>格納施設雰囲気浄化系は、原子炉格納容器設計用の想定事象に対し、その事象に起因して環境に放出される放射性物質の濃度を減少させる機能を有する設計であること。</li> <li>可燃性ガス濃度制御系は、格納施設の健全性を維持するため、原子炉格納容器設計用の想定事象に対し、その事象に起因して原子炉格納容器内に存在する水素又は酸素の濃度を抑制することができる機能を有する設計であること。</li> <li>格納施設雰囲気制御する系統は、その系統を構成する機器の単一故障の仮定に加え、外部電源が利用できない場合においても、その系統の安全機能が達成できるように、多重性又は多様性及び独立性を備え、かつ、試験可能性を備えた設計であること。</li> </ol>	「格納施設雰囲気を制御する系統」とは、格納施設雰囲気浄化系及び可燃性ガス濃度制御系をいう。「格納施設雰囲気浄化系」とは、BWRにおいては、非常用ガス処理系、非常用再循環ガス処理系、原子炉格納容器スプレイ系等を、PWRにおいては、アニユラス空気再循環設備、原子炉格納容器スプレイ系等をいう。「水素又は酸素の濃度を抑制する」とは、原子炉格納容器の内部を不活性な雰囲気中に保つこと、又は必要な場合再結合等により水素若しくは酸素の濃度を燃焼限界以下に抑制することをいう。

参考表-2-2 「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」

火災防護に関する審査指針	
火災により原子炉施設の安全性が損なわれることを防止するためには、安全機能の重要度に応じて、以下の火災発生防止、火災検知及び消火並びに火災の影響の軽減の3方策を適切に組合せた設計でなければならない。	
1. 火災発生防止	
1-1	原子炉施設の設計にあたり、その運転時はもとより故障時にも火災の発生を防止するための予防措置が講じられていること。
1-2	安全機能を有する構築物、系統及び機器は、実用上可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用する設計であること。
1-3	原子炉施設内の構築物、系統及び機器は、落雷・地震等の自然事象により火災を生ずることがないように防護した設計であること。
2. 火災検知及び消火	
2-1	火災検出装置及び消火装置は、安全機能を有する構築物、系統及び機器に対する火災の悪影響を限定し、早期消火を行える設計であること。
2-2	消火装置は、その破損、誤動作又は誤操作によって安全機能を有する構築物、系統及び機器の安全機能を失わない設計であること。
2-3	消火装置は、火災と同時に有意に起こると考えられる自然事象によっても、その性能が著しく阻害されることがない設計であること。
3. 火災の影響の軽減	
3-1	安全機能を有する構築物、系統及び機器を含む区域は、その重要度に応じ、隣接区域の火災による影響も含めて火災の影響の軽減対策が講じられていること。
3-2	原子炉施設内のいかなる場所の想定される火災に対しても、この火災により原子炉に外乱が及び、かつ、安全保護系、原子炉停止系の作動を要求される場合には、単一故障を仮定しても、原子炉を高温停止できる設計であること。 低温停止に必要な系統は、原子炉施設内のいかなる場所の想定される火災によっても、その機能を失わない設計であること。

参考表-2-3 「北陸電力能登原子力発電所原子炉設置許可申請書  
添付書類八」に記載されている「火災に対する設計上の配慮」

番号	タイトル	内容
1.1.10	火災に対する設計上の配慮	<p>火災発生により原子炉施設の安全性が損なわれることを防止するために、「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」に基づき以下の三つの原則、いわゆる「火災についての多重防護」の設計思想を適切に組合せた火災対策設計を行う。</p> <p>(1) 火災の発生を防止するため、原子炉施設を構成する構築物、系統及び機器は可能な限り不燃性、難燃性材料を用いる設計とする。また、落雷等の自然事象による火災発生を防護した設計とする。</p> <p>(2) 早期に火災を感知して早期消火を行うため、適切な火災感知器、消火装置を設置する。また、消火装置は、破損、誤動作等により安全上重要な系統及び機器の安全機能を失わないよう設計する。</p> <p>(3) 安全上重要な系統及び機器を設置する区域は、隣接区域の火災による影響を軽減する対策を講ずる設計とする。また、原子炉を高温及び低温停止に必要な系統は、火災を考慮した設計とする。</p>

参考表-2-4 「北陸電力能登原子力発電所原子炉設置許可申請書添付書類八」  
における火災爆発関連安全設計方針（その1）

番号	タイトル	安全設計方針	適合のための設計
指針3.	人為事象 に対する 設計上の 考慮	原子力発電所は、安全上重要な構築物、系統及び機器に対する第三者の不法な接近等にの人為事象に対し、これを防護するための適切な措置を講じた設計であること。	安全上重要な構築物、系統及び機器に対する第三者の不法な接近、妨害破壊行為及び核物質の不法な移動を未然に防止するため、下記の措置を講じた設計とする。 1. 安全上重要な構築物、系統及び機器を含む区域を設定し、それを取り囲む物的障壁を持つ防護された区域を設けて、これらの区域への接近管理、入退域管理を徹底する。 2. 探知区域を設け、警報、映像監視等、集中監視する設計とする。 3. 外部との通信設備を設ける。
指針5.	飛来物等 に対する 設計上の 考慮	安全上重要な構築物、系統及び機器は、想定される飛来物、配管のむち打ち又は流出流体の影響等から生じるおそれのある動的影響、熱的影響又は溢水によって原子炉の安全を損なうことのない設計であること。	(1) 格納容器内の配管破断時に、破断した配管がジェット反力によるホイッピングによって他の主要配管、格納容器を損傷しないよう、必要に応じて適宜破断した配管の動きを制限する構造物を設ける設計とする。 (2) 格納容器は、流出流体のジェット力及び流出流体の加熱による熱応力に対して耐えられるよう設計する。 (3) 工学的安全施設、原子炉緊急停止系等の安全上重要な系統及び機器は、多重性と多様性の信頼度を高めるため、各系統相互の離隔距離又は障壁によって分離し、ある区分の事故が他の区分に波及しないこと、及び1区分の損傷により安全保護系の機能が喪失しないように設計する。 (4) 非常用炉心冷却系の各ポンプ等が配置してある原子炉建屋最下階（地下2階）は、何らかの原因で原子炉建屋内で溢水事故が発生したとしても、溢水による非常用炉心冷却系のすべての区分（区分Ⅰ、Ⅱ及びⅢ）の機能が喪失しないように、区分管に隔壁を設ける設計とする。 (5) 本発電所では、発電所周辺における大爆発や、これに起因する飛来物は想定しえない。 (6) 本発電所周辺に飛行場はない。発電所上空には航空路等があるが、航空機は原則として発電所上空を飛行することを規制されている。発電所の上空の航空路等を飛行する航空機は巡航状態であり、航空機が発電所に落下する確率は十分小さく、約 $6.2 \times 10^{-9}$ 回/年である。したがって、航空機落下は考慮する必要はない。 (7) タービンミサイルについては、タービン発電機破損防止対策を行うことにより、タービン発電機の破損事故の発生確率を低くするとともに、発生したミサイルにより安全上重要な構築物、系統及び機器が損傷する確率を低くすることによって、原子炉の安全を損なう可能性が極めて低くなるよう設計する。 (8) 再循環ポンプのミサイルについては、再循環配管破断事故を想定しても、ポンプは破壊限界に対し十分余裕をもつので、ポンプミサイルを考慮する必要はない。

参考表-2-4 「北陸電力能登原子力発電所原子炉設置許可申請書添付書類八」  
における火災爆発関連安全設計方針（その2）

番号	タイトル	安全設計方針	適合のための設計
指針6.	火災に対する設計上の考慮	<p>安全上重要な構築物、系統及び機器は、適切な配置、防火壁の設置をする等、火災に対する防護上の配慮がなされるとともに、これらは実用上可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用する設計であること。</p> <p>また、これらの構築物、系統及び機器に対して、適切な火災検出装置及び消火装置を設置し、これらの装置の破損又は不側の作動があっても、構築物、系統及び機器は、それらの安全機能を失うことのない設計であること。</p>	<p>火災により原子炉施設の安全性が損なわれることを防止するために、「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」に基づき</p> <p>(1) 火災発生防止 (2) 火災検知及び消火 (3) 火災の影響の軽減</p> <p>の三つの原則の適切な組合せで設計するという、いわゆる「火災についての多重防護」の設計思想に従うこととし、具体的には下記により火災対策の設計を行う。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 発火性又は引火性の液体又は気体を内包する系統は、漏えい防止対策を行う設計とする。また、電気機器等は、系統の地絡、短絡等に起因する過電流による過熱を防止する設計とする。</li> <li>2. 安全上重要な構築物、系統及び機器は、実用上可能な限り不燃性、難燃性材料で構成する。やむを得ず油のような可燃性材料を使用する場合は、必要最低量とすることとする。</li> <li>3. 原子炉施設内の構築物、系統及び機器は、落雷等の自然事象による火災発生を防護する設計とする。</li> <li>4. 万一の火災発生に備えて、建屋内外の必要な箇所に火災感知器、水消火栓、可搬式消火器を設置する。また、火災感知器及び消火装置は、常用電源が喪失した場合でもその機能を失わない設計とする。なお、格納容器内の必要な箇所に温度検出器を設置する。</li> <li>5. ディーゼル発電機室及び油タンク室には固定式消火設備並びに後備の消火栓を設置する。なお、これら消火装置に破損や不測の作動があっても、安全上重要な構築物、系統及び機器の安全機能を失わないような設計とする。また、これらの消火装置は、火災と同時に有意に起こると考えられる地震等の自然事象によっても、その性能が著しく阻害されることがない設計とする。</li> <li>6. 安全保護系、原子炉緊急停止系、残留熱除去系、工学的安全施設等の安全上重要な系統及びこれらのケーブル、配管は、独立性を持たせるため物理的分離を図り、適切な離隔距離を取るか、又は必要に応じて障壁を設ける。これらと、消火装置の設計、配置を総合的に組合わせて単一火災発生により、重複性、独立性を持つ両系統が同時にその機能が損なわれることのない設計とする。特に、ケーブル・トレイ等が障壁を貫通する場合は、火災対策上、障壁効果を減少させないような構造とする。</li> <li>7. 原子炉施設内の想定される火災により、原子炉施設に外乱が及び、かつ、安全系の作動が要求される場合には、その安全系に動的機器の単一故障を仮定しても原子炉を高温停止できるよう設計する。また、低温停止に必要な系統は、原子炉施設内の想定される火災によってもその機能を失わないよう設計する。なお、中央制御室が火災等により操作不能となった歩合にも、中央制御室外から原子炉を高温停止及び低温停止できるよう設計する。</li> </ol>
指針33.	可燃性ガス濃度制御系	<p>可燃性ガス濃度制御系は、格納施設の健全性を維持するため、冷却材喪失事故後の格納施設内に存在する水素又は酸素の濃度を抑制することができ機能を有する設計であること。</p>	<p>可燃性ガス濃度制御系は、冷却材喪失事故が生じた場合、中央制御室から本系統を手動にて作動させることにより、不活性ガス系と相まって、格納容器内の水素濃度を4vol%未満又は酸素濃度を5vol%未満に維持し、可燃限界に達しないようにすることができる設計とする。</p> <p>本系統は、プロア、加熱器、再結合器、冷却器等からなり、単一故障を仮定しても安全機能を果たし得るよう独立2系統とする。</p>

参考表-2-5 「日本原子力発電敦賀第二発電所原子炉設置変更許可申請書  
添付書類八」における火災爆発関連安全設計（その1）

番号	タイトル	安全設計方針	適合のための設計
指針3.	人為事象 に対する 設計上の 考慮	原子力発電所は、安全 上重要な構築物、系統 及び機器に対する第三 者の不法な接近等にの 人為事象に対し、これ を防護するための適切 な措置を講じた設計で あること。	安全上重要な構築物、系統及び機器に対する等の人為事 象に対し、これを防護するための適切な措置を講じた設計 とする。 1. 安全上重要な構築物、系統及び機器を含む区域を設定 し、それをとり囲むフェンス等の物的障壁を設けて、 これらの区域への接近管理、出入退域管理を行える設 計とする。 2. 浸入警報装置を設け、これを集中監視する設計とする。 3. 外部との通信連絡設備を設ける。
指針5.	飛来物等 に対する 設計上の 考慮	安全上重要な構築物、 系統及び機器は、想定 される飛来物、配管の むち打ち又は流出流体 の影響等から生じるお それのある動的影響、 熱的影響又は溢水によ って原子炉の安全を損 なうことのない設計で あること。	想定される飛来物及び配管破断に伴う影響により原子炉の 安全を損なうことのない以下の方針に基づいて設計を行う。 (1) 高温高圧の流体を内包する原子炉冷却材圧力バウン ダリを構成する主要配管、主蒸気管及び主給水管に ついては、配管のターミナルエンド（配管固定部） 及びターミナルエンド間で、内圧、熱、地震力等 による応力の合計値が相対的に高い箇所を 想定する。この想定破断による配管のむち打ち、流 出流体のジェット力、雰囲気の変化及び溢水により、 炉心冷却機能、格納容器バウンダリの機能を損なう ことなく、また、他の主要配管の破断を誘発しない ように次の対策を講じる。 a. 破断想定箇所と防護対象機器は、十分離隔距離を取 る。 b. 破断想定箇所又は防護対象機器を障壁で囲む。 c. 上記のいずれかの対策がとれない場合、破断の影響 に十分耐えうる配管ホイップレストレイント、 ジェットバリア等を設ける。 また、防護対象機器は、配管破断による雰囲気変化 により機能が損なわれないように設計するとともに、 配管破断による溢水に対しては配置上の配慮を行う。 (2) タービンミサイルについては、タービン発電機の異 常振動防止、過速度防止装置の多重化、品質管理等 により破損事故の発生確率を小さくするとともに、 ミサイルの発生を仮想しても原子炉冷却材圧力バウ ンダリ及び使用済燃料ピットに到達する確率が小さ くなるよう配置等の配慮を行うことによって、原子 炉の安全を損なう可能性が極めて低くなるように設 計する。 (3) フライホイールを有する1次冷却材ポンプは、品質 管理、供用期間中検査、軸振動の常時監視等により ミサイルとなる可能性が極めて低くなるように設計 する。 (4) 航空機落下については、発電所近くに飛行場がなく、 かつ、発電所上空には定期航空路はなく、航空自衛 隊の練習空域はあるが発電所上空域は防衛庁通達に より原則として飛行できないようになっている。し たがって、航空機落下は考慮する必要はない。 (5) 本発電所敷地周辺の社会環境からみて、発電所周辺 での爆発及びこれに起因する飛来物により原子炉の 安全を損なうことはない。

参考表-2-5 「日本原子力発電敦賀第二発電所原子炉設置変更許可申請書  
添付書類八」における火災爆発関連安全設計（その2）

番号	タイトル	安全設計方針	適合のための設計
指針6.	火災に対する設計上の考慮	<p>安全上重要な構築物、系統及び機器は、適切な配置、防火壁の設置をする等、火災に対する防護上の配慮がなされるとともに、これらは実用上可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用する設計であること。また、これらの構築物、系統及び機器に対して、適切な火災検出装置及び消火装置を設置し、これらの装置の破損又は不働の作動があっても、構築物、系統及び機器は、それらの安全機能を失うことのない設計であること。</p>	<p>火災により原子炉の安全性がそこなわれることを防止するため</p> <p>(1) 火災発生防止 (2) 火災検知及び消火 (3) 火災の影響の軽減</p> <p>の3方策を適切に組合せて、原則として消防法、建築基準法等の国内法に基づき設計する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>安全上重要な構築物、系統及び機器は、実用上可能な限り難燃性、不燃性材料を使用する。特にケーブルについては難燃性のものを使用し、必要に応じ延焼防止材を併用するとともに、ケーブル等が隔壁を貫通する部分は必要に応じ防火材を使用する。また、建屋内の変圧器には原則として乾式又は不燃性油を使用する。</li> <li>火災区域には想定火災の種類、大きさ等に対し適切な検出装置及び消火装置を設置する。</li> <li>ディーゼル発電機室、1次冷却材ポンプ、ケーブル処理室等安全上重要な機器を設置している区域に相当量の可燃物があり、かつ、手動消火が困難な場合には遠隔消火装置を設ける。</li> <li>安全上重要な構築物、系統及び機器は防火壁を設けるか、若しくは適切な離隔距離、隔壁及び消火装置の組合せにより火災の影響を軽減し安全機器の機能をそこなわないようにする。</li> <li>安全上重要な構築物、系統及び機器は火災区域の換気系により、悪影響を受けないよう防火ダンパの設置や配置上の考慮を行う。</li> <li>中央制御室には可搬式消火器を設けるとともに、中央制御室にとどまることができない場合には、中央制御室外から原子炉を高温停止できるよう設計する。</li> </ol>
指針45.	可燃性ガス濃度制御系	<p>可燃性ガス濃度制御系は、格納施設の健全性を維持するため、冷却材喪失事故後の格納施設内に存在する水素又は酸素の濃度を抑制することができる機能を有する設計であること。</p>	<p>1次冷却材喪失事故後に原子炉格納容器内に蓄積される水素濃度が可燃限界に達するのは、事故後、長期間経過した後であり、水素の蓄積の割合はきわめて緩慢である。原子炉格納容器の健全性を維持するのに必要な処置は、水素濃度が可燃限界に達するまでに実施できる設計とする。</p>



参考表-2-6 「高速増殖炉もんじゅ発電所原子炉設置許可申請書添付書類八」  
に記載されている「火災に対する設計上の配慮」等

番号	タイトル	内容
1.1.6	ナトリウムに対する設計上の考慮	<p>(1) ナトリウムを内包し、内部に液面を有する機器は、その液面上を不活性ガス雰囲気とするとともにナトリウムが空気と接触しない構造とする。</p> <p>(2) ナトリウムを循環する安全上重要な系統及び機器は、ナトリウムの凍結により安全機能を失うことがないように考慮された設計とする。</p> <p>(3) 蒸気発生器伝熱管からの水漏えいに伴うナトリウム-水反応が発生した場合においても、原子炉の冷却が安全に行えるように、ナトリウム-水反応の影響を抑制できる設計とするとともに、崩壊熱除去に必要な設備は系統分離を行う。</p> <p>(4) 安全上重要な構築物、系統及び機器は、ナトリウムの漏えい時においても、ナトリウムの化学反応の影響により安全機能を失うことがないように考慮された設計とする。機器で安全上重要なものについては、系統分離を行ってナトリウム漏えいの影響を抑制する。ナトリウムを保有する系統、機器を収納する部屋には必要に応じて、ナトリウムとコンクリートが直接接触することを防止するため、鋼製のライナを室内床面等に設置するとともに、水などナトリウムと反応し易い物質を可能な限り離隔するよう設計する。</p> <p>(5) 事故時に一般公衆及び従事者が放射線被ばくを受けるおそれのある1次冷却材の漏えいに対しては、その化学反応または反応生成物による過度の影響を緩和するよう適切な手段を備える。このため放射性のナトリウムを保有する系統、機器を収納する部屋には適切な場所にナトリウム漏えい検出設備を設け、1次冷却材漏えい事故に対処できるようにする。更に、運転時の雰囲気を低酸素濃度雰囲気とするよう設計上考慮する。原子炉容器及び1次主冷却系の配管、機器は原子炉格納容器の内部に設置するとともにアニユラス循環排気装置を設置することにより1次冷却材漏えい事故に対しても、一般公衆の放射線災害を防止できるようにする。</p>
1.1.10	火災に対する設計上の考慮	<p>火災発生により原子炉施設の安全性が損なわれることを防止するために以下の三つの原則を適切に組合せた火災対策設計を行う。</p> <p>(1) 火災の発生を防止するため、原子炉施設を構成する系統及び機器は可能な限り不燃性、難燃性材料を用いる設計とする。また、落雷を防護した設計とする。</p> <p>(2) 早期に火災を感知して、早期消火を行うため、適切な火災感知器、消火設備、消火器具を設置する。また、消火設備は、破損、誤動作等により安全上重要な系統及び機器の安全機能を失わないよう設計する。</p> <p>(3) 安全上重要な系統及び機器を設置する区域は、隣接区域の火災による影響を軽減する対策を講じる設計とする。</p> <p>なお、ナトリウム火災の防止のため「1.1.6 ナトリウムに対する設計上の考慮」に述べる対策をとった設計を行う。また、ナトリウム火災の消火及びナトリウム火災の拡大波及を防止するため、ナトリウム用消火設備を設ける。</p>

参考表-2-7 「高速増殖炉もんじゅ発電所原子炉設置許可申請書添付書類八」  
 における火災爆発関連安全設計（その1）

番号	タイトル	安全設計方針	適合のための設計
指針3.	人為事象に対する設計上の考慮	原子力発電所は、安全上重要な構築物、系統及び機器に対する第三者の不法な接近等に人為事象に対し、これを防護するための適切な措置を講じた設計であること。	発電所敷地の周囲には厳重な防護策を設けるとともに、探知施設を設け、警報、映像監視等集中監視する設計とする。また、発電所内を警備員が適宜パトロールを行う。以上のような対策により第三者が発電所敷地内に不法に侵入することを防止する。また、安全上重要な構築物、系統及び機器を含む区域を設定し、それを取り囲む物的障壁をもつ防護された区域を設けて、これら区域への出入りを制限し、入退管理を徹底する。さらに、外部との通信連絡設備を設ける。以上のような対策により、万一第三者が不法に発電所内に侵入しても、安全上重要な構築物、系統及び機器に接近することができないようにする。
指針5.	ナトリウムに対する設計上の考慮	(1) ナトリウムを内包し、内部に液面を有する機器は、その液面上を不活性ガス雰囲気とするとともにナトリウムが空気と接触しない構造とすること。 (2) ナトリウムを循環する安全上重要な系統及び機器は、ナトリウムの凍結により安全機能を失うことがないよう考慮された設計であること。 (3) 安全上重要な構築物、系統及び機器は、ナトリウムの漏えい時においても、ナトリウムの化学反応の影響により安全機能を失うことがないよう考慮された設計であること。 (4) 事故時に一般公衆及び従事者が放射線被ばくを受ける恐れのある原子炉冷却材の漏えいに対しては、その化学反応又は反応生成物による過度の影響を緩和するよう適切な手段を備えること。	(1) ナトリウムを内包し、内部に液面を有する機器、即ち、原子炉容器、1次主冷却系循環ポンプ、2次主冷却系循環ポンプ、蒸気発生器等の液面上はアルゴンガスでおおうとともに隔壁等を設けることにより、ナトリウムと空気が接触することを防止する構造とする。 (2) 循環するナトリウムを内包する1次主冷却系及び2次主冷却系の配管、機器等にはナトリウムの凍結防止のため保温材又は予熱設備を設ける。 (3) 機器で安全上重要なものについては、系統分離を行ってナトリウム漏えいの影響を小さくする。ナトリウムを保有する系統、機器を収納する部屋には必要に応じて、ナトリウムとコンクリートが直接接触することを防止するため、鋼製のライナを室内床面等に設置するとともに、水などナトリウムと反応し易い物質を可能な限り隔離するよう設計する。 (4) 放射性的ナトリウムを保有する系統、機器を収納する部屋には適切な場所にナトリウム漏えい検出設備を設け、ナトリウムの漏えい事故に対処できるようにする。さらに、運転時の雰囲気を低酸素濃度雰囲気とするよう設計上考慮する。  原子炉容器及び1次主冷却系の配管、機器は原子炉格納容器の内部に設置するとともにアニュラス循環環排気装置を設置することにより1次主冷却系の1次冷却材漏えい事故に対しても、一般公衆の放射線災害を防止できるようにする。

参考表-2-7 「高速増殖炉もんじゅ発電所原子炉設置許可申請書添付書類八」  
 における火災爆発関連安全設計（その2）

番号	タイトル	安全設計方針	適合のための設計
方針6.	飛来物等 に対する 設計上の 考慮	安全上重要な構築物、系統及び機器は、想定される飛来物、配管のむち打ちまたは流出流体の影響等から生じるおそれのある動的影響、熱的影響または溢流によって原子炉の安全を損なうことのない設計であること。	(1) 飛来物 本発電所付近には飛行場がなく、かつ、発電所上空には定期航空路はなく、また発電所上空は保護空域となるので、航空機が本発電所に落下する可能性は極めて小さい。また敷地周辺に爆発等の事故を起こす可能性のある施設は存在しない。発電所内の施設については、大型回転機器に対してその損傷によりプラントの安全を損なうおそれのある飛来物が発生する可能性を十分低く抑えるようその配置、機器設計、製作等にあって十分な考慮を払う。 (2) 1次主冷却系及び2次主冷却系の配管には、高温強度とナトリウム環境効果に対する適合性が良好で延性に富んだステンレス鋼を使用し、熱応力、地震力等を考慮した設計を行うことから、配管の大破断は極めて起こりにくい。また、系内の圧力が比較的低いことから、配管のむち打ちや流出流体のジェットカが設計上重要になることはない。 (3) ナトリウム漏えい時の影響を極力制限できるようにするため1 次主冷却系の配管、機器を収納する部屋の雰囲気は運転時低酸素濃度に維持すると共に、ナトリウムとコンクリートとの直接接触を防止するための鋼製のライナを設置する。更に、工学的安全施設、原子炉停止系等の安全上重要な系統及び機器は、多重性を持たせるとともに、各系統間の距離を十分にとり、障壁を設ける、等によって物理的に分離し、1つの系統の事故が残る系統の機能を失わせることがないように設計する。 (4) 主蒸気系については、必要に応じて配管の損傷に伴うむち打ちや流出流体のジェットカ、ジェット反力等による影響が安全上重要な系統及び機器の機能を損なうことのないように設計する
方針7.	火災に対 する設計 上の考慮	安全上重要な構築物、系統及び機器は、適切な配置、防火壁の設置をする等、火災に対する防護上の配慮がなされるとともに、これらは実用上可能な限り不燃性または難燃性材料を使用する設計であること。また、これらの構築物、系統及び機器に対して、適切な火災検出装置及び消火装置を設置し、これらの装置の破損または不測の作動があっても、構築物、系統及び機器は、それらの安全機能を失うことのない設計であること。	火災発生により原子力発電所の安全性が損われることを防止するために (1) 火災の発生防止 (2) 早期火災検知並びに早期消火 (3) 必須の安全機能が火災により損われないこと の3つの原則の適切な組合せで設計する。 具体的には下記により火災対策の設計を行う。 (1) 安全上重要な構築物、系統及び機器は、可能な限り不燃性または難燃性材料で構成する。特にケーブルについては、難燃性ケーブルを使用するとともに、必要に応じ延焼防止塗料を併用する。 (2) 建物内に置かれる変圧器類は、原則として乾式または不燃性油を使用したものとする。 (3) 万一の火災発生にそなえて、建物内外の必要な箇所に火災感知器、消火設備、可搬式消火器を設置する。なお、ナトリウム機器等の付近で通常の消火設備が使用できない箇所には特殊化学消火剤をそなえる設計とする。 (4) ディーゼル室、油タンク室及びケーブルが集中するケーブル処理室には固定式消火設備並びに後備の消火設備を設置する。なお、これら消火設備に不測の作動があっても、安全上重要な構築物、系統及び機器の機能に支障を与えないような設計とする。 (5) 安全保護系、原子炉停止系、工学的安全施設などの安全上重要な系統及びこれらのケーブル、配管は、独立性を持たせるため物理的分離をはかり、適切な離隔距離をとるか、または必要に応じて障壁を設ける。 (6) 安全上重要な構築物、系統及び機器は、火災区域の換気系により、悪影響を受けないよう防火ダンパの設置や配置上の考慮を行う。 (7) 原子炉施設内の想定される火災に対しても、原子炉の停止及び余熱の除去を行えるよう考慮した設計とする。 (8) 中央制御室が火災等により操作不能になった場合にも、中央制御室外から原子炉を停止で出るよう設計する。

参考表-2-8 「日本原子力研究所大洗研究所原子炉設置変更許可申請書  
(HTTR 原子炉施設の設置) 添付書類八」  
に記載されている「火災に対する設計上の配慮」

番号	タイトル	内容
1.1.8	火災に対する設計上の考慮	<p>火災により原子炉施設の安全性が損なわれることを防止するため、火災発生防止、火災検知及び消火並びに火災の影響の軽減の三方策を適切に組み合わせて設計する。このため、原則として「消防法」、「建築基準法」等の国内法に基づくとともに、「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針について」を参考にして設計する。</p> <p>(1) 火災の発生を防止するため、安全機能を有する系統及び機器は、実用上可能な限り不燃性又は難燃性の材料を用いる設計とする。また、落雷等の自然現象による火災発生を防止する設計とする。</p> <p>(2) 早期に火災を検知して早期消火を行うため、火災感知器を含む消火設備を設置する。また、消火設備は、その破損、誤動作等により安全機能を有する系統及び機器の安全機能を失わないように設計する。</p> <p>(3) 安全機能を有する系統及び機器を設置する区域は、その重要度に応じ、隣接区域の火災による影響も含めて、火災の影響を軽減する対策を構じる設計とする。</p> <p>(4) 原子炉施設内の想定される火災に対しても、原子炉を停止できるとともに残留熱を除去できる設計とする。</p>

参考表-2-9 「日本原子力研究所大洗研究所原子炉設置変更許可申請書  
(HTTR 原子炉施設の設置) 添付書類八」  
における火災爆発関連安全設計 (その1)

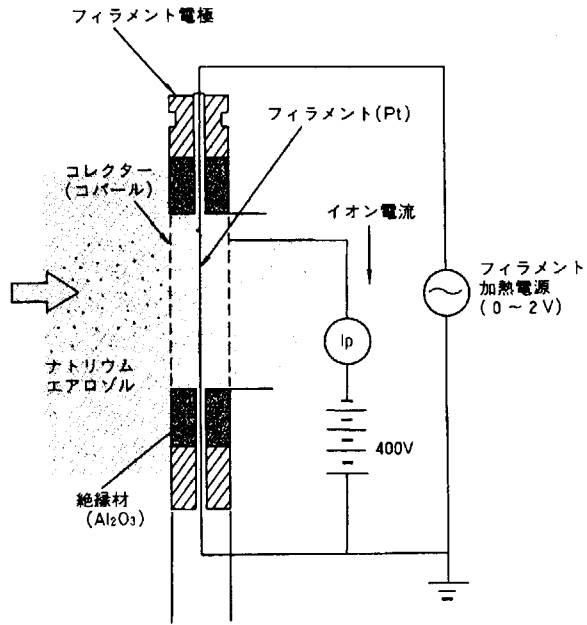
番号	タイトル	安全設計方針	適合のための設計
方針3.	外部人為事象に対する設計上の考慮	<p>1. 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、想定される外部人為事象によって、原子炉の安全性を損なうことのない設計であること。</p> <p>2. 原子炉施設は、安全機能を有する構築物、系統及び機器に対する第三者の不法な接近等に対し、これを防御するため、適切な措置を講じた設計であること。</p>	<p>1. 本原子炉施設では、原子炉施設周辺における爆発や、これに起因する飛来物は想定し得ない。</p> <p>2. 本原子炉施設近くには飛行場はない。原子炉施設の上空には航空路があるが、航空機は、原則として原子炉施設の上空を飛行することを規制されている。原子炉施設の上空の航空路を飛行する航空機は、巡航状態であり、1年間に航空機が原子炉施設に落下する確率は十分小さく、約<math>2.4 \times 10^{-9}</math>である。従って、航空機落下は考慮する必要はない。</p> <p>3. 安全機能を有する構築物、系統及び機器に対する第三者の不法な接近等の人為事象に対し、これを防御するため、次の措置を講じた設計とする。</p> <p>(1) 安全機能を有する構築物、系統及び機器を含む区域を設定し、これらの区域への接近管理及び出入管理を行える設計とする。</p> <p>(2) 外部との通信連絡設備を設ける。</p>
方針4.	内部発生飛来物に対する設計上の考慮	<p>安全機能を有する構築物、系統及び機器は、原子炉施設内部で発生が想定される飛来物に対し、原子炉の安全性を損なうことのない設計であること。</p>	<p>想定される飛来物及び配管破断に伴う影響により原子炉の安全性を損なうことのないよう、次の方針に基づいて設計する。</p> <p>(1) 高温高压の流体を内包する1次冷却設備の配管及び2次ヘリウム冷却設備の配管等については、内圧、熱、地震力等による応力の合計値が相対的に高い箇所、配管の瞬時破断を想定する。この想定破断による配管のむち打ち、流出流体のジェット力、雪囲気の変化及び溢水により、安全機能を有する構築物、系統及び機器の安全機能が損なわれないよう、破断想定箇所と防護対象機器は、十分な離隔距離をとるか、破断想定箇所又は防護対象機器を障壁で囲む。これらのいずれの対策もとれない場合には、破断時の荷重に耐える配管ホイップレストレイント、ジェットバリア等を設ける。また、防護対象機器は、配管破断による雰囲気変化により、安全機能が損なわれないように設計するとともに、加圧水冷却設備等の配管破断による溢水に対しては、配置上の配慮を行う。</p> <p>(2) 回転機器の損傷により、安全機能を有する構築物、系統及び機器の安全機能が損なわれないように、回転機器の配置、機器の設計、製作等に際し配慮する。</p> <p>(3) 局所的な小規模漏えいによる影響が、安全機能を有する系統及び機器の安全機能を損なうことのないように設計する。</p>

参考表-2-9 「日本原子力研究所大洗研究所原子炉設置変更許可申請書  
(HTTR 原子炉施設の設置) 添付書類八」  
における火災爆発関連安全設計 (その2)

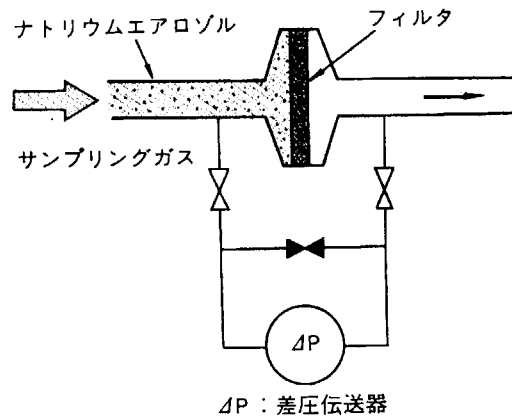
番号	タイトル	安全設計方針	適合のための設計
方針5.	火災に対する設計上の考慮	<p>原子炉施設は、火災発生防止、火災検知及び消火並びに火災の影響の軽減の三方策を適切に組み合わせて、火災により原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。</p>	<p>火災により原子炉施設の安全性が損なわれることを防止するため、原則として消防法、建築基準法等の国内法に基づくとともに、「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針について」の考え方を考慮し</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a. 火災発生防止</li> <li>b. 火災検知及び消火</li> <li>c. 火災の影響の軽減</li> </ul> <p>の3方策を適切に組合わせた設計とする。具体的には、次により火災防護の設計を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、実用上可能な限り難燃性又は不燃性材料を使用する。また、発火性又は引火性の油を内包する系統は、漏えい防止を考慮した設計とする。</li> <li>(2) 火災区域には想定火災の種類、大きさ等に対し、適切な検出装置及び消火設備を設置する。</li> <li>(3) 非常用発電設備等の安全機能を有する機器を設置している区域に相当量の可燃物があり、かつ、消火活動が十分に行うことができない場合には、遠隔消火設備を設ける。</li> <li>(4) 安全保護系、工学的安全施設等の安全機能を有する系統及びこれらのケーブル、配管等は独立性をもたせ、防火壁を設けるか、適切な離隔距離、隔壁、消火設備等の適切な組合せにより火災の影響を軽減する。</li> <li>(5) 原子炉施設内の想定される火災に対しても、原子炉を停止できるとともに残留熱を除去できる設計とする。</li> <li>(6) 中央制御室には可搬式消火器を設けるとともに、火災等により中央制御室に留まることができない場合にも、中央制御室外から原子炉を停止できるように設計する。</li> </ul>

参考表-2-10 「水冷却型試験用原子炉施設」等における火災爆発関連安全設計

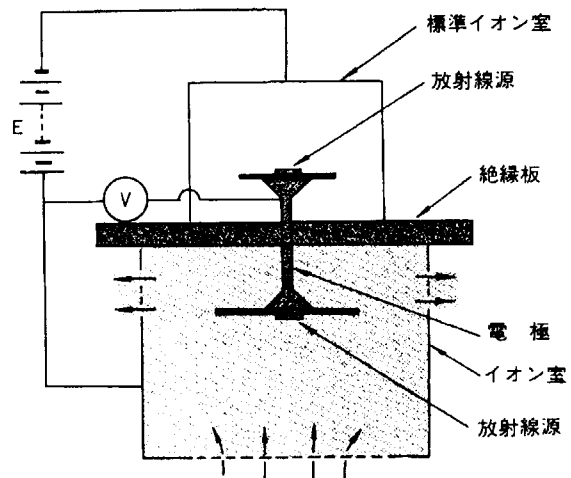
施設	番号	項目	内容	備考
水冷却型試験用原子炉施設に関する安全設計審査指針	指針3.	外部人為事象に対する設計上の考慮	1. 安全機能を有する構築物、系統及び機器は、想定される外部人為事象によって、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。 2. 原子炉施設は、安全機能を有する構築物、系統及び機器に対する第三者の不法な接近等に対し、これを防御するため、適切な措置を講じた設計であること。	「外部人為事象」とは、飛行機落下ダムの崩壊、爆発等をいう。
	指針4.	内部発生飛来物に対する設計上の考慮	安全機能を有する構築物、系統及び機器は、原子炉施設内部で発生が想定される飛来物に対し、原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。	「内部発生飛来物」とは、高圧ガス等を内蔵する容器、高速回転機器の破損、ガス爆発、重量機器の落下等によって発生する飛来物をいう。なお、設計上は、これらによる二次的飛来物、火災、溢水、化学反応、電氣的損傷、配管の破損、機器の故障等の二次的影響も考慮するものとする。
	指針5.	火災に対する設計上の考慮	原子炉施設は、火災発生防止、火災検知及び消火並びに火災の影響の軽減の3方策を適切に組み合わせて、火災により原子炉施設の安全性を損なうことのない設計であること。	「火災により原子炉施設の安全性を損なうことのない設計」とは、「発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針」を参考とした設計であることをいう。
核燃料施設安全審査基本指針	指針15.	火災・爆発に対する考慮	火災・爆発のおそれのある核燃料施設においては、その発生を防止し、かつ、万一の火災・爆発時には、その拡大を防止するとともに、施設外への放射性物質の放出が過大とならないための適切な対策が講じられていること。	
ウラン加工施設安全審査指針	指針15.	火災・爆発に対する考慮	火災・爆発のおそれのある核燃料施設においては、その発生を防止し、かつ、万一の火災・爆発時には、その拡大を防止するとともに、施設外への放射性物質の放出が過大とならないための適切な対策が講じられていること。 1. 不燃性材料の使用等 ウラン加工施設の建家は、建築基準法等関係法令で定める耐火構造又は不燃性材料で造られたものであること。また、設備・機器は実用上可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用する設計であること。 2. 可燃性物質の使用対策等 施設において有機溶媒など可燃性の物質又は水素ガスなど爆発性の物質を使用する設備・機器は火災・爆発の発生を防止するため、発火・温度上昇の防止対策、水素ガス漏洩、空気の混入防止対策等適切な対策が講じられていること。 3. 火災・爆発の拡大防止対策 万一火災・爆発が発生した場合にも、その拡大を防止するための適切な検知、警報設備及び消火設備等が設けられているとともに、汚染が発生した部屋以外に著しく拡大しないよう適切な対策が講じられていること。	
再処理施設安全審査指針	指針15.	火災・爆発に対する考慮	1. 再処理施設における安全上重要な施設は、可能な限り不燃性又は難燃性材料を使用する設計であること。 2. 再処理施設において可燃性若しくは熱的に不安定な物質を使用するか又は生成する系統及び機器は、火災・爆発の発生を防止するため、着火源の排除、異常な温度上昇の防止対策、可燃性物質の漏洩防止対策、混入防止対策等適切な対策が講じられる設計であるとともに、適切な熱及び化学的制限値が設けられていること。 3. 火災の拡大を防止するために、適切な検知、警報系統及び消火設備が設けられているとともに、火災による影響の軽減のために適切な対策が講じられる設計であること。 4. 火災・爆発の発生を想定しても、閉じ込めの機能が適切に維持できる設計であること。	
放射性廃棄物埋設施設の安全設計審査の基本的な考え方	7-3	火災・爆発に対する考慮	廃棄物埋設施設においては、火災・爆発の発生を防止し、かつ、万一の火災爆発時にも施設外への放射性物質の放出が過大とならないための適切な対策が講じられていること。	



参考図-2-1 ナトリウムイオン化式検出器



参考図-2-2 差圧検出器



参考図-2-3 放射線イオン化式検出器



### 参考3 ガス漏えい検知器設置の実際

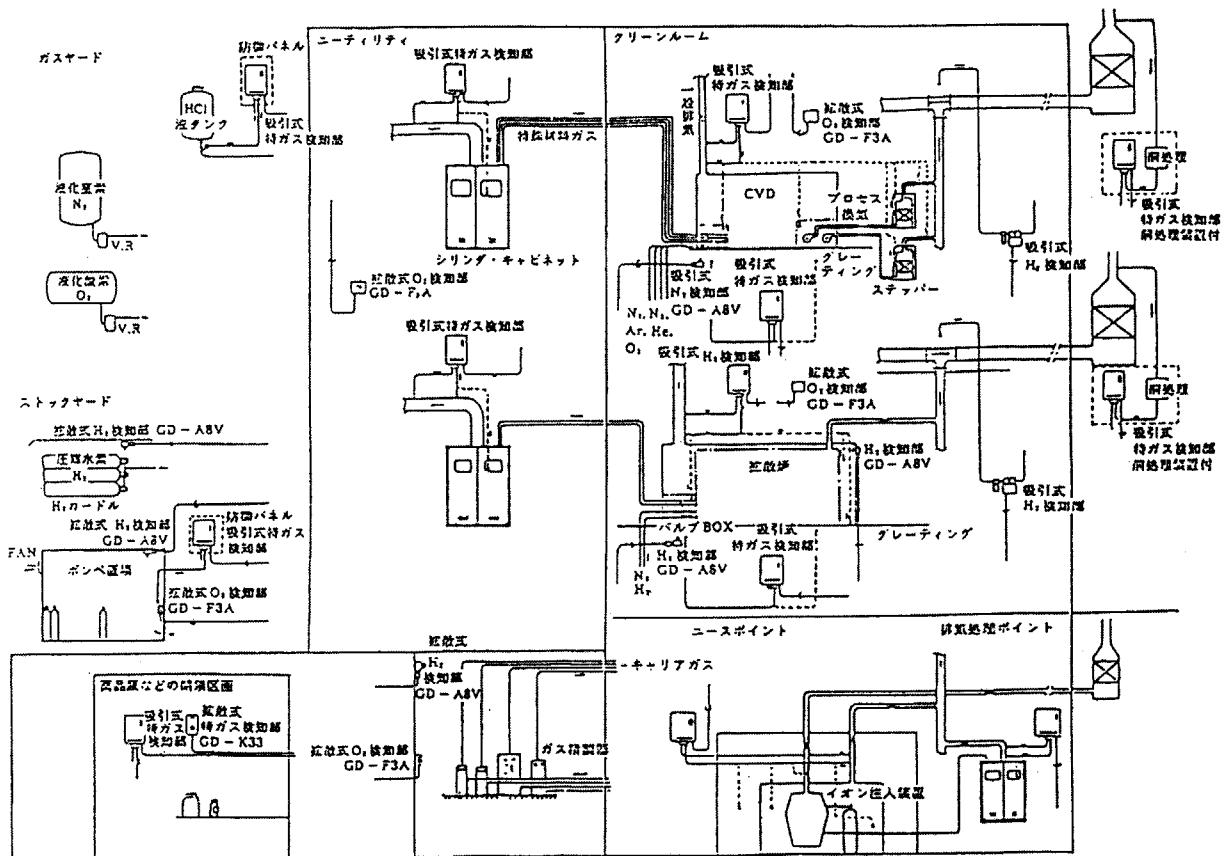
HTTR に接続する水素製造システムにおいて、ガス漏えい検知器を設置する場所は屋外（原子炉建家外）と屋内（原子炉建家内）の2つが考えられる。屋外に関しては一般の化学プラントと同様であるが、一方、屋内に関しては可燃性ガス漏えいの発生確率と屋内換気の状態を考慮すると、むしろ半導体工場のクリーンルームに近いと考えられる。そこで、屋外でのガス漏えい検知器設置の参考とするために化学プラントにおけるガス漏えい検知器の設置の現状を、屋内でのガス漏えい検知器設置の参考とするために半導体工場におけるガス漏えい検知器の設置の現状を調査した。

#### 3.1 化学プラント

一般の化学プラント等においては、「一般高圧ガス保安規則関係基準」と「危険物の規制に関する規則」に従って、ガスが漏えいし易い設備が滞留し易い場所に設置される場合に、1ないし数個のガスの検知警報が設置されている。また、屋内は原則として滞留し易い場所と見做されるが、その建物に昼夜連続運転の強制排気設備が設置される場合には、その吸引口毎設置されている。但し、配管系についてはガス検知の規定が無いいため、フランジ等の接続部の漏えいしやすい箇所以外は常時監視対象となっていないケースが多い。なお、法規上は1/4LELで警報を発することが要求されているが、1/100LELで発信するように設定しているプラントもあると言われている。

#### 3.2 半導体工場

上記のように化学工場では室内はガスが滞留するおそれのある場所と見做されるが、半導体製造工場では、ガスの漏えいする可能性のあるガス・シリンダーやガス・コントロールバルブ等は、基本的に閉鎖され、強制排気が行われており、クリーンルーム内にガスが漏れ出す可能性はほとんどない。また、万一漏れ出しても、小漏えいであれば、ダウンフローなどの室内空気の循環によって拡散してしまう。従って、半導体製造工場などにおけるガスの検知警報は、各種設備の排気系を主とし、クリーンルーム内は排気系のトラブルや配管系の破損などによるクリーンルーム内へのガス漏れ及びダウンフローの停止時の安全確保のために、補完的にグレーチングの下部など又は天井に1点から数点設置されている。但し、強制排気が行われていない場所や設備については、滞留を早期に検知することが必要である。参考図-3-1に特殊材料ガス災害防止自主基準（高圧ガス保安協会 KHK S 007-1985）を参考にしたガス検知警報器設置の概念図を示す。



参考図-3-1 ガス検知警報器設置の概念図

## 参考4 可燃性ガスと爆ごう特性

### 4.1 可燃性ガスの定義

可燃性ガスが空気中で発火、爆発する条件は、(1) 空気との混合割合がある範囲内（下限界～上限界）にあり、(2) 十分なエネルギーの発火源が存在することである。ガス濃度が下限界以下または上限界以上では発火源が存在しても発火、爆発しない。なお、一般高圧ガス保安規則では、爆発下限界 10%以下、または上限と下限の差が 20%以上のガスを可燃性ガスと定義している。爆発限界として公表されている値の一例を参考表-4-1に示す。

(5)、(6)、(7)、(8)

### 4.2 爆発限界

一般には、下限界での発火エネルギーは上限界でのそれより小さい。また、爆発限界は参考表-4-2に示すように火炎の伝播方向によって若干変化するが、実用上はどの方向のものを使っても差し支えないと言われている。爆発限界に対する温度と圧力の影響を参考図-4-1～2に示す。一般に、温度上昇とともに下限界が低く上限界が高くなる。圧力の影響はガスによって異なるが、爆発限界が広がると考えた方が安全上無難である。(5)、

(6)、(7)、(8)

### 4.3 発火温度と発火源

可燃性混合気の温度を上げていくとやがて発火、爆発する。この温度を発火温度と呼ぶが、公表されている値の一例を参考表-4-1に示す。防爆電気機器では、可燃性ガスを発火温度によって分類し、それに応じて器機の温度上昇限界値を定めている。

電気機器のスパークや帯電した静電気放電の電気火花、固体の衝撃、摩擦による火花や高温、たばこ、マッチ、ライターの火等、所謂、火気と称されるもの、高温物体等いずれも発火源となり得る。

電気火花による総放出エネルギーは小さくとも、微小空間へ微小時間で放出されるため、可燃性混合気の発火には効率の良い発火源となる。代表的な飽和炭化水素の大気圧の発火エネルギーを参考図-4-3に示す。図中のCはガス濃度、 $C_0$ は空気中で完全燃焼する濃度です。発火エネルギーはある濃度で最小となり、分子量の増加とともに最小エネルギーとなる $C/C_0$ は大きくなる。常温常圧における可燃性ガス空気混合気の最小発火エネルギーとその濃度を参考表-4-3に示す。混合気の発火エネルギーは温度、圧力の上昇とともに小さくなると言われている。

金属が他の固体と衝突する際には衝撃火花や摩擦熱（これらを摩擦火花と総称している。）が発生するが、これも可燃性混合気の発火には効率の良い発火源となる。摩擦火花による発火性が最も高いと考えられるMg合金を試験体とし、これを鋼板上に落下させてメタンの発火率を実験した結果を参考図-4-4に示す。濃度 6.5%で発火率が最大となり、

その際の発火エネルギーは電気火花による最小発火エネルギー小さい値だった。可燃性ガスが存在する可能性のある場所では安全のために工具にはベリリウム銅合金製工具を使用すべきで、これについては JIS M7615 (防爆用ベリリウム銅合金スパナ) 等に規定されている。

一般論として、発火現象は確率的現象であり、安全のためには参考図-4-3のような小発火源でも発火爆発すると考えるべきとされている。(5)、(6)、(7)、(8)

#### 4.4 爆ごう特性

メタン、プロパン、エチレン、水素の爆ごう限界濃度、デトネーション伝播最小管径、起爆限界、デトネーション危険指数を参考表-4-4に示す。

1次元空間において爆ごうが起こるか否かは、爆ごう濃度限界とデトネーション伝播最小管径による。一方、3次元空間で爆ごうが起こるか否かは、起爆限界(可燃性ガスに圧力波を与えるような着火エネルギー)と障害物による乱れに伴う火炎の加速によります。直接起爆に関する入手データでは可燃性ガスの濃度が不明なため、より詳細なデータの入手が必要であるが、多量の爆薬や落雷による圧力波が与えられない限り、着火即爆ごうということは通常は起こらない。(5)、(6)、(7)、(8)

参考表-4-4に示す起爆限界から概略計算すると、メタンを直接起爆するには水素の12000倍の爆薬が必要ということになる。また、メタンのデトネーション危険指数は水素の10000倍である。なお、メタンのデトネーション危険指数とは、実験的に求められた”管内におけるデトネーション直接開始最小エネルギー”を、最小値であるアセチレン酸素混合気の値で割ったものである。

大気圧における量論混合気についてデトネーション直接開始最小エネルギーは通常非常に大きく、爆薬や高圧ガス容器の破裂のような特殊な場合でない限り、デトネーションの開始は起こらないと言われている。(5)、(6)、(7)、(8)

METHODS FOR THE CALCULATION OF PHYSICAL EFFECTS, PART 2, CPR 14E (通称 TNO の Yellow Book と呼ばれている。)に記載されている最小着火エネルギーを参考表-4-5に示す。(1)、(2)、(3)、(4)

#### 参考文献

- (1) METHODS FOR THE CALCULATION OF PHYSICAL EFFECTS CPR 14E Third edition 1997  
Committee for the Prevention of Disasters
- (2) Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from release of hazardous materials CPR 16E 1989 The director-General of Labour
- (3) METHODS FOR DETERMINING AND PROCESSING PROBABILITIES CPR 12E Second edition 1997  
Committee for the Prevention of Disasters
- (4) Gas Explosion Handbook FLACS HTML Version1.0 Bergen, April 1997
- (5) 燃焼工学ハンドブック 日本機械学会編 1995年 丸善株式会社

- (6) 燃烧工学 -基礎と応用- 小林、荒木、牧野 1995年 理工学社
- (7) 燃烧学 -燃烧現象とその制御- 平野 平成8年 海文堂出版株式会社
- (8) 安全工学講座1 火災 安全工学協会編 海文堂出版株式会社
- (9) 安全工学講座2 爆発 安全工学協会編 海文堂出版株式会社

参考表-4-1 各種気体の爆発限界

	比重 (空気=1)	爆発限界 (vol%)		発火温度 (°C)
		下限界	上限界	
メタン	0.55	5.0	15.0	540
プロパン	1.56	2.1	9.5	450
エチレン	0.97	2.7	36.0	490
水素	0.07	4.0	75.0	400

\*大気圧、25°Cにおける値

参考表-4-2 火炎伝播方向によるメタンの爆発限界の変化

	火炎伝播方向	爆発限界 (vol%)	
		下限界	上限界
メタン-空気	上方	5.35	14.85
	水平	5.40	13.95
	下方	5.95	13.35

参考表-4-3 可燃性混合気の最小発火エネルギー

	最小発火 エネルギー (mJ)	濃度 (vol%)
メタン	0.28	8.5
プロパン	0.26	5~5.5
水素	0.019	28~30

参考表-4-4 可燃性ガスの空気中における爆ごう特性

	爆ごう限界濃度 (vol%)	デトネーション 伝播最小管径 (mm)	起爆限界	デトネーション 危険指数
メタン	8.3~11.8	36	22kg (テトリル爆薬)	$10^{11}$ ( $10^5$ )
プロパン	2.5~8.5	16	80g (テトリル爆薬)	$10^9$ ( $10^3$ )
エチレン	4.1~15.2	4	15g (テトリル爆薬) 10g (ペンスリット爆薬)	$10^8$ ( $10^2$ )
水素	15.5~64.1	1以下	1.2g (ペンスリット爆薬)	$10^7$ ( $10^3$ )

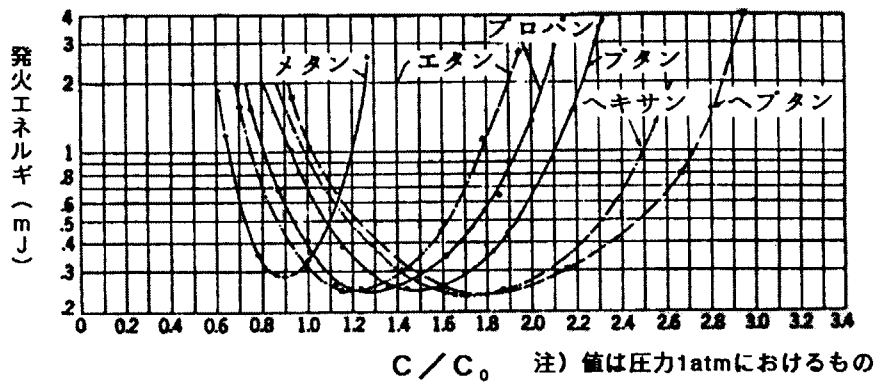
注) デトネーション危険指数の( )内は酸素混合気を示す。

参考表-4-5 最小着火エネルギー

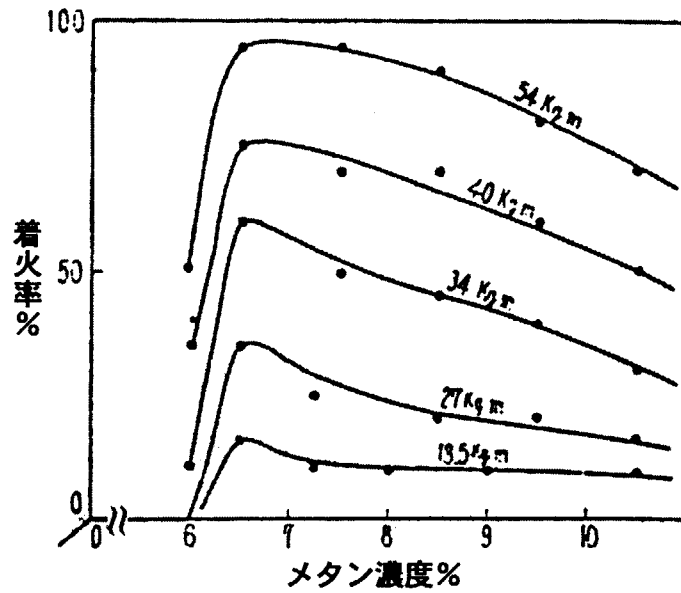
可燃性ガス	セルサイズ(mm)	最小着火 エネルギー	
		爆燃(mJ)	爆ごう(mJ)
メタン	300	0.28	2.30E+11
プロパン	55	0.25	2.50E+09
プロパン	55	0.28	7.60E+08
エタン	25	0.07	1.20E+08
アセチレン	10	0.007	1.29E+05







参考図-4-3 飽和炭化水素の発火エネルギー



参考図-4-4 鋼板上にMg合金が落下した場合の着火率

## 参考5 漏えいガスの拡散

大気中におけるガスの拡散に影響する要素としては、ガスの比重、風速、風向、障害物が考えられる。

代表的なガスの空気に対する比重は、以下の通りで、常温で空気より軽いガスでも、沸点近傍では、重いガスと同様な拡散挙動を取る。

	常温	沸点
メタン	0.55	1.4 (-161°C)
エチレン	0.97	1.7 (-104°C)
プロパン	1.56	1.9 (-41°C)
ブタン	2.05	
塩素	2.46	

参考図-5-1に、1.4m×1.8m×2.2mの実験槽内へプロパンガスを20・/minで10分間流出させ、流出停止2分後の高さ方向の濃度分布を測定した結果を示す。流出点が床から高い程、降下の途中で空気と混合するため、高さ方向の濃度分布が均一になる。(1)

参考図-5-2に、炭酸ガスを6畳の居間の壁際の元栓から0.186・/hで漏えいさせ、床上1.5・と30・で濃度変化を測定した結果を示す。元栓から遠く離れない限り、高さが同じなら濃度もほぼ同じになる。(1)

ここには示していないが、床上20・で空気より重い炭酸ガスを漏えいした場合の濃度分布と、天井下20・で空気より軽い都市ガスを漏えいした場合の濃度分布は、上下が逆転した状態になる。

参考図-5-3に、エチレンとブタンを風洞内で、微風状態で、漏えいした場合の濃度分布を示す。空気より軽いガスは上方への拡散が早い、風速が大きくなると空気より重いガスと同様に床面で最高濃度を示す。(1)

参考図-5-4に、比重の異なるガスの水平・鉛直方向広がり角度の測定値を示す。風速が1・/sec以上では、浮力による上昇速度より風速の影響が大きくなるため、ガスによる差が小さくなる。(1)

水素製造システムにおいては、メタン単独ガスまたはメタン(分子量16)、一酸化炭素(分子量28)、水素(分子量2)の混合ガスが漏えいする可能性があるが、漏えい孔からのガスの広がりに関しては、保守的に水平方向5°、鉛直方向10°程度を考えれば良いのではないかとと思われる。(1)

参考図-5-5に、屋外で、直径2mのプールに0.78・の液化エチレンを一挙に投入し、発生した蒸気の拡散状態を測定した結果を示す。液面降下速度は、投入時に380mm/min、投入80sec後に6mm/minだったが、液化エチレン投入と同時に突沸、飛散し、0.5・がこの

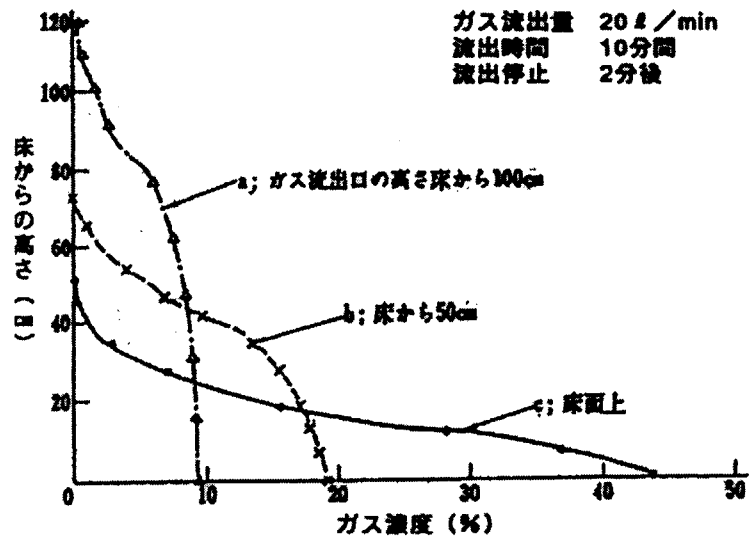
時に蒸発したと推測される。風速、風向の変動が小さかったため比較的きれいな等濃度線図を示しているが、明らかに地形の影響を受けており、等濃度線が非対称になるとともに、障害物または起伏の後に高濃度域と低濃度域が現れている。<sup>(1)</sup>

障害物の影響を受けた気流を、参考図-5-6に模式的に示す。風は障壁に当たって、上方に向きを変えるが、風上側で一部は地上をC点まで逆流する。一方、風下側では、B点から障壁に向かう逆流が生じる。風速が大きくなるとACの距離は小さくなるが、ABの距離はあまり変わらない(≒障壁の高さの約10倍)ことを示す実験結果がある。また、空気より重いガスが障壁の風上で漏れいすれば、風下の濃度は障壁のない場合の1/5～1/10に低下すると言われている。また、AB間で漏れいすれば、漏れいガスが逆流するため、障壁の後に高濃度の滞留域が発生する。<sup>(1)</sup>

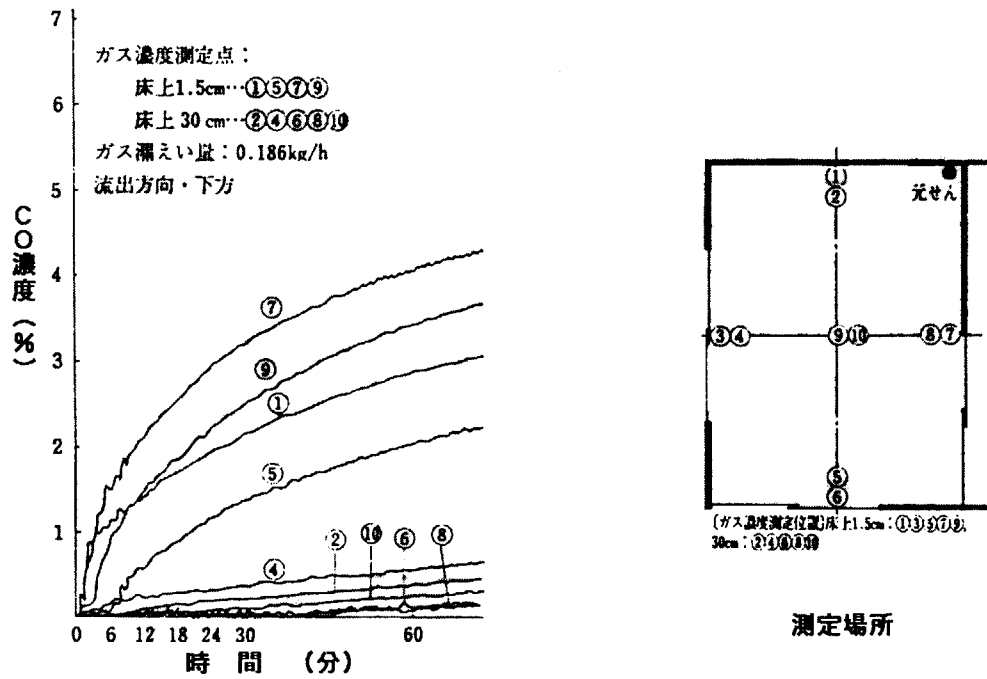
漏れいガスの比重、風速、風向、障害物が、屋外におけるガス拡散に大きく影響することは明らかであるが、風速と風向が非定常であり、障害物の影響が地形と構造物等の配置に依存するため、これらを如何に現実的に考慮していくかが重要な課題であると考えられる。

#### 参考文献

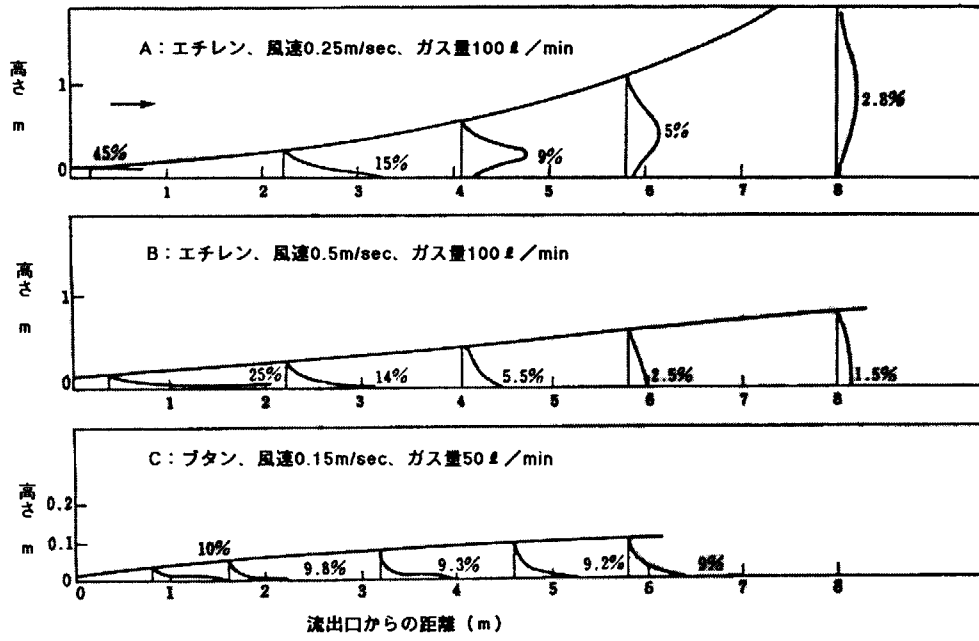
- (1) 高圧ガス保安に関する情報紹介 No.82 異常診断技術-「漏洩検知」 昭和57年  
3月 高圧ガス保安協会



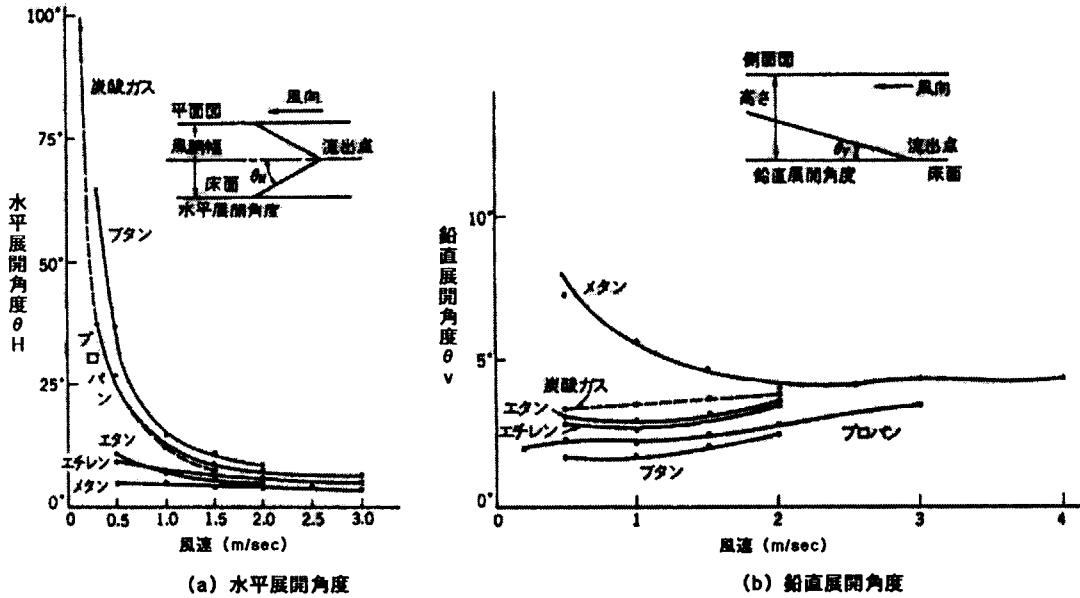
参考図-5-1 流出口の高さの違いによる蓄積プロパン層の濃度分布



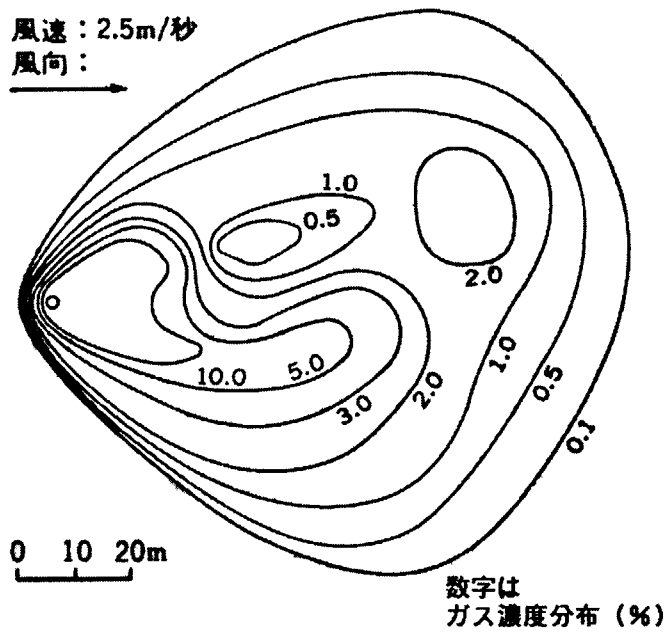
参考図-5-2 6層間の濃度変化



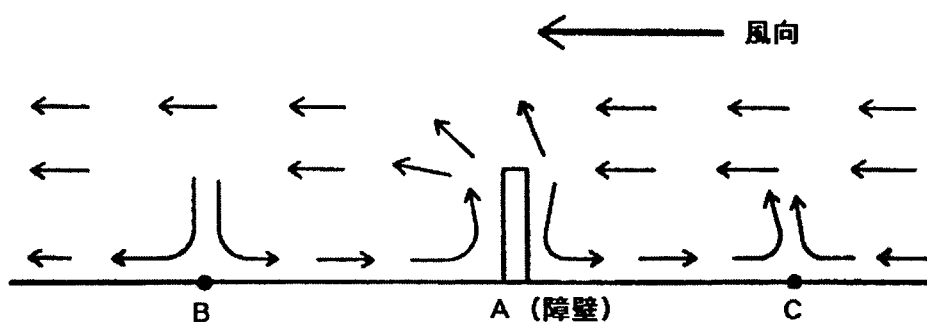
参考図-5-3 ガス層の鉛直方向濃度分布



参考図-5-4 漏えいガスの展開角度



参考図-5-5 1分10秒後のエチレンガスの濃度分布



参考図-5-6 障壁前後の気流の方向

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射量	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J

1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m

1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>

1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa

1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-3</sup> m/s<sup>2</sup>

1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq

1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg

1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy

1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg (Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

- 1 cal = 4.18605 J (計量法)  
 = 4.184 J (熱化学)  
 = 4.1855 J (15 °C)  
 = 4.1868 J (国際蒸気表)
- 仕事率 1 PS (仏馬力)  
 = 75 kgf·m/s  
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

高温ガス炉水素製造システムにおけるガス漏えい検知方法の検討