

JAERI-Review

JP0350068

2002-041



高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発（共同研究）  
第1報 漏えい事故事例およびガス漏えい検知技術の調査

2003年3月

坂場 成昭・中澤 利雄・川崎 幸三・浦上 正雄\*・最首 貞典\*

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。

入手の問合せは、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, Tokaimura, Naka-  
gun, Ibarakiken 319-1195, Japan.

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発（共同研究）  
第1報 漏えい事故事例およびガス漏えい検知技術の調査

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部  
坂場 成昭・中澤 利雄・川崎 幸三・浦上 正雄・最首 貞典\*

（2002年12月10日受理）

高温ガス炉において、ヘリウム漏えいに対する早期検知は、安全・安定運転のために非常に重要であるが、ヘリウムは無色透明の気体であるため、微小な漏えいが万が一発生した場合の漏えい箇所および漏えい量の特定は一般的に困難である。

本研究は、高温ガス炉に適用可能な高温環境下での高温ヘリウム漏えい箇所特定システムを開発することを目的とする。開発の第一段階として、光ファイバによる高温ヘリウム漏えい検知技術の適用可能性を調べるために、国内外における漏えい事故事例およびガス漏えい検知技術を調査した。

---

本研究は日本原子力研究所と日本原子力発電株式会社との共同研究に基づいて実施したものである。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

\* 日本原子力発電株式会社

**Research and Development of a High-temperature Helium-leak  
Detection System (Joint Research) -Part 1 Survey on Leakage  
Events and Current Leak Detection Technology-**

**Nariaki SAKABA, Toshio NAKAZAWA, Kozo KAWASAKI,  
Masao URAKAMI<sup>\*</sup> and Sadanori SAISYU<sup>\*</sup>**

**Department of HTTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken**

**(Received December 10, 2002)**

In High Temperature Gas-cooled Reactors (HTGR), the detection of leakage of helium at an early stage is very important for the safety and stability of operations. Since helium is a colourless gas, it is generally difficult to identify the location and the amount of leakage when very little leakage has occurred.

The purpose of this R&D is to develop a helium leak detection system for the high temperature environment appropriate to the HTGR. As the first step in the development, this paper describes the result of surveying leakage events at nuclear facilities inside and outside Japan and current gas leakage detection technology to adapt optical-fibre detection technology to HTGRs.

**Keywords:** **Leakage, Event, Helium, Coolant, Detector, Optical Fibre, Monitoring, HTGR, HTR, HTTR**

---

This work has been performed in JAERI as a joint research with The Japan Atomic Power Company.

\* The Japan Atomic Power Company

## 目次

1. はじめに.....	1
2. 国内外における冷却材の漏えい事故事例 .....	2
2.1 概要 .....	2
2.2 国内外における事故事例 .....	2
2.3 まとめ .....	6
3. ガス漏えい検知技術 .....	7
3.1 概要 .....	7
3.2 調査結果 .....	7
3.3 まとめ .....	8
4. 考察 .....	12
5. おわりに .....	13
謝辞 .....	13
参考文献 .....	14
付録 1 国内原子力発電所における冷却材等の漏えい事故事例 .....	15
付録 2 海外発電所における漏えい事故事例 .....	55
付録 3 ガス漏えい検知技術 .....	65

Contents

1. Introduction .....	1
2. Survey on Leakage Accident at Power Stations.....	2
2.1 Summary.....	2
2.2 Accident cases inside and outside Japan.....	2
2.3 Conclusion.....	6
3. General Gas Leakage Detection System.....	7
3.1 Summary.....	7
3.2 Survey Result.....	7
3.3 Conclusion.....	8
4. Discussion.....	12
5. Conclusion.....	13
Acknowledgement.....	13
Reference.....	14
Appendix 1 Leakage Accident at the Nuclear Plant in Japan.....	15
Appendix 2 Leakage Accidents at the Nuclear Plant in Foreign Country.....	55
Appendix 3 Gas Leak Detection Technology.....	65

## 1. はじめに

高温ガス炉の冷却材に使用されるヘリウムガスは、水や炭酸ガス等に比べ分子が小さいため一般的に漏えいの可能性が高く、また無色透明の気体であるため微小な漏えいが万一発生した場合に漏えい箇所の特定は困難である。日本初の高温ガス炉 HTTR<sup>[1]</sup>は、2001年12月に定格出力を達成し、世界で初めて原子炉から 850°C の熱を取り出すことに成功した。今後 HTTR は本格運転を実施していく計画であるが、本格運転を行う上で、ヘリウムガス漏えいに対する早期検知は、安全・安定運転のために非常に重要である。

本研究は、高温ガス炉で適用可能な、高温環境下での高温ヘリウム漏えい箇所特定システムを開発することを目的とする。高温ヘリウム漏えい箇所特定システムは、フランジ等の機械締結箇所から漏えいする高温のヘリウムガスを光ファイバの温度変化により漏えいの有無を検知するものである。高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの構築により漏えいの検知時間に大幅な短縮が期待できるとともに、光ファイバを連続的に配置することにより、光ファイバの温度変化から漏えい箇所が容易に特定することが可能になるため、漏えい箇所を同定するまでの時間の短縮も可能である。

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発の第一段階として、光ファイバによる高温ヘリウム漏えい検知技術の適用の可能性を量るため、国内外における漏えい事故事例およびガス漏えい検知技術を調査する。漏えい事故事例の調査は、漏えいを監視する対象機器を定めることを目的とし、定められた機器の形から検出器の形状を決定する。また、ガス漏えい技術を調査は、実機に最適な検知技術を適用することを目的とする。

## 2. 国内外における冷却材の漏えい事故事例

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムが、将来実機に適用される場合には、最も漏えいし易いと考えられる箇所、すなわち漏えいの可能性が高い箇所に設置するのが実用的である。そのため、漏えいの可能性が高い箇所を選定することを目的とし、国内外の発電プラント、研究施設等の漏えい事故事例の調査を行った。

### 2.1 概要

冷却材漏えいの原因は、フランジや弁などのシール部破損と溶接部の亀裂が国内外とも最も多く報告されている。溶接部の亀裂は、経年劣化、設計不十分あるいは製造過程が原因となっている。シール部からの漏えいは、

- 回転部振動による経年劣化
- 弁座の経年劣化、摩耗
- 取り付け不良
- シールの熱伸張
- 静的シール駆動装置からの漏えい

等が報告されており、経年劣化、摩耗などの長期間にわたる劣化進展が原因となった漏えいと、取り付け不良、シールの材質などが原因となった設計不良、製造不良による漏えいに分類できる。調査結果を表 2.1 に示す。

### 2.2 国内外における事故事例

国内原子力発電所における冷却材等の漏えい事故事例<sup>[2]</sup>の概要を表 2.2 に示し、関連事故件数を表 2.3 にまとめる。また、付録 1 に個々の事例の詳細を示す。1969 年から 2001 年の 32 年間に国内の 51 基のプラントを対象にした事故報告 983 件のうち、39 件が冷却材等の漏えいに関する報告であった。

内容は、フランジ部シール破損、弁のガスケット、グランドパッキン破損が 20 件、残り 19 件が溶接部の応力腐食割れや浸食等を原因とするものであった。プラントの種類別では、PWR が 54%、BWR が 36%、残り 10% が GCR であり、圧力管の本数が多い PWR が BWR よりも漏えい発生頻度が高いことを示している。一方、シール箇所や弁からの漏えいは、BWR も PWR もほぼ同数であり、これはプラント形式に依存しない傾向を示している。

海外発電所における漏えい事故事例の概要を表 2.4 に示し、付録 2 に個々の事例の詳細を示す。

表 2.1 調査結果

分類	事故・故障内容	推定される原因
経年劣化	循環ポンプ軸封部からの漏れ	回転部振動による経年劣化
	ドレン配管用枝管の止め弁からの蒸気漏えい	弁座の経年劣化、磨耗
亀裂	配管溶接端部亀裂	計測用配管の固有振動数とポンプ振動数の一一致し、共振による応力で溶接端部が亀裂
	蒸気発生器伝熱管の亀裂	上記発生のコールドレグ側の亀裂
取付不良	管台フランジ部からの蒸気漏えい	主蒸気管に設置されている予備管台の取付不良
シール不良	ヘリウム循環機のクロージャリーク	シール面の間に生じた熱伸張
	ヘリウム循環機の静的シール(Static Seal)の駆動装置からのヘリウム漏えい	静的シールのベロ一部に発生した亀裂

表 2.2 国内発電所における漏えい事故事例の概要<sup>[2]</sup>

番号	事象	プラント	発生日
A1-1	熱交換器高圧蒸発器の入口ヘッダ分配管フランジからの蒸気漏えい(レベル1)	日本原子力発電(株) 東海発電所	1997/10/29
A1-2	熱交換器の高圧過熱器ドレン配管溶接部からの漏えい(レベル0+)	日本原子力発電(株) 東海発電所	1991/06/12
A1-3	燃料取替用スペーサスリーブの不具合(レベル0)	日本原子力発電(株) 東海発電所	1991/03/26
A1-4	低圧蒸気ドレン弁溶接部からの蒸気漏えい(レベル0)	日本原子力発電(株) 東海発電所	1989/11/17
A1-5	原子炉給水系逆止弁のドレン配管止め弁からの漏えい(レベル0)	日本原子力発電(株) 東海第二発電所	1990/11/29
A1-6	主蒸気管予備管台からの漏えい(レベル1)	日本原子力発電(株) 敦賀発電所1号機	1990/09/15
A1-7	主蒸気隔離弁のパイロット弁から駆動用窒素ガスの漏えい(レベル0-)	東北電力(株) 女川原子力発電所1号機	1996/04/24
A1-8	タービン制御系の誤信号による原子炉自動停止(レベル0+)	東北電力(株) 女川原子力発電所1号機	1992/08/31
A1-9	タービン抽気系ドレン配管フランジ部からの漏えい(レベル0+)	東京電力(株) 福島第一原子力発電所6号機	1998/07/30
A1-10	格納容器内の主蒸気隔離弁の弁棒シール部からの漏えい(レベル0-)	東京電力(株) 福島第一原子力発電所3号機	1997/01/28
A1-11	発電機の機内冷却用水素ガスの漏えい(評価対象外)	東京電力(株) 福島第一原子力発電所6号機	1994/02/28
A1-12	タービン駆動原子炉給水ポンプ蒸気加減弁フランジ部からの漏えい(レベル0-)	東京電力(株) 福島第二原子力発電所2号機	1998/07/21
A1-13	低圧タービン内部にある性能確認用圧力検出配管破断(評価対象外)	東京電力(株) 柏崎刈羽原子力発電所7号機	1997/05/21
A1-14	原子炉給水ポンプ駆動タービンドレン配管管台部からの漏えい(レベル0-)	中部電力(株) 浜岡原子力発電所2号機	1998/11/03
A1-15	原子炉圧力容器ベント弁の弁座部からの漏えい(レベル0-)	中部電力(株) 浜岡原子力発電所1号機	1995/12/04
A1-16	蒸気発生器伝熱管の漏えい(レベル0-)	関西電力(株) 美浜発電所1号機	1994/02/18
A1-17	蒸気発生器伝熱管の漏えい(レベル1)	関西電力(株) 美浜発電所1号機	1992/07/30
A1-18	炉内中性子束監視装置導管シール部からの漏えい(レベル0-)	関西電力(株) 高浜発電所4号機	1999/07/05
A1-19	主給水制御弁の弁棒の切断(レベル0-)	関西電力(株) 高浜発電所1号機	1996/01/06

A1-20	主給水管水抜き配管からの蒸気漏えい( レベル 0 - )	関西電力( 株 ) 高浜発電所 2号機	1995/01/03
A1-21	主蒸気管のベント管取り付け部からの蒸気漏えい( レベル 0 - )	関西電力( 株 ) 高浜発電所 1号機	1993/07/17
A1-22	余熱除去ポンプ出口ドレン弁取り付け部からの漏えい( レベル 0 - )	関西電力( 株 ) 大飯発電所 1号機	1998/12/01
A1-23	炉内計測用温度計ハウジング溶接部からの漏えい( レベル 0 - )	関西電力( 株 ) 大飯発電所 2号機	1998/09/03
A1-24	主給水制御弁ダイヤフラム室からの駆動用空気の漏えい( レベル 0 - )	関西電力( 株 ) 大飯発電所 1号機	1994/07/22
A1-25	給水加熱器ドレンポンプ出口サンプリング配管からの蒸気漏えい( レベル 0 )	関西電力( 株 ) 大飯発電所 2号機	1992/04/26
A1-26	原子炉圧力容器ベント配管の弁のグランドバッキンからの蒸気漏えい( レベル 0 )	中国電力( 株 ) 島根原子力発電所 1号機	1993/02/04
A1-27	1次冷却材ポンプ軸封部( シール )の機能低下( レベル 0 - )	九州電力( 株 ) 玄海原子力発電所 1号機	1999/01/29
A1-28	原子炉格納容器冷却材ドレンタンクドレン弁からの漏えい( 評価対象外 )	九州電力( 株 ) 川内原子力発電所 1号機	1998/11/10
A1-29	制御棒駆動装置ハウジングの中間キャノピーシール部からの漏えい( レベル 0 - )	九州電力( 株 ) 川内原子力発電所 1号機	1996/10/27
A1-30	温度測定用配管戻り弁の弁棒折損( 不明 )	九州電力( 株 ) 川内原子力発電所 2号機	1988/03/24
A1-31	抽出ライン元弁の弁棒折損( 不明 )	九州電力( 株 ) 川内原子力発電所 2号機	1988/03/20
A1-32	一次冷却系の余剰抽出水系統配管からの漏えい( レベル 0 - )	関西電力( 株 ) 美浜発電所 2号機	1999/04/30
A1-33	クロスアラウンド管逃し弁付属小口径配管取り付けネジ部の割れ( レベル 0 - )	東京電力( 株 ) 福島第一原子力発電所 6号機	2000/07/21
A1-34	高圧タービン排気圧力検出用配管からの漏えい( レベル 0 - )	東京電力( 株 ) 柏崎刈羽原子力発電所 2号機	2000/06/29
A1-35	化学体積制御系抽出水配管からの漏えい( レベル 0 - )	関西電力( 株 ) 美浜発電所 2号機	2000/04/07
A1-36	配管点検用プラグ部( 放射線検査用栓 )からの蒸気漏えい( レベル 0 - )	関西電力( 株 ) 美浜発電所 3号機	2000/11/15
A1-37	共用試料採取室における気体状放射性物質の漏えい( レベル 0 - )	関西電力( 株 ) 大飯発電所 1、 2号機	2000/11/30
A1-38	タービン蒸気調節弁駆動用油配管フランジ部からの漏えい( レベル 0 - )	関西電力( 株 ) 大飯発電所 1号機	2000/12/04
A1-39	2次冷却系湿分分離加熱器逃し弁母管ドレンライン元弁からの蒸気漏えい( レベル 0 - )	四国電力( 株 ) 伊方発電所 1号機	2001/01/04

表 2.3 国内原子力発電所における蒸気漏えい関連事故件数 ( 1969 ~ 2001 )

漏えい事象	GCR	BWR	PWR	小計
フランジ部シール破損	1	6	5	12
弁のガスケット、グランドパッキン破損	0	4	4	8
溶接部の応力腐食割れ	2	2	7	11
その他 ( 漫食等 )	1	2	5	8
合計	4	14	21	39

表 2.4 海外発電所における漏えい事故事例の概要<sup>[2]</sup>

番号	事象	プラント	発生日
A2-1	給水配管の破断 ( レベル 2 )	フィンランド Loviisa - 2	1993/02/25
A2-2	一次系冷却作業中の一次系浄化系統からの冷却材の漏えい ( レベル 2 )	ロシア Kola - 2	1994/03/03
A2-3	一次冷却系逃し弁の故障による小 LOCA( レベル 2 )	カナダ PICKERING - A 2	1994/12/10
A2-4	ガーター・スプリングの検査と再配置後の圧力管の故障と小 LOCA ( レベル 2 )	アルゼンチン Embalse	1995/12/18
A2-5	蒸気発生器の非常水 / 再熱ドレイン分配ヘッダの破損 ( レベル 2 )	カナダ POINT LEPREAU	1996/10/04
A2-6	1次系に接続する配管からの漏えい ( レベル 2 )	フランス DAMPIERRE - 1	1996/12/14
A2-7	原子炉停止冷却設備配管よりの多量の漏えい( レベル 2 )	フランス CIVAUX - 1	1998/05/13
A2-8	燃料交換停止中の SG プローダウン配管破損( レベル 2 )	ブルガリア KOZLODUY NPP,UNIT - 1	1998/05/19

### 2.3まとめ

漏えいは時間をかけて徐々に進展するものと、あるとき突発的に発生するものと 2 種類に分類できる。また、HTTR のように配管接続部がほとんど溶接されている場合、フランジやシール部からの漏えいを重点的に監視すべきである。

### 3. ガス漏えい検知技術

#### 3.1 概要

高温ガス炉 HTTR は、水、炭酸ガス等に比べて漏えいの可能性が高いヘリウムガスを冷却材として使用するため、漏えい発生の防止対策のひとつとして、配管や設備間の各接合部は可能な限り溶接されている。しかし、溶接結合の出来ない一部弁・フランジには、ガスケットやグランドパッキンが使用されている。これらが経年劣化した場合、あるいは保守点検時に誤って傷をつけた場合などが漏えい発生の原因となり得ると考えられる。漏えい量が大きい場合には、圧力変化を検知することにより漏えいが判断できるが、微小漏えいの場合には、漏えい発生箇所の特定、あるいは漏えい量の測定は極めて難しい。

一般的に、ガス漏えい検知方法は、ガス成分を直接分析して検出する方法およびターゲットガスの副作用により検知する方法に大別できる。表 3.1 に、ヘリウムガス漏えい検知に利用可能と思われるセンサ技術をまとめる。ヘリウムガスの濃度を直接測定する方法は、質量分析器によるエネルギー分析や吸収スペクトル等、ヘリウムガス固有の特性を測定する方法がある。一方、間接的に測定する方法は、ヘリウムガス漏えいにより環境条件が異なることを圧力、流量、温度、音響などの物理量を計測することにより検知する方法がある。

ガス漏えいの物理量は、各種センサにより検知した情報を電気信号に変換して把握する。しかし、電気信号を利用した漏えい検知法は、電気ノイズの影響を受けること、あるいはセンサ毎に信号線を用意する必要があることなどの理由により、数百点を対象とした計測には実用的とは言えない。ここでは、一般的な物理量計測方法について調査を行うとともに、多点同時計測と耐ノイズ性を満足するもののひとつである、光ファイバ温度センサについて漏えい検知に利用した例を調査し、また光ファイバを伝送路として使用した応用例を調査する。

#### 3.2 調査結果

ヘリウムガス漏えい検知に使用できる光ファイバを用いた検知技術を表 3.2 に、一般的な物理量計測方法について調査した結果を表 3.3 に示し、詳細を付録 3 にまとめる。光ファイバを伝送路およびセンサとして利用した例を表 3.4 に示す。光ファイバを伝送路として使用したものとしては、 $\alpha$ 線や $\beta$ 線の透過率を利用した気体密度センサ、特定周波数の吸収スペクトルや吸収 / 非吸収光の透過光出力比による濃度センサの例がある。また、光ファイバに特定ガスに変色反応する物質をコーティングして伝播光減衰を利用する例がある。この方法では水素やアンモニアガスのセンサとしての報告がある。一方、光ファイバをそのままセンサとして利用した例としては、後方ラマン散乱光強度が温度に依存することを利用した蒸気配管のリーク監視がある。ヘリウム漏えいを検知する手段として、質量分析によ

り直接ヘリウムの有無および絶対量を測定する方法は、真空容器のリーク検出によく使われているが、原子力プラントにおいて数百点のヘリウム漏えい検知を対象にするほど安価で使い勝手のよいものではない。

放射線には $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線、X線、中性子などがあるがそれらの検出器としての応用例を表3.5に示す。 $\alpha$ 線は煙検出器に使われており、 $\beta$ 線は厚さ計や紙巻たばこ量目測定などに使われている。X、 $\gamma$ 線は透過力が大きいため液体や固体の密度計、厚さ計、レベル計に使われている。中性子は水素原子による中性子の減速を利用した水分計の例がある。ヘリウム等希ガスに利用できるものは阻止能比を利用したものが考えられるが、これまでにヘリウム漏えい検知の実用例はない。

以上ガス漏えい検知技術を表3.6にまとめる。

### 3.3まとめ

希ガスであるヘリウムガスは非常に安定であり、化学反応を用いた計測はできないため、直接計測する方法としては、 $\beta$ 線による空気とヘリウムの阻止能の違いを用いて、 $\beta$ 線計数率の比率を定量評価することが有用と考える。この場合、空気を満たした捕集器内にヘリウムガスを導入し、 $\beta$ 線の計数率の変化を監視する。漏えいの発生箇所とその量の定量化が開発課題となる。

また間接的に計測する方法としての圧力・流量計測は、ヘリウムガスの漏えい検知が非常に小さい値である $20\text{ cm}^3/\text{s}$ 以下を目標としていることからあまり実用的ではない。そのため、配管の保温材内部などに漏えいしたヘリウムガスを捕集する容器を設置し、その内部の微小な温度変化を感度良く捉えるものが必要である。

本研究では、多点同時計測が可能で、電磁波に対する耐ノイズ性が高い長所を有する光ファイバ温度センサを選択する。温度計測の精度と感度の関係、温度変化量と漏えい量の定量的な関係を求めることが開発課題である。

表 3.1 ヘリウムガス漏えい検知に有用なセンサ技術

番号	方式	要素技術
B1-1	ピエゾ抵抗式圧力センサ <sup>[3]</sup>	圧力・差圧発信器、流量・液位・温度などを同時に計測できる複合機能センサ
B1-2	容量式圧力センサ <sup>[3]</sup>	
B1-3	振動式圧力センサ <sup>[3]</sup>	
B1-4	流量センサ <sup>[4]</sup>	温度と圧力を補正した流量測定法
B1-5	絞り式流量計 <sup>[4]</sup>	
B1-6	面積式流量計 <sup>[4]</sup>	
B1-7	容積式流量計 <sup>[4]</sup>	
B1-8	熱電対温度計 <sup>[5]</sup>	
B1-9	薄膜白金測温抵抗体 <sup>[6]</sup>	測温抵抗体
B1-10	ファイバ放射温度計 <sup>[6]</sup>	光ファイバ、光電変換素子、集光用レンズ、ファイバ被覆
B1-11	走査型放射温度計 <sup>[6]</sup>	シリコン CCD、回転ミラー
B1-12	Detection of Leaks in Steam Lines by Distributed Fibre-Optic Temperature Sensing (DTS) <sup>[7]</sup>	センサの形状および敷設方法、耐熱性ファイバ

表 3.2 光ファイバを用いたガス漏えい検知技術

番号	方式	要素技術
B2-1	光ファイバリングレーザによる微量気体検出 <sup>[8]</sup>	バンドパスフィルタ、アイソレータ、ガスセル、ファイバアンプ、ファイバカップラ
B2-2	光ファイバを使ったライン状水素センサの検討 <sup>[9]</sup>	光ファイバ、水素感応材料
B2-3	光ファイバを用いた空気密度センサ <sup>[10]</sup>	光ファイバ、α線シンチレーション検出器
B2-4	高周波超音波測定用光ファイバプローブの細径化と音圧・温度の同時測定 <sup>[11]</sup>	光ファイバプローブ、超音波医用診断

表 3.3 ヘリウムガス漏えい検知に使用可能な一般的な物理用計測方法

番号	題目	要素技術
B3-1	物質中のβ線の吸収 <sup>[12]</sup>	電子吸収
B3-2	薄い検出器により測定したβ線スペクトルの形 <sup>[13]</sup>	半導体放射線検出器
B3-3	$^{204}\text{TI}$ / $^{36}\text{Cl}$ および $^{147}\text{Pm}$ / $^{45}\text{Ca}$ の2元混合物のデコンポリューション <sup>[14]</sup>	シンチレーション検出器
B3-4	応用放射線エネルギー分析法(11)IV.ベータ線のエネルギー分析法とその応用(6)液体シンチレーション測定による分析 <sup>[15]</sup>	シンチレーション検出器、緩和現象、電磁波放射、非熱的放射
B3-5	応用放射線エネルギー分析法(9)IV.ベータ線のエネルギー分析法とその応用(2)固体や気体を利用したベータ線検出器 <sup>[16]</sup>	スペクトル・荷電粒子検出

表 3.4 光ファイバを利用したガス漏えい検出例

検出手段	原理	適用例
密度・濃度	気中を通過するα線やβ線の計数率により気体の濃度を判定 特定ガスによる吸収スペクトル波長の変化量が濃度に依存することを利用 特定の気体を通過させた吸収光と通過させない非吸収光との透過光出力比により気体の濃度を測定	気体密度センサ 濃度センサ
化学反応	特定の気体に反応する感応材をコーティングし、ガス反応変色により伝搬光が減衰することを利用	水素センサ アンモニアガスセンサ
温度	温度に依存するアンチストークス光(後方ラマン散乱光)の強度と依存しないストークス光の比による	蒸気配管リーク監視

表 3.5 放射線を利用した計測器<sup>[17]</sup>

放射線	検出器	備考
α線	煙検出器	
β線	ガスクロマトグラフ用 ECD	ECD : Electron Capture Detector 薄いもの ( メッキ程度 ~0.5g/cm <sup>2</sup> 鉄 0.6mm 厚相当 )
	厚さ計	密度計の一種
	紙巻たばこ量目測定	
X,γ線	密度計	液体、粉体のかさ密度、ボイド等
	厚さ計	厚いもの ( ~100mm 厚鉄 )
	レベル計	液体、粉体
中性子	水分計	水素原子による中性子の減速を利用

表 3.6 ガス漏えい検知技術のまとめ

分類	センサ	測定方式 ( 方法 )	原理	精度	番号
直接	濃度	質量分析	エネルギー分析	$5 \times 10^{-13} \text{Pa} \cdot \text{m/s}$	-
		放射線阻止能	α、β、γ線の計数率	-	-
		ガス吸収スペクトル	吸収波長のレーザ光強度	-	-
間接	圧力	ピエゾ抵抗式 <sup>[3]</sup>	ダイアフラムとピエゾ抵抗	-	B1-1
		容量式 <sup>[3]</sup>	シリコン単結晶の機械的特性	-	B1-2
		振動式 <sup>[3]</sup>	シリコン単結晶振動子	-	B1-3
	流量	渦式 <sup>[4]</sup>	流量に比例した渦周波数	± 1 % ( of RATE )	B1-4
		絞り式 <sup>[4]</sup>	オリフィス前後の圧力差	± 2 % ( of SPAN )	B1-5
		面積式 <sup>[4]</sup>	フロートの移動量	1 ~ 2 % ( of SPAN )	B1-6
		容積式 <sup>[4]</sup>	オーバル型歯車の回転数	0.2 ~ 0.5 ( of RATE )	B1-7
	温度	熱電対 <sup>[5]</sup>	熱起電力	± 0.5°C	B1-8
		光ファイバ <sup>[6]</sup>	後方ラマン散乱光強度	± 1 °C	B1-12
		白金測温抵抗体 <sup>[6]</sup>	抵抗値が温度依存	± 1 °C	B1-9
		放射温度計 <sup>[6]</sup>	放射エネルギー	約 10°C	B1-10,11
	音響	マイクロフォン	周波数分析	数 Hz ( 解析周波数 )	-

#### 4. 考察

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発の第一段階として、光ファイバによる高温ヘリウム漏えい検知技術の適用の可能性を調査するため、国内外における漏えい事故事例およびガス漏えい検知技術を調査した。

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムが、将来実機に適用される場合には、最も漏えいが起こり易いと考えられる箇所に設置するのが実用的である。そのため、漏えいが起こり易いと考えられる箇所を選定することを目的とし、国内外の発電プラント、研究施設等の漏えい事故事例の調査を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- 冷却材漏えいの原因是、フランジや弁などのシール部破損と溶接部の亀裂が国内外とも最も多い。溶接部の亀裂は、設計不十分あるいは製造過程が原因であり、シール部からの漏えいは、回転部振動による経年劣化、弁座の経年劣化、摩耗、取り付け不良、シールの熱伸張などが原因である。
- プラントの種類別では、PWR が 54%、BWR が 36%、残り 10% が GCR であり、圧力管の本数が多い PWR が BWR よりも漏えい発生頻度が高い。シール箇所や弁からの漏えいは、PWR も BWR もほぼ同数であり、これはプラント形式に依存しない傾向である。

実機に最適な漏えい検知技術を適用するために、現在のガス漏えい検知技術を調査した。得られた知見は以下のとおりである。

- 検知方法は、ガス成分を直接分析して検出する方法およびターゲットガスの副作用により検知する方法に大別できる。
- ガス漏えいの物理量は、各種センサにより検知した情報を電気信号に変換して把握するのが一般的であるが、電気信号を利用した漏えい検知法は、電磁波の影響を受けること、あるいはセンサ毎に信号線を用意する必要があることなどの理由により、数百点を対象とした計測には実用的とは言えない。
- 多点同時計測と耐ノイズ性を満足するものとして、光ファイバ温度センサがある。光ファイバを伝送路として使用したものとしては、 $\alpha$ 線や $\beta$ 線の透過率を利用して気体密度センサ、特定周波数の吸収スペクトルや吸収 / 非吸収光の透過光出力比による濃度センサの例がある。
- 光ファイバをセンサとして利用した例として、後方ラマン散乱光強度が温度に依存することを利用した蒸気配管のリーク監視例がある。
- ヘリウム漏えいを検知する手段として、質量分析により直接ヘリウムの有無および絶対量を測定する方法は真空容器のリーク検出によく使われているが、安価で使い勝手のよいものではない。

以上をもとに、本研究では、多点同時計測が可能で、電磁波に対する耐ノイズ性が高い

光ファイバ温度センサを選択することに決定する。具体的には、ヘリウムガスの漏えい検知に有用な手法と考えられる、 $\beta$ 線による空気とヘリウムの阻止能の違いを用いて、 $\beta$ 線計数率の比率を定量評価する方法を採用する。この方法では、空気を満たした捕集器内にヘリウムガスを導入し、 $\beta$ 線の計数率の変化を監視する。漏えいの発生とその量の定量化が開発課題である。また間接的に計測する方法としての圧力・流量計測は、微小漏えいを検知目標としていることからあまり実用的ではない。そのため、配管の保温材内部などに漏えいしたヘリウムガスを捕集する容器を設置し、その内部の微小な温度変化を感度良く捉えるものを開発する。

## 5. おわりに

開発の第一段階として、光ファイバによる高温ヘリウム漏えい検知技術の適用の可能性を調査するため、国内外における漏えい事故事例およびガス漏えい検知技術調査を行った。漏えい事故事例の調査の結果から、シール部あるいは溶接部からの漏えい報告が多く、原子炉のプラント形式に依存しない傾向があることが分かり、またガス漏えい検知技術調査から、多点同時計測が可能で、電磁波に対する耐ノイズ性が高い光ファイバ温度センサを選択することを決定した。具体的には、ヘリウムガスの漏えい検知に有用な手法と考えられる、 $\beta$ 線による空気とヘリウムの阻止能の違いを用いて、 $\beta$ 線計数率の比率を定量評価する新しい方法を提案した。

なお本研究は、2000年度の日本原子力発電株との共同研究「高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発」として実施されたものである。

## 謝辞

本報をまとめるにあたり、貴重なご助言を頂いた大洗研究所所長（前高温工学試験研究炉開発部長）馬場治氏、研究主幹（前同部次長）大久保実氏、同部長藤川正剛氏、同部 HTTR 技術開発室長伊与久達夫氏に感謝いたします。査読いただいた核熱利用研究部主任研究員石原正博氏に感謝いたします。また本調査の実施にあたりご尽力頂いた、株日立製作所古内博氏および浅野保氏に深謝いたします。

## 参考文献

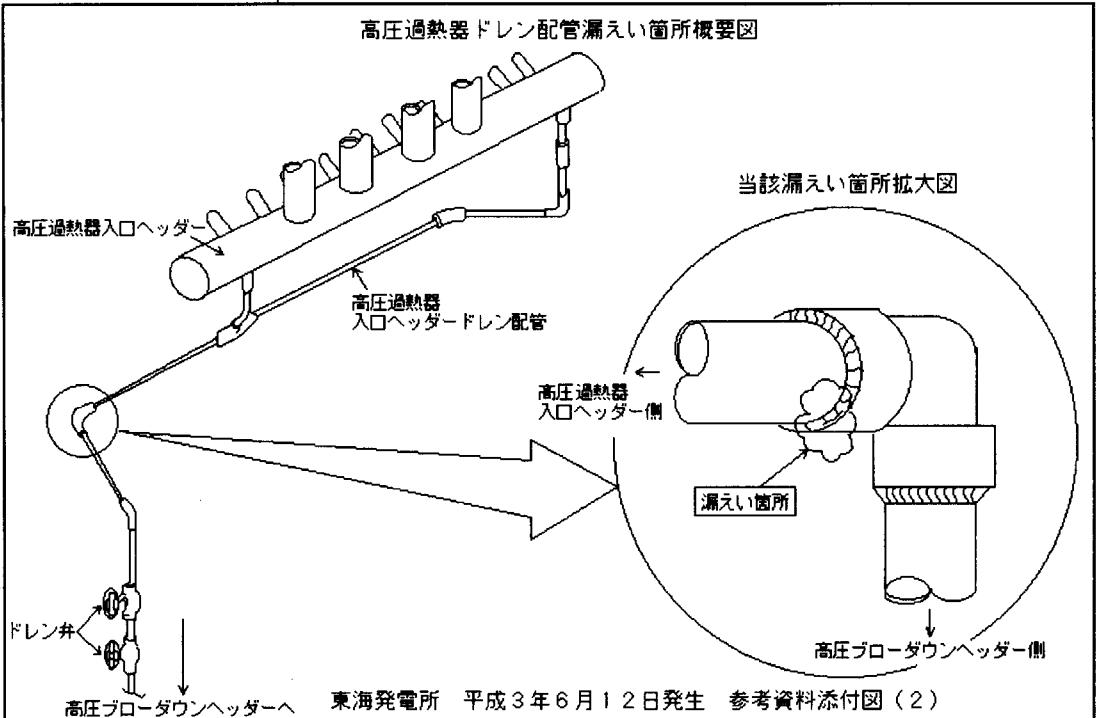
- [1] 日本原子力研究所：“日本原子力研究所大洗研究所設置許可申請書「HTTR（高温工学試験研究炉）原子炉施設の設置」”，(1989).
- [2] 資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース.
- [3] 阿波俊一郎, 日経メカニカル, (1993.3).
- [4] 小嶋進, 日経メカニカル, (1993.3).
- [5] 電気用語辞典, コロナ社, (1990.11).
- [6] 春原節昭, 日経メカニカル, (1993.3).
- [7] Neil G.Creik, Canadian Nuclear Society, 4<sup>th</sup> International Conference on CANDU Maintenance, Nov 16-18,Toronto, Canada, (1987).
- [8] 麦野明他, 第 18 回 光波センシング技術研究会 LST18-6, (1996.12).
- [9] 岡崎慎司他, 第 23 回 光波センシング技術研究会 LST23-22, (1999.6).
- [10] 松本茂昭, 第 24 回 光波センシング技術研究会 LST24-5, (1999).
- [11] 二村浩司他, 第 24 回 光波センシング技術研究会 LST24-6, (1999).
- [12] OUSEPH P J, DAVIS C L, HUNTER M, "Absorption of  $\beta$  rays in matter", D0323C (1050-2947) Phys Rev A, VOL.36.
- [13] OUSEPH P J, DAVIS C L, BRYAN M R, "Shape of  $\beta$  Spectrum obtained with thin detectors", D0517A (RSINA) (0034-6748) Rev Sci Instrum, VOL 60.
- [14] CARLES A G, BARQUERO L R, MALONDA A G, "Deconvolution of  $^{204}\text{TI} / ^{36}\text{Cl}$  and  $^{147}\text{Pm} / ^{45}\text{Ca}$  dual mixtures", D0208(NIMRD) (0168-9002), Nucl. Instrum. Methods Phys. Res Sect A Vol.339.
- [15] 瀧上誠, “Measurement of radiation energy and its application. IV. Measurement of beta-ray energy and its application. (6) Liquid scintillation spectrometry”, GO494A ( RAISA ) ( 0033-8303 ) Radioisotopes, VOL.39.
- [16] 川上宏金, “Measurement of radiation energy and its application. IV. Measurement of beta-ray energy and its application. (2) Beta-ray detectors using solids and gasses”, GO494A ( RAISA ) ( 0033-8303 ) Radioisotopes, VOL.39.
- [19] 石榑顯吉他, “放射線応用技術ハンドブック”,(1990).

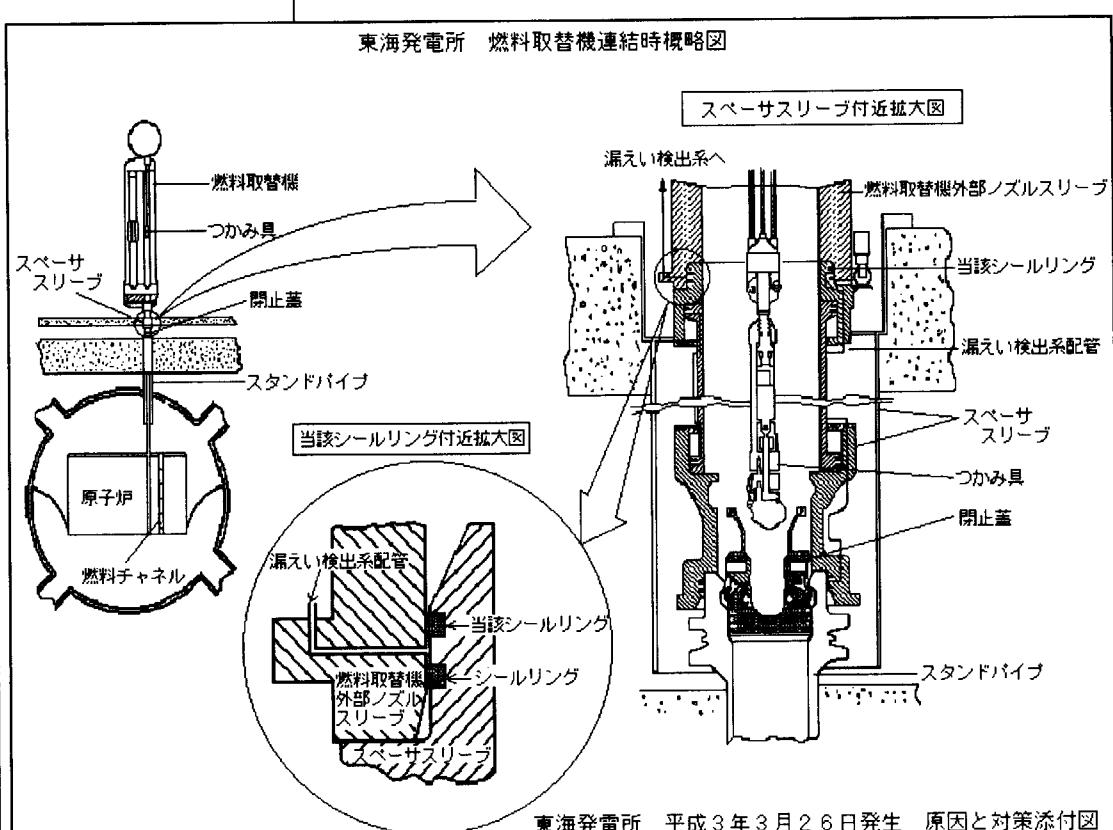
### 付録 1 国内原子力発電所における冷却材等の漏えい事故事例

1969 年から 2001 年までの 32 年間における国内 51 基のプラントを対象にした漏えい事故事例を示す。事故報告 983 件のうち 39 件が冷却材等の漏えいに関する報告である。

なお、ここで引用した図等については、転載許諾が得られている。

管理番号	A 1 - 1
件 名	熱交換器高圧蒸発器の入口ヘッダ分配管フランジからの蒸気漏洩
国 名	日本
ユニット名	日本原子力発電（株）東海発電所
炉 型	炭酸ガス冷却型 166MWe
発生年月日	1997年10月29日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>当該フランジ部の温度・圧力条件（約270°C、約54kg／平方センチメートルg）は、使用されていたシートパッキンの標準的な使用条件を超えていたため、経年変化により半径方向の亀裂が進展し、貫通に至ったと推定。</p> <p>当初の仕様は渦巻形ガスケットパッキンとなっていたがフランジ面間が狭隘であったため、仕様変更の手続き・検討が不十分なまま薄型シートパッキンとしたと推定。</p>
国際評価尺度	レベル 1

管理番号	A 1 - 2
件 名	熱交換器の高圧過熱器ドレン配管溶接部からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	日本原子力発電（株）東海発電所
炉 型	炭酸ガス冷却型 166MWe
発生年月日	1991 年 6 月 12 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	計画出力運転中、高圧過熱器ドレン配管溶接部から蒸気の漏洩を発見。当該部に溶接施工不良に起因すると考えられる割れが発生し、進展して、漏洩に至ったと推定。
 <p>高圧過熱器 ドレン配管漏えい箇所概要図</p> <p>当該漏えい箇所拡大図</p> <p>高圧過熱器 入口ヘッダー側</p> <p>漏えい 箇所</p> <p>高圧ブローダウンヘッダー側</p> <p>東海発電所 平成3年6月12日発生 参考資料添付図(2)</p>	
国際評価尺度	レベル 0 +

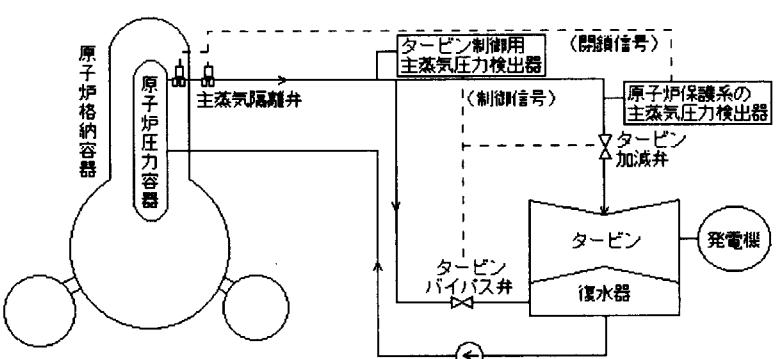
管理番号	A 1 - 3
件 名	燃料取替用スペーサスリーブの不具合
国 名	日本
ユニット名	日本原子力発電(株) 東海発電所
炉 型	炭酸ガス冷却型 166MWe
発生年月日	1991年3月26日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>スペーサスリーブの2段のシーリングのうち1段の直径が規格値より大きかったことから、燃料取替機をスペーサスリーブから切り離す際にシーリングが溝からはずれ、当該閉止蓋の上に落下したため、当該閉止蓋をつかむことができなかった。</p> <p>また、今回シールリングのシール機能を確認するための漏洩検出系が作動しなかった。これは燃料取り替え機を前回分解点検した際、検出配管を誤って接続していたためである。</p>
 <p style="text-align: center;">東海発電所 燃料取替機連結時概略図</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">         スペーサスリーブ付近拡大図       </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">         当該シールリング付近拡大図       </div> <div style="text-align: right; margin-top: 10px;">         東海発電所 平成3年3月26日発生 原因と対策添付図       </div>	
国際評価尺度	レベル0

管理番号	A 1 - 4
件 名	低圧蒸気ドレン弁溶接部からの蒸気漏洩
国 名	日本
ユニット名	日本原子力発電（株）東海発電所
炉 型	炭酸ガス冷却型 166MWe
発生年月日	1989年11月17日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	運転中、1号タービン低圧蒸気ドレン弁溶接部から蒸気漏洩が認められた。当該部に溶接施工不良によると考えられる割れが発生し、その後何らかの要因により徐々に進展し、貫通したと考えられる。
<p style="text-align: center;">1号タービン低圧蒸気ドレン弁溶接部漏えい箇所図</p> <p style="text-align: center;">漏えい箇所詳細図</p>	
国際評価尺度	レベル0

管理番号	A 1 - 5
件 名	原子炉給水系逆止弁のドレン配管止め弁からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	日本原子力発電(株) 東海第二発電所
炉 型	沸騰水型 1,100MWe
発生年月日	1990年11月29日
出典	資源エネルギー庁 ブラブル等情報データベース
事象の概要	<p>定格出力運転中、床ドレンサンプルへの流入量の増加が認められた。</p> <p>下流側の止め弁が異物の噛み込みにより微開状態となり、さらに、上流側の止め弁にシート面圧の不足による微少漏洩が生じ、浸食により徐々に漏洩量が増加した。</p>
<p style="text-align: center;">東海第二発電所内漏れ箇所概略図</p> <p style="text-align: center;">止め弁断面図</p> <p style="text-align: center;">東海第二発電所 平成2年11月29日発生 参考資料添付図</p>	
国際評価尺度	レベル0

管理番号	A 1 - 6
件 名	主蒸気管予備管台からの漏えい
国 名	日本
ユニット名	日本原子力発電（株）敦賀発電所 1号機
炉 型	沸騰水型 357MWe
発生年月日	1990 年 9 月 15 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>定格運転中、床ドレンサンプルピットへの流入量の増加が認められた。</p> <p>当該フランジ分解点検時にガスケットを納める溝部の寸法管理を実施していなかったことから、これまでの手入れで摩耗して深くなり、これによりガスケットのつぶし代が小さくなり、ガスケットの面圧力が減少し蒸気漏洩が発生した。</p>
国際評価尺度	レベル 1

管理番号	A 1 - 7
件 名	主蒸気隔離弁のパイロット弁から駆動用窒素ガスの漏洩
国 名	日本
ユニット名	東北電力(株)女川原子力発電所1号機
炉 型	沸騰水型 524MWe
発生年月日	1996年4月24日
出典	資源エネルギー庁トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>定格出力運転中、原子炉格納容器内の圧力が上昇していることが確認された。</p> <p>当該ボベットシールは、製造段階で融合不足による欠陥が存在した状態で装着され、使用状態における弁駆動用窒素圧力が作用することで、欠損を生じた。</p>
<p style="text-align: center;">主蒸気隔離弁用パイロット弁ユニット概要図</p>	
国際評価尺度	レベル0-

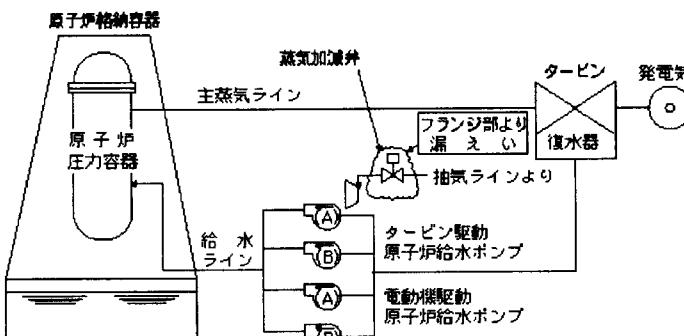
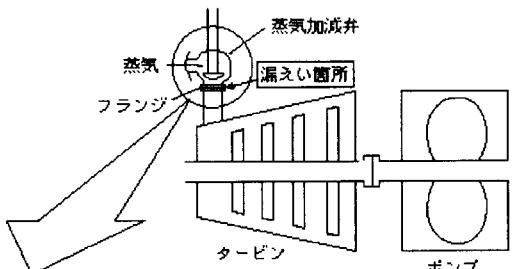
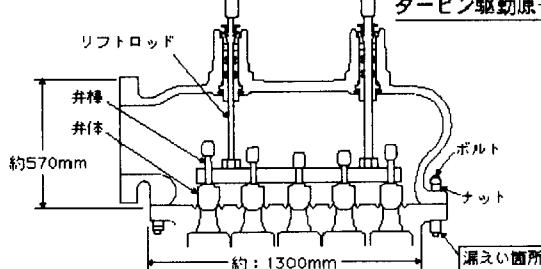
管理番号	A 1 - 8
件 名	タービン制御系の誤信号による原子炉自動停止
国 名	日本
ユニット名	東北電力(株)女川原子力発電所1号機
炉 型	沸騰水型 524MWe
発生年月日	1992年8月31日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>発電所の起動・停止時および通常運転時に発生する主蒸気圧力の変動等による応力によって、主蒸気圧力検出器(A)のブルドン管に疲労による亀裂が発生し圧力高側に変形した。</p> <p>これに伴い、当該検出器が実際の圧力より高い誤信号を発しタービンバイパス弁等が開いた。</p> <p>その結果、主蒸気管圧力が低下し、主蒸気隔離弁が全開した。</p>
	 <p>系統概略図</p>
	<p>ブルドン管 概要図</p>
	<p>女川原子力発電所1号機 平成4年8月31日発生 原因と対策添付図</p>
国際評価尺度	レベル0+

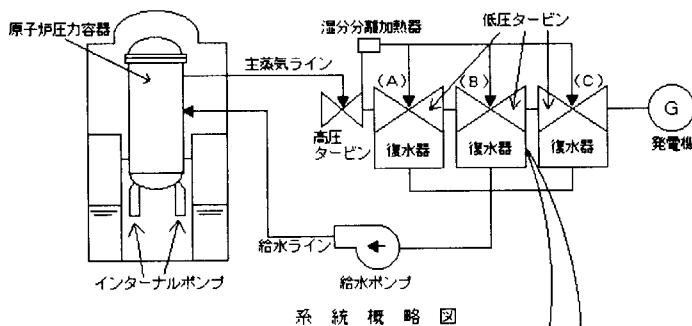
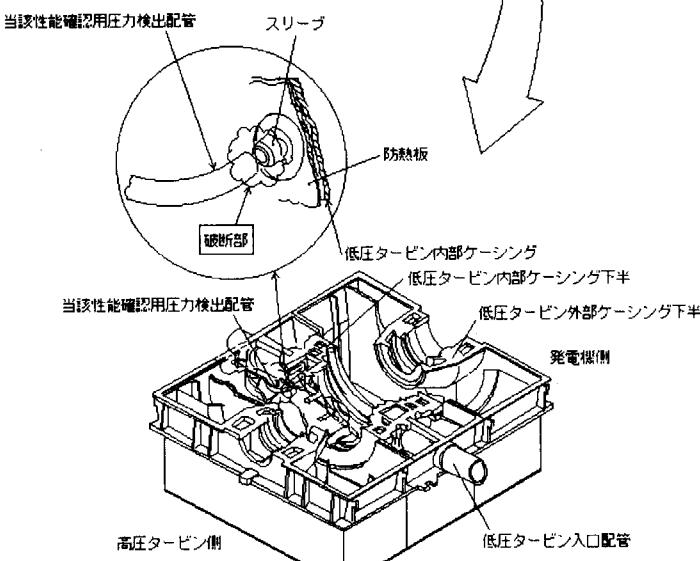
管理番号	A 1 - 9
件 名	タービン抽気系ドレン配管フランジ部からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	東京電力（株）福島第一原子力発電所 6号機
炉 型	沸騰水型 1100MWe
発生年月日	1998年7月30日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>タービン抽気系ドレン配管フランジ部のパッキンに損傷があり、それに対応するフランジシール面に微小な傷があった。</p> <p>このことから当該フランジ部を分解した際、シール部に微細な異物を噛み込み、フランジシール面およびパッキンに微細な傷が発生したことにより、徐々にシール機能が低下し、パッキンの損傷に至った。</p>
国際評価尺度	レベル0+

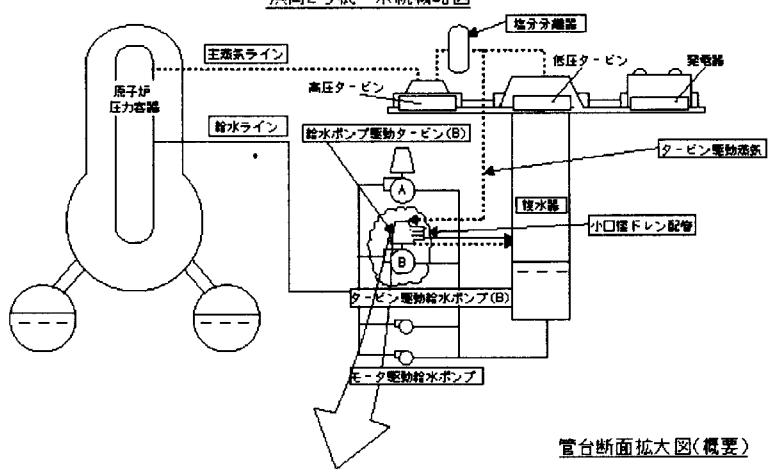
管理番号	A 1 - 1 0
件 名	格納容器内の主蒸気隔離弁の弁棒シール部からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	東京電力(株) 福島第一原子力発電所 3号機
炉 型	沸騰水型 784MWe
発生年月日	1997年1月28日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>グランド部漏洩処理系(VGL)配管の温度が上昇した主蒸気隔離弁の1弁(2-80B)の詳細点検の結果、当該弁の弁棒シール部近傍より漏洩音があり、弁棒及び弁棒シール部に変色が認められた。</p> <p>当該弁のグランドボルト締め付け施工に際し、潤滑剤の塗布が不足していたため、グランドパッキンに締め付け力が十分に伝わらず、この結果グランドパッキン面圧が低下し、弁棒シール部から蒸気が漏洩したと推定。</p>
	<p>格納容器内 ドレン系概略図</p> <p>弁グランド部漏えい処理系：弁棒のシール部から漏れた蒸気を回収するライン</p>
	<p>漏えい箇所 (シール部) 概略図</p>
	<p>主蒸気隔離弁構造図</p> <p>福島第一原子力発電所3号機 平成9年1月28日発生 参考資料添付図</p>
国際評価尺度	レベル0-

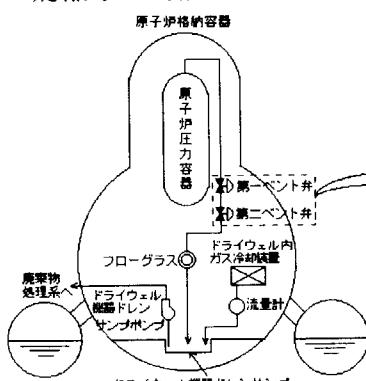
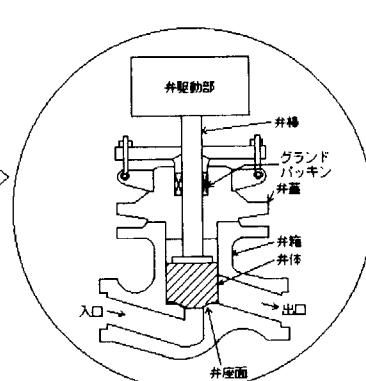
管理番号	A 1 - 1 1
件 名	発電機の機内冷却用水素ガスの漏洩
国 名	日本
ユニット名	東京電力(株)福島第一原子力発電所 6号機
炉 型	沸騰水型 1100MWe
発生年月日	1994年2月28日
出典	資源エネルギー庁 ブラブル等情報データベース
事象の概要	<p>発電機の短絡検出器用座フランジ部から水素ガスの漏洩を認めた。</p> <p>調査の結果、当該フランジ部のパッキン取り付けが不適切であったため、当該部から水素ガスが漏洩したと判明。</p>
国際評価尺度	評価対象外

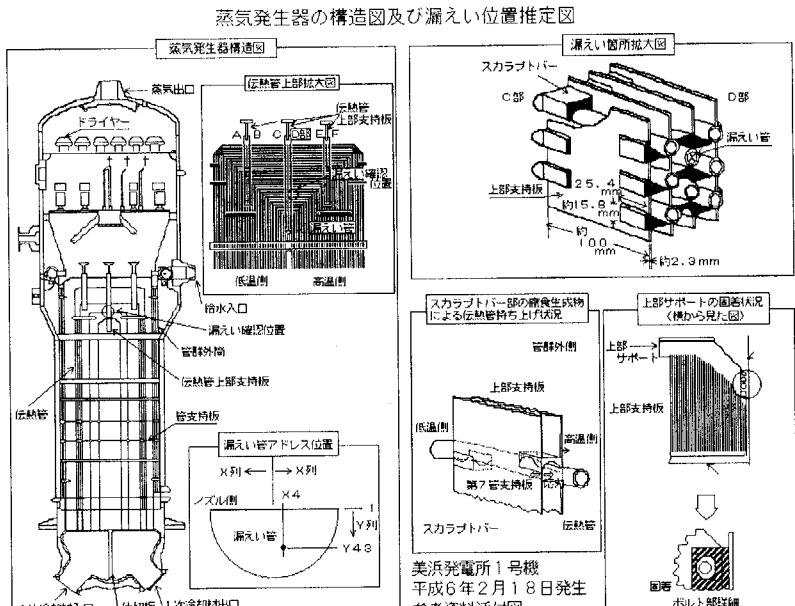
福島第一原子力発電所6号機 平成6年2月28日発生 参考資料添付図

管理番号	A 1 - 1 2
件 名	タービン駆動原子炉給水ポンプ蒸気加減弁フランジ部からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	東京電力(株) 福島第二原子力発電所 2号機
炉 型	沸騰水型 1100MWe
発生年月日	1998年7月21日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	定期検査において、当該蒸気加減弁の分解点検後組み立てを行う際、ボルトナットの締め付け装置を使用したところ、同装置が不調であったため、当該フランジ部のボルトナット全数を同時に締め付けられず、一部を別途締め付けていた。そのため当該フランジ部が片締め状態となりシール機能が低下し、漏洩した。
	 <p>原子炉格納容器 原 子 炉 壓 力 容 器 主 蒸 気 ラ イ ン 蒸 気 加 減 弁 フランジ部より漏えい 抽 気 ラ イ ン より 給 水 ラ イ ン タービン 復水器 発電氣 タービン駆動原子炉給水ポンプ 電動機駆動原子炉給水ポンプ</p>
	<p style="text-align: center;"><u>系 統 概 略 図</u></p>  <p>蒸 気 加 減 弁 フランジ 漏えい箇所 タービン ポンプ</p> <p>タービン駆動原子炉給水ポンプ概念図</p>
	 <p>リフトロッド 弁体 約570mm ボルト ナット 漏えい箇所 約: 1300mm</p> <p>幅: 約500mm</p> <p style="text-align: center;"><u>蒸 気 加 減 弁 拡 大 図</u></p>
	福島第二原子力発電所 2号機 平成10年7月20日発生 原因と対策添付図
国際評価尺度	レベル0 -

管理番号	A 1 - 1 3
件 名	低圧タービン内部にある性能確認用圧力検出配管破断
国 名	日本
ユニット名	東京電力(株) 柏崎刈羽原子力発電所 7号機
炉 型	沸騰水型 1356MWe
発生年月日	1997年5月21日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>低圧タービン(B) 入口圧力の性能確認用圧力検出配管(P S L - 1 0)が、低圧内部車室蒸気入口部側板に設けられたスリーブとの溶接部近傍で破断しているのを確認。</p> <p>当該配管の破断部近傍には、低圧タービン内部ケーシングの内外温度差による熱変位に伴う応力及び当該配管廻りを流れる蒸気やタービン回転に伴う機械的な振動による繰返し応力が発生しているところに、溶接の止端部処理が不十分であったことから、応力が集中し、疲労限度に達して破断が発生し、破断部が互いにぶつかり異音が発生したと推定。</p>  <p>系統概略図</p>  <p>低圧タービン(B)の性能確認用圧力検出配管 柏崎刈羽原子力発電所 7号機 平成9年5月21日発生 原因と対策添付図</p>
国際評価尺度	評価対象外

管理番号	A 1 - 1 4
件 名	原子炉給水ポンプ駆動タービンドレン配管管台部からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	中部電力(株)浜岡原子力発電所2号機
炉 型	沸騰水型 840MWe
発生年月日	1998年11月3日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>4本ある当該ドレン配管のうち1本の管台部（配管が給水ポンプ駆動タービンに接続されている部分）に直径約5mmの管通孔を確認。また、当該部および他の小口径ドレン配管の管台部に、浸食と腐食の繰返しによると見られる減肉を確認。</p> <p>このことから、給水ポンプ駆動タービンからの湿り蒸気により、当該管台部が内部から浸食・腐食された結果、減肉が進展し、貫通に至ったものと推定。</p>  <p>浜岡2号機 系統概略図</p> <p>管台断面拡大図(概要)</p> <p>給水ポンプ駆動タービン(B)まわり概略図</p> <p>貫通孔(直径:約5mm)</p> <p>浜岡原子力発電所2号機 平成10年11月3日発生 原因と対策添付図</p>
国際評価尺度	レベル0 -

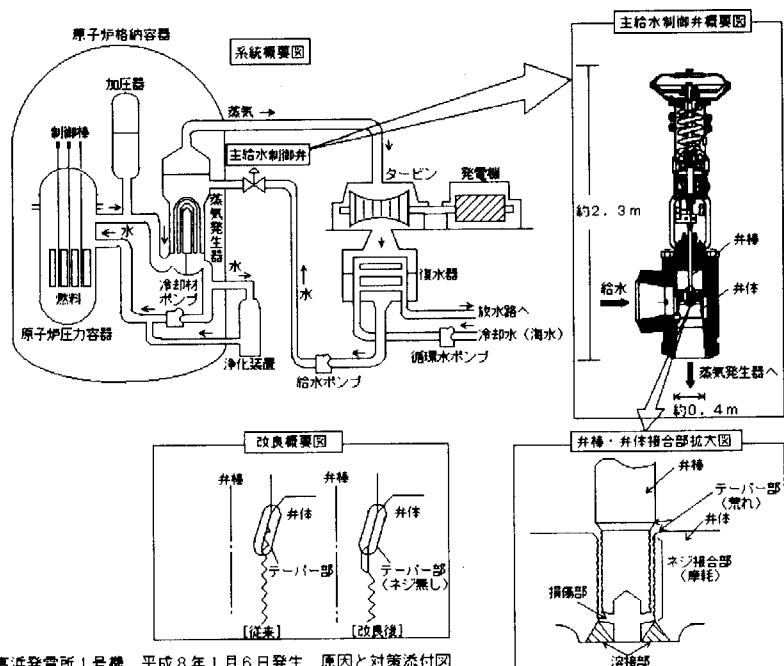
管理番号	A 1 - 1 5
件 名	原子炉圧力容器ベント弁の弁座部からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	中部電力（株）浜岡原子力発電所 1号機
炉 型	沸騰水型 540MWe
発生年月日	1995年12月4日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	当該の第一ベント弁の弁座面が不均一であったこと、および第二ベント弁に異物がかみ込んだことにより弁座部から漏洩が生じ、大部分は蒸気凝縮水となってドライウェル機器ドレンサンプへ流入し、一部は原子炉格納容器内へ蒸発したため、ドライウェル内ガス冷却装置からの凝縮水が増加したと推定。
 <p>格納容器内漏えい箇所概略図</p>	
 <p>ベント弁構造概略図</p>	
国際評価尺度	レベル0-

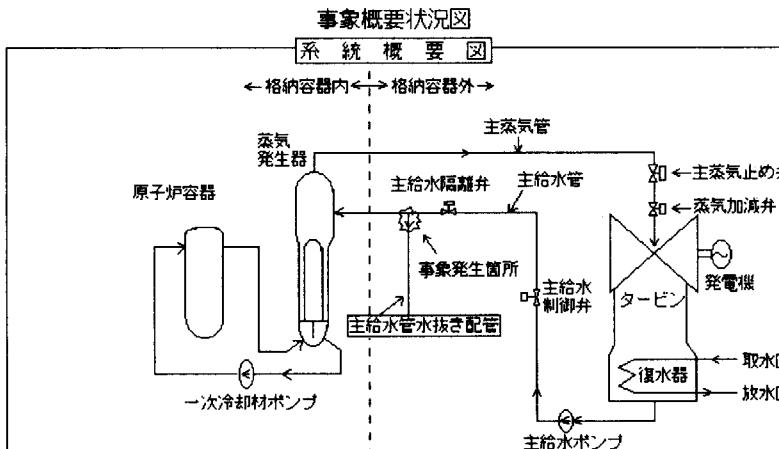
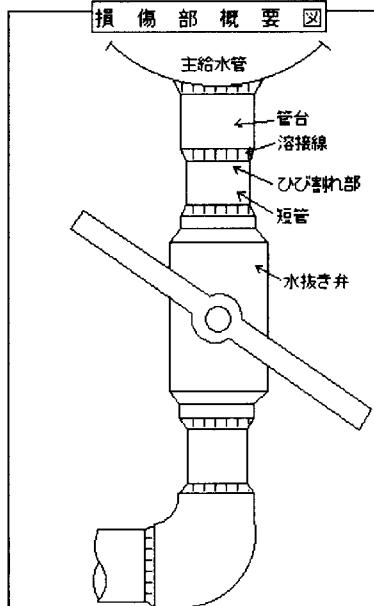
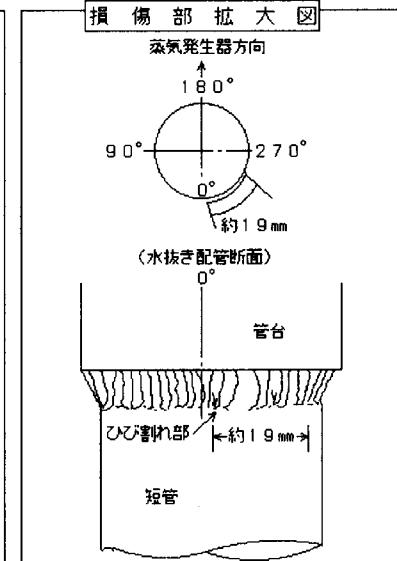
管理番号	A 1 - 1 6
件 名	蒸気発生器伝熱管の漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力(株) 美浜発電所 1号機
炉 型	加圧水型 340MWe
発生年月日	1994年2月18日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>美浜発電所1号機の蒸気発生器特有の構造に起因する熱膨張の拘束等によって当該部に曲がりが生じ、応力が発生していたことと、上部支持板部において腐食環境が形成されたことが重畠し、伝熱管外表面に応力腐食割れが発生したものと推定。</p>
 <p style="text-align: center;">蒸気発生器の構造図及び漏えい位置推定図</p> <p>蒸気発生器構造図</p> <p>漏えい箇所拡大図</p> <p>スカラップバー C部 D部 上部支持板 約2.5 mm 約4.4 mm 約5.8 mm 約1.0 mm 約2.3 mm 漏えい管</p> <p>入力ラブトバー部の腐食生成物による伝熱管持ち上げ状況</p> <p>上部サポートの腐食状況(横から見た図)</p> <p>上部外側 上部サポート 上部支持板 低溫側 高溫側 スカラップバー 第7管支持板 伝熱管 上部サポート 上部支持板 ホルト部詳細</p> <p>美浜発電所1号機 平成6年2月18日発生 参考資料添付図</p>	
国際評価尺度	レベル0 -

管理番号	A 1 - 1 7
件 名	蒸気発生器伝熱管の漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力(株) 美浜発電所 1号機
炉 型	加圧水型 340MWe
発生年月日	1992年7月30日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>漏洩が認められた伝熱管は、管板上のスラッジ堆積部に局部腐食（ピッティング）が認められ、そのひとつが板厚を貫通していた。</p> <p>貫通していたピッティングの形態は、複数のピッティングが段々状に重なりあっていた。</p> <p>管板上のスラッジには、過去からClや酸化銅が存在していたが、化学洗浄の後で行った還元処理が不十分だったため酸化銅が増加して腐食環境が形成されたと推定。</p>
国際評価尺度	レベル1

管理番号	A 1 - 1 8
件 名	炉内中性子束監視装置導管シール部からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力(株)高浜発電所4号機
炉 型	加圧水型 870MWe
発生年月日	1999年7月5日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	シール部構成部品(フロントフェルール)のシール面に微小な傷(長さ約7mm)を確認。これは定期検査時に同シール部の点検作業を行った際、シール面への工具(ノギス)の接触により生じたものと推定。
	<b>炉内中性子束監視装置説明図</b>
	<p style="text-align: center;">傷の状況図 (フロントフェルールを側面からみた図)</p>
	<p style="text-align: center;">漏えいのメカニズム</p>
	高浜発電所4号機 平成11年7月5日発生 原因と対策添付図
国際評価尺度	レベル0-

管理番号	A 1 - 1 9
件 名	主給水制御弁の弁棒の切断
国 名	日本
ユニット名	関西電力（株）高浜発電所 1号機
炉 型	加圧水型 826MWe
発生年月日	1996年1月6日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>プラグとシステムとの溶接部近傍でシステムの切断を確認。システムの破断面には凸凹が多く、一部に高サイクル疲労破壊特有のストライエーション状の模様が認められた。また、ネジ部調査の結果、プラグとシステムのネジ部は磨耗し、ネジ山が大きく減少してかみ合わない状態になっていた。</p> <p>工場組み立て時にネジ部のカエリ等によりネジがかじりつき、テーパー部に規定の軸力が確保されない状態で使用されていた。また、運転中の微小振動により、テーパー部の締め付け力が低下し、ネジ部の磨耗が徐々に進行し、振動による応力が繰返し加わり疲労破断に至ったと推定。</p>
国際評価尺度	レベル0-

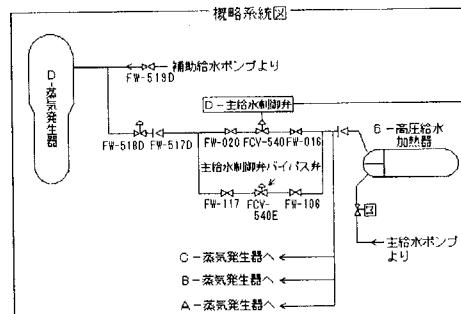
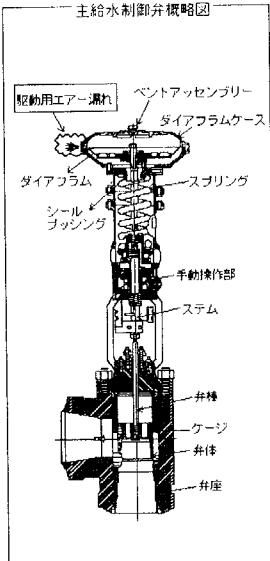
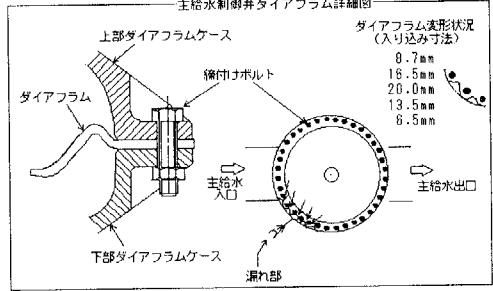


管理番号	A 1 - 2 0
件 名	主給水管水抜き配管からの蒸気漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力（株）高浜発電所 2号機
炉 型	加圧水型 826MWe
発生年月日	1995 年 1 月 3 日
出典	資源エネルギー庁 ブラブル等情報データベース
事象の概要	<p>過去に実施した主給水隔離弁電動化工事のため、当該配管がグレーチングと接触した状態になり、プラントの起動停止に伴う主給水管の熱移動により、当該配管に過大な応力が繰返し作用したため発生した亀裂が、その後の運転時の主給水管の微振動による応力により進展し、蒸気漏れに至ったと推定。</p>    <p>高浜発電所 2号機 平成 7年 1月 3日発生 参考資料添付図 (1)</p>
国際評価尺度	レベル 0 -

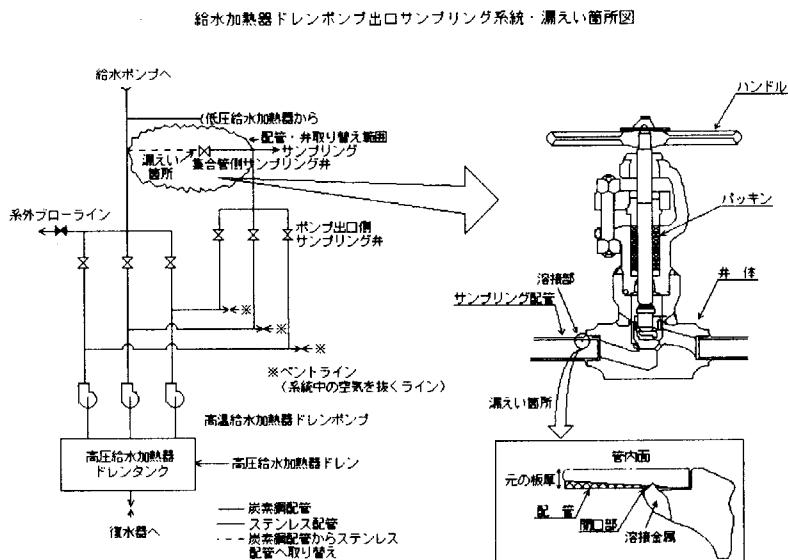
管理番号	A 1 - 2 1
件 名	主蒸気管のベント管取り付け部からの蒸気漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力（株）高浜発電所 1号機
炉 型	加圧水型 826MWe
発生年月日	1993年7月17日
出典	資源エネルギー庁 ブラブル等情報データベース
事象の概要	<p>当該溶接部の初層に応力集中を起こしやすい部位（溶接未溶着部）があったことおよび当該溶接部のほど厚不足が生じていたことにより、運転時の蒸気の流れによるベント管の微振動によって発生した応力が高サイクル疲労に対する損傷限界を上回ったため、当該溶接部にひび割れが生じ、進展し貫通したと推定。</p> <p style="text-align: center;">蒸気漏えい箇所の概略図</p> <p style="text-align: center;">高浜発電所 1号機 平成5年7月17日発生 参考資料添付図</p>
国際評価尺度	レベル0-

管理番号	A 1 - 2 2
件 名	余熱除去ポンプ出口ドレン弁取り付け部からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力（株）大飯発電所 1号機
炉 型	加圧水型 1175MWe
発生年月日	1998年12月1日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>定期検査で当該ドレン弁部を口径の大きいものに取り替えたことにより、同部の固有振動数が余熱除去ポンプの運転により生ずる流体振動の振動数に近いものとなつた。そのため、当該ドレン弁部が余熱除去ポンプの運転のたびに共振するようになり、同弁取り付け部において、疲労割れが発生、進展し、貫通したと推定。</p> <p>また、この過程でスラグ（溶接時に発生する残滓）を巻き込んだ溶接欠陥が割れの起点になったと考えられる。</p>
	<b>系 統 概 要 図</b>
	<b>B-余熱除去ポンプ出口ドレン弁廻り配管図</b>
	大飯発電所2号機 平成10年12月1日発生 報道発表添付図
国際評価尺度	レベル0 -

管理番号	A 1 - 2 3
件 名	炉内計測用温度計ハウジング溶接部からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力（株）大飯発電所 2号機
炉 型	加圧水型 1175MWe
発生年月日	1998年9月3日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	溶接に伴う残留応力の発生及び母材金属の鋭敏化、並びにキャノピーシール部内の冷却材の溶存酸素による影響が重畠して、応力腐食割れが同シール部内面から発生、進展し、運転中に貫通、漏洩に至ったと推定。
<p style="text-align: center;"><b>大飯発電所 2号機 損傷状況</b></p>	
国際評価尺度	レベル0 -

管理番号	A 1 - 2 4					
件 名	主給水制御弁ダイヤフラム室からの駆動用空気の漏洩					
国 名	日本					
ユニット名	関西電力(株) 大飯発電所 1号機					
炉 型	加圧水型 1175MWe					
発生年月日	1994年7月22日					
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース					
事象の概要	ダイヤフラム締め付けボルトの片締めにより、締め付け力が弱くなっていたことから、ダイヤフラムとダイヤフラムカバーとの面圧が低下し、ダイヤフラムがケース内に引き込まれ漏洩になった。					
	  <p>主給水制御弁ダイアフラム詳細図</p>  <p>ダイアフラム形状状況 (入り込み寸法)</p> <table border="1"> <tr><td>8.7mm</td></tr> <tr><td>16.5mm</td></tr> <tr><td>20.0mm</td></tr> <tr><td>13.5mm</td></tr> <tr><td>8.5mm</td></tr> </table> <p>大飯発電所 1号機 平成6年7月22日発生 参考資料添付図</p>	8.7mm	16.5mm	20.0mm	13.5mm	8.5mm
8.7mm						
16.5mm						
20.0mm						
13.5mm						
8.5mm						
国際評価尺度	レベル0 -					

管理番号	A 1 - 2 5
件 名	給水加熱器ドレンポンプ出口サンプリング配管からの蒸気漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力(株) 大飯発電所 2号機
炉 型	加圧水型 1175MWe
発生年月日	1992年4月26日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>配管内の高速流によるエロージョン(浸食)によって減肉が発生し、漏洩した。</p> <p>配管内に高速流が発生した原因は、通常運転時に当該サンプリング弁およびポンプ出口側サンプリング弁をすべて「開」運用していたため、当該サンプリング弁の出入り口の圧力差による逆流発生がしたと推定。</p>
国際評価尺度	レベル0



大飯発電所2号機 平成4年4月26日発生 参考資料添付図

管理番号	A 1 - 2 6
件 名	原子炉圧力容器ベント配管の弁のグランドパッキンからの蒸気漏洩
国 名	日本
ユニット名	中国電力（株）島根原子力発電所 1号機
炉 型	沸騰水型 460MWe
発生年月日	1993年2月4日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	弁組み立て時グランドパッキン締め付け作業において管理値よりも低いトルク値で締め付けたため、漏洩した。管理値より不足していたのは弁組み立て時に管理値を現場で読み間違ったため。
国際評価尺度	レベル0

管理番号	A 1 - 2 7
件 名	1次冷却材ポンプ軸封部（シール）の機能低下
国 名	日本
ユニット名	九州電力（株）玄海原子力発電所 1号機
炉 型	加圧水型 559MWe
発生年月日	1999年1月29日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>定期検査時に同シール部を取り替えた際、微小な異物が混入し、当該部が磨耗したため。</p> <p>この面荒れの結果、シールリングのスムースな動きが妨げられ、シールリングとシールランナの隙間が拡大したため、封水戻り流量の増加になった。</p>
国際評価尺度	レベル 0 -

管理番号	A 1 - 2 8
件 名	原子炉格納容器冷却材ドレンタンクドレン弁からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	九州電力（株）川内原子力発電所 1号機
炉 型	加圧水型 890MWe
発生年月日	1998年11月10日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>定期検査時に当該ドレン弁を開放した際、配管内の異物がシート部に付着し、その状態で同弁を閉め運転。その結果ドレンタンクの水位変動等の影響により異物の一部がはく離し、シート部に隙間が生じたため、同弁からの漏洩、格納容器サンプドレン流量の増加になった。</p> <p><b>格納容器冷却材ドレンタンクドレン弁概要図</b></p>
国際評価尺度	評価対象外

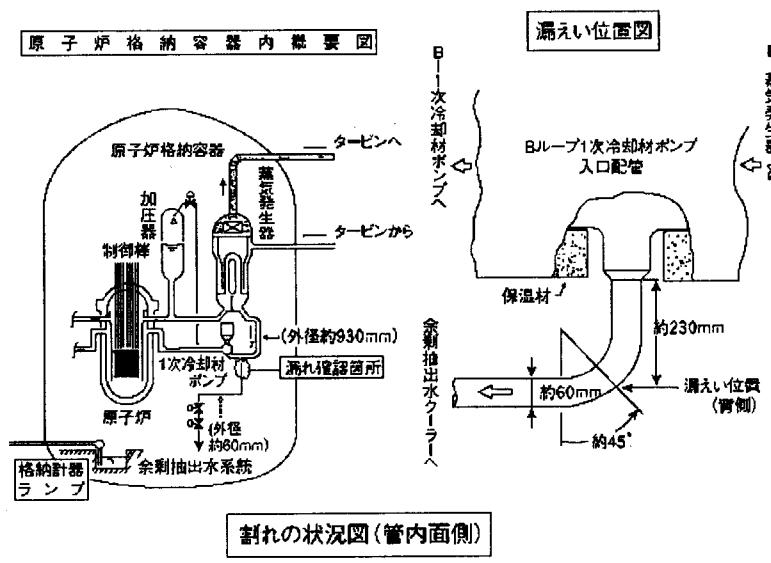
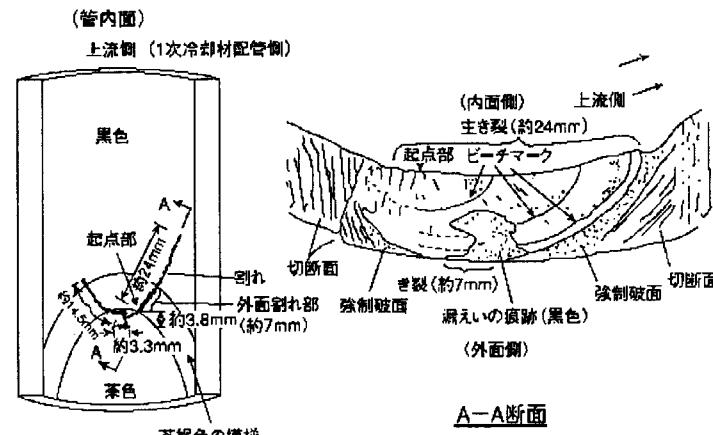
川内原子力発電所1号機 平成10年11月10日発生 原因と対策添付図

管理番号	A 1 - 2 9
件 名	制御棒駆動装置ハウジングの中間キャノピーシール部からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	九州電力（株）川内原子力発電所 1号機
炉 型	加圧水型 890MWe
発生年月日	1996年10月27日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	工場製作段階において使用された潤滑剤中の塩化物が、プラント建設時における機能試験およびプラント起動の過程でキャノピーシール内部に溶出し、一時的に腐食環境が形成されたことにより、応力腐食割れ（S C C）が発生、進展し、貫通漏洩した。
	<p style="text-align: center;">キャノピーシール損傷箇所概略図</p> <p>原子炉容器上部断面図</p> <p>制御棒駆動装置ハウジング</p> <p>キャノピーシール</p> <p>溶接部</p> <p>損傷部</p> <p>約10 cm</p> <p>約20 cm</p> <p>制御棒駆動装置ハウジング概要図</p>
	<p>溶接部</p> <p>損傷部</p> <p>キャノピーシール</p> <p>制御棒駆動装置 ハウジング</p> <p>キャノピーシール断面図</p> <p>溶接金属</p> <p>約0.9 mm</p> <p>キャノピーシール母材</p> <p>損傷部拡大図</p>
国際評価尺度	レベル0 -

川内原子力発電所 1号機 平成8年10月27日発生 参考資料添付図

管理番号	A 1 - 3 0
件 名	温度測定用配管戻り弁の弁棒折損
国 名	日本
ユニット名	九州電力（株）川内原子力発電所 2号機
炉 型	加圧水型 890MWe
発生年月日	1988年3月24日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>一次冷却材温度測定用配管戻り弁は、プラント運転中は常時全開位置で使用され、定期検査等の補修作業時のみ必要に応じて系統を隔離するため手動で閉止する。</p> <p>当該弁を点検した結果、弁棒が軸方向に対してほぼ直角に折損していた。</p> <p>グランド部からの漏れの可能性を少なくするよう弁棒と弁蓋との当たり面をきかせていたため、運転時に弁棒に過大な力が加わるとともに、当たり面より上部の弁蓋内が腐食環境になり、腐食により発生した水素が作用して亀裂が発生し、進展して折損に至ったと推定。</p>
国際評価尺度	明記されていない

管理番号	A 1 - 3 1
件 名	抽出ライン元弁の弁棒折損
国 名	日本
ユニット名	九州電力（株）川内原子力発電所 2号機
炉 型	加圧水型 890MWe
発生年月日	1988年3月20日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>化学体積制御系の抽出ライン元弁は、プラント運転中は常時全開位置で使用され、定期検査等の補修作業時に必要に応じて系統を隔離するため手動で閉止する。</p> <p>当該弁を点検した結果、弁棒が軸方向に対してほぼ直角に折損していた。</p> <p>グランド部からの漏れの可能性を少なくするよう弁棒と弁蓋との当たり面をきかせていたため、運転時に弁棒に過大な力が加わるとともに、当たり面より上部の弁蓋内が腐食環境になり、腐食により発生した水素が作用して亀裂が発生し、進展して折損に至ったと推定。</p>
国際評価尺度	明記されていない

管理番号	A 1 - 3 2
件 名	一次冷却系の余剰抽出水系統配管からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力(株) 美浜発電所 2号機
炉 型	加圧水型 500MWe
発生年月日	1999年4月30日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>当該配管の曲げ部において貫通亀裂があり、その破面に疲労損傷の特徴を示す模様を確認した。</p> <p>当該曲げ部には曲げ加工時の残留応力に加え、主配管からの1次冷却水と余剰抽出水系統配管内の滞留水との温度境界面(熱成層)の変動に伴う繰返し熱応力が発生していた。この結果、亀裂が発生、進展し、一部が貫通した。</p>
 <p>The diagram illustrates the internal components of the reactor vessel, including the reactor pressure vessel, steam generator, control rods, and primary cooling system pump. It also shows the secondary cooling system pump and the residual heat removal system. A detailed view of the leak location at the elbow of the primary cooling system pipe is shown, indicating a crack length of approximately 60mm and a depth of about 230mm from the outer surface.</p>	
 <p>This cross-section diagram provides a detailed view of the crack's progression through the pipe wall. It labels the upstream side, downstream side, and various features of the crack, such as the initiation point, propagation path, and fatigue crack faces. The diagram also shows the transition from the primary cooling system pipe to the residual heat removal system pipe.</p>	
<p>美浜発電所2号機 平成11年4月30日発生 原因と対策添付図</p>	

管理番号	A 1 - 3 3
件 名	クロスアラウンド管逃し弁付属小口径配管取り付けネジ部の割れ
国 名	日本
ユニット名	東京電力（株）福島第一原子力発電所 6号機
炉 型	沸騰水型 1100MWe
発生年月日	2000 年 7 月 21 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	プラントの起動・停止に伴う配管の熱膨張・収縮によりクロスアラウンド管が変位することによって、取り付けネジ谷部に応力が繰返し加わった結果、割れが発生、進展し、ほぼ全周にわたって貫通していたところに、地震力によって最終的に開口したと推定。
国際評価尺度	レベル 0 -

管理番号	A 1 - 3 4
件 名	高圧タービン排気圧力検出用配管からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	東京電力（株）柏崎刈羽原子力発電所 2号機
炉 型	沸騰水型 1100MWe
発生年月日	2000 年 6 月 29 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>高圧タービン排気圧力検出用配管の継ぎ手溶接部に生じた割れによる。</p> <p>この割れは、溶接施工時に溶接溶け込み不良を生じていたこと、および当該検出用配管とその支持（サポート）部に隙間があったことから、運転中の配管振動により、当該溶接部に繰返し応力が加わり、亀裂が発生、進展した。</p>
国際評価尺度	レベル 0 -

管理番号	A 1 - 3 5
件 名	化学体積制御系抽出水配管からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力（株）美浜発電所 2号機
炉 型	加圧水型 500MWe
発生年月日	2000 年 4 月 7 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	一時的な圧力低下操作時にオリフィス出口部で発生したキャビテーションによりオリフィス内面が減肉し、これにより通常運転中にも大きなキャビテーションが発生するようになった。このキャビテーションに伴う流体振動による高サイクル熱疲労によりエルボ溶接部に割れが発生、進展した。
国際評価尺度	レベル 0 -

管理番号	A 1 - 3 6
件 名	配管点検用プラグ部（放射線検査用栓）からの蒸気漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力（株）美浜発電所 3号機
炉 型	加圧水型 826MWe
発生年月日	2000 年 11 月 15 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>当該箇所は、炭素含有率が高く低温割れに対する感受性が比較的高い材料であり、また溶接による残留応力が存在している。</p> <p>溶接棒の被覆剤に吸着した水分から発生した水素が溶接部に混入したこと等により、低温割れが発生したと考えられる。さらにその割れがその後のプラントの起動・停止に伴う応力変動により進展し、貫通に至った。</p>
国際評価尺度	レベル 0 -

管理番号	A 1 - 3 7
件 名	共用試料採取室における気体状放射性物質の漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力（株）大飯発電所 1、2号機
炉 型	加圧水型 1175MWe
発生年月日	2000 年 11 月 30 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>1号機試料採取ラインに設置されているドレンポットのドレン配管ねじ込み部からの漏えいを確認。</p> <p>当該ねじ込み部を調査したところ、ドレンポットのめねじ部は、本来4山ねじであるが、1～2山しかねじ込めない構造であった。これは、ねじ加工についての明確な指示がされなかつたこと等によるものと考えられる。このような接合状態であったところ、定期検査期間中に当該ドレンポット下部のドレン元弁の分解点検が行われたが、その際配管に力が加わったことによりねじ接合部にすきまが生じ、サンプリングガスが漏えいしたものと推定。</p>
国際評価尺度	レベル 0 -

管理番号	A 1 - 3 8
件 名	タービン蒸気調節弁駆動用油配管フランジ部からの漏洩
国 名	日本
ユニット名	関西電力（株）大飯発電所 1号機
炉 型	加圧水型 1175MWe
発生年月日	2000年12月4日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>当該フランジ部を分解し、Oリング（ゴム製のパッキン）が破損していることを確認。</p> <p>これは、定期検査時のフランジの組み立て作業において、作業環境が狭いであったこと等からOリングがフランジ面に噛み込み、この状態のままで使用されていたため、油圧によりOリングが破損し、漏えいに至ったものと推定。</p>
国際評価尺度	レベル0 -

管理番号	A 1 - 3 9
件 名	2 次冷却系湿分分離加熱器逃し弁母管ドレンライン元弁からの蒸気漏洩
国 名	日本
ユニット名	四国電力（株）伊方発電所 1 号機
炉 型	加圧水型 566MWe
発生年月日	2001 年 1 月 4 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	二次系蒸気の漏えいは、塩分を含んだダストを発生させるような作業を行っていた周辺で、分解点検を実施した弁にダストが混入、結露水に溶け込み、プラント起動に伴う温度条件にて塩化物応力腐食割れが発生・進展し貫通したものと推定。
国際評価尺度	レベル 0 -

## 付録 2 海外発電所における漏えい事故事例

海外発電所における漏えいに関する事故事例を示す。

管理番号	A 2 - 1
件 名	給水配管の破断
国 名	フィンランド
ユニット名	Loviisa - 2
炉 型	PWR 440MWe
発生年月日	1993 年 2 月 25 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>このプラントは現在管理中で放射性物質の放出はなかった。</p> <p>破断は給水ポンプの起動中に起った。配管破断後、漏洩はただちに隔離され、運転中の給水ポンプは停止された。蒸気発生器の水位は自動起動した補助給水ポンプによって制御された。</p> <p>この配管の破断はタービンホールで起った。放射性物質を含まない数m<sup>3</sup>の水がタービンホールの床に流れた。</p> <p>運転員は自動保護系の起動前に原子炉を手動停止した。従って、ユニットはただちに安定した停止状態に移され、冷態停止状態に原子炉を移す準備が1次系にほう酸を加えることによって開始された。</p> <p>配管破断の原因はエロージョン・コロージョンであると暫定的に考えられている。類似の事象は1990年にLoviisa 1号機で起った。</p> <p>この種の事象はINESレベル1に通常評価されるが、この事象は1990年に発生したものと類似のものであり、レベル2が更に適切であろう。</p>
国際評価尺度	レベル2

管理番号	A 2 - 2
件 名	一次系冷却作業中の一次系浄化系統からの冷却材の漏洩
国 名	ロシア
ユニット名	Kola-2
炉 型	VVER
発生年月日	1994 年 3 月 3 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>ユニットは保守作業中であった。19時35分、原子炉の冷却作業中、密閉型コンパートメント内で一次冷却材補給水系の配管からの冷却材の漏えいが発生した。</p> <p>21時3分、この漏えいは当該配管を隔離することによって止められた。この配管からの漏えいは設計どおり隔離された。所内及び所外における放射線量の変化はなかった。</p> <p>排気筒からは有意な放射能の放出はなかった。漏えいの原因は、補給水ポンプと一次冷却材浄化用再生熱交換器をつなぐ配管の配管貫通部内側近傍の溶接継手部における配管の破断であった。</p>
国際評価尺度	レベル 2

管理番号	A 2 - 3
件 名	一次冷却系逃し弁の故障による小 LOCA
国 名	カナダ
ユニット名	PICKERING-A 2
炉 型	CANDU
発生年月日	1994 年 12 月 10 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>制御用空気供給配管の故障により一次冷却系圧力逃し弁が開いた後、非常冷却材注入系が作動した。この弁が開いた時、脱ガス復水器に冷却材が流入し、原子炉は脱ガス復水器水位高により全出力から自動的にラン・バックを始めた。</p> <p>1 分後、原子炉は冷却材圧力低により 75 % の原子炉出力でトリップ。弁から流出した冷却材によって、脱ガス復水器は満水になった。</p> <p>約 6 分後、負荷が 60 % に下がったことがわかり、タービンは手動でトリップされた。一次冷却系の圧力が急激に上昇し、ボイラ室のサンプにつながる脱ガス復水器逃し弁が開いた。この圧力の急激な上昇がおそらく脱ガス復水器の逃し弁の一の配管を破壊させ、小LOCAを起こし、ボイラ室に圧力を上昇させた。</p> <p>約 9 分後、非常冷却材注入系 (ECI) が自動的に作動した。小規模の配管破壊のため、自動動作設定点に到達しなかったので、ユニットに格納容器隔離は手動で開始された。</p> <p>90 分後、運転員がユニット内に立ち入り、故障した一次冷却系圧力逃し弁を手動で閉め、破損した逃し配管からの漏えいを止めた。約 150 トンの軽水が ECI 貯蔵タンクからユニットへ注入され、ユニット内のサンプは劣化した重水で満たされた。</p> <p>4 時間後、ユニットは一次冷却系が通常の停止時冷却モードに減圧され ECI が隔離された安定した状態に移された。</p> <p>空気及び水中に放射能の濃度に異常は認められなかった。その後の外部のサンプリングと冷却材の科学分析ではこのトラブルによる燃料の破損は認められなかった。</p>
国際評価尺度	レベル 2

管理番号	A 2 - 4
件 名	ガーター・スプリングの検査と再配置後の圧力管の故障と小 LOCA
国 名	アルゼンチン
ユニット名	Embalse
炉 型	PHWR
発生年月日	1995 年 12 月 18 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>1995年10月に開始されたエンバルス原子力発電所の長期の計画停止中、いくつかの作業が実施された。主な作業はSLARETTE Mark 3工具を使用してのガーター・スプリング・スペーサの検査とその再配置であった。圧力管L-12とA-14の試験中、作業員は再配置中のスペーサに多くのトラブルを起こし、この設備の電気保護装置を数回トリップさせた。11月24日圧力管A-14の試験が実施され、電気的腐食に起因すると思われる直径9mm、深さ1.7mmの孔が見つかった。このため圧力管A-14の取り替えが決定された。</p> <p>12月13日、発電所の起動作業が開始され、12月16日、全出力に到達した。12月18日、アニュラス・ガス系の圧力と原子炉建屋内のトリチウム濃度が増加した。目視検査によりアニュラス・ガス収集タンク内に水が認められた。発電所は一次冷却材の圧力と漏えい率を下げるために冷態停止状態に移された。圧力管L-12のその後の検査から長さ7mmの貫通孔が見つかった。</p> <p>12月19日、燃料チャンネルの交換が完了し、1月2日、発電所はの出力になった。原因の評価を実施中である。</p>
国際評価尺度	レベル2

管理番号	A 2 - 5
件 名	蒸気発生器の非常水／再熱ドレン分配ヘッダの破損
国 名	カナダ
ユニット名	POINT LEPREAU
炉 型	CANDU
発生年月日	1996年10月4日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>原子炉は水位変動の異常の原因を決定するために N o. 3 ボイラの二次側を検査するために1996年9月29日に停止された。N o. 3 ボイラの非常水供給／再熱ドレン分配ヘッダの区域への入室はボイラの運転に関する健全性の評価の1部として1996年10月4日に実施された。この検査中にヘッダが大きくジョン／コロージョンにより破損していることがわかった。ヘッダの配管接続部に貫通孔が認められ、シュラウドのスリーブ接続部は変形し破損していた。類似の破損が各ボイラに見つかった。その後、全てのボイラのヘッダを検査することが決定された。全てのボイラのヘッダは取り外され、耐エロージョン／コロージョン材料製のものと交換された。その後、ボイラには構造面での健全性に関するその他の破損が認められず、運転上問題がないと評価された。ヘッダの破損はボイラの水位の異常には関係していないと評価された。この作業の完了の後、原子炉は運転に復帰した。</p>
国際評価尺度	レベル2

管理番号	A 2 - 6
件 名	1 次系に接続する配管からの漏えい
国 名	フランス
ユニット名	DAMPIERRE - 1
炉 型	PWR
発生年月日	1996 年 12 月 14 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>1996年12月14日、Dampierre 1号機で1次系に接続する配管に漏えいが検出された。この漏えい率が増加し、1996年12月21日、<math>2301/h</math> の安全閾値に到達する前に、漏えいを隔離するために原子炉の停止を運転員に指示した。</p> <p>運転員は、安全注入系の配管から一次系への漏えいが隔離不能であったため、原子炉を停止した。この配管の破損部分は1ヶ月の停止中に取り換えられた。</p> <p>破損した配管は、Chinon の放射性物質工場で試験され、予備的な専門家による調査から直管部の貫通割れであり、予想された曲管や溶接部のような特定の部分ではないと結論された。この割れの原因是、上流側に設けられた密閉性の低下した弁からの低温水による温度変化に起因する熱疲労により発生した可能性が高い。</p> <p>運転者であるEDFは、900MWクラスのプラントの計画停止及び特に決定された停止中にこの配管の直管部のチェックを行うことを決定した。</p> <p>別の欠陥が1997年3月、Dampierre 3号機と1997年4月、Fessenheim 2号機の2つの配管に見つかっている。(配管のその部分は交換、専門家により調査される予定である。)</p> <p>EDFは、この現象に関する検討の進行状況をDSI Nへ報告した。この個別の配管上の小さな検出不能の欠陥が上流側の弁からの僅かな低温水の漏えいに起因する場合、1サイクル以内で貫通割れに到る可能性があると思われる。</p> <p>現在、EDFは6月末までにこの問題を解決する方針である。この方針の実施完了までにEDFは、これ等の配管について追加調査を行う予定である。</p>
国際評価尺度	レベル 2

管理番号	A 2 - 7
件 名	原子炉停止冷却設備配管よりの多量の漏えい
国 名	フランス
ユニット名	CIVAX-1
炉 型	PWR
発生年月日	1998 年 5 月 13 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>1998年5月12日午後8時頃、5月7日より停止・冷却中であった CIVAX 1号機の余熱除去設備より約 <math>30\text{m}^3/\text{h}</math> と推定される漏えいが検知された。</p> <p>この設備は、原子炉停止時に原子炉にある燃料を冷却する為に最少の冷却水を1次冷却設備を通して循環するのに使われる。この冷却設備は2系列で構成されている。漏えいは、5月13日午前5時頃に冷却設備の1系列を隔離して止められた。</p> <p>漏えいは、1次冷却設備から原子炉建屋サンプに流れた。漏えいした冷却水は全て原子炉建屋内に完全に貯蔵された。また、外部への影響は何も無かった。運転者(EDF)による損傷系列調査の結果、配管溶接部に 180mm のクラックが発見された。原子炉は現在停止されており、また、健全な系列の冷却設備を使って正常に冷却されており、住民に対するリスクは全く無い。</p> <p>運転者(EDF)により現在故障の特徴、補修に必要な期間及び補修作業員への安全対策を決める為の追加調査がなされている。運転者(EDF)による計画は安全当局により検討される。</p> <p>1次冷却材の重大な漏えいが発生した事により本事象は、INES 評価ではレベル 2 に分類された。</p>
国際評価尺度	レベル 2

管理番号	A 2 - 8
件 名	燃料交換停止中の SG ブローダウン配管破損
国 名	ブルガリア
ユニット名	KOZLODUY NPP,UNIT-1
炉 型	WWER
発生年月日	1998 年 5 月 19 日
出典	資源エネルギー庁 トラブル等情報データベース
事象の概要	<p>1998 年 5 月 19 日、1 号機が燃料交換停止中であったが、燃料装荷が終了し、1 次冷却材のほう酸濃度は 12g/l であった。</p> <p>No. 3 蒸気発生器 (SG) の 2 次側を化学除染中に SG ブローダウン配管が破損し、溶液の一部が SG コンパートメントに流出した。溶液は緊急ほう酸注入タンクに至り、化学的生成物がタンク水を汚染した。</p> <p>5 月 20 日から 21 日にかけてタンク水を水抜きして洗浄し、再度 12g/l のほう酸水を満たした。タンクの水抜き及び洗浄中、1 次冷却設備と使用済燃料ピットへのほう酸供給が必要な場合には、3 本の供給ラインが確保されていた。更に、純水が 1 次冷却設備と使用済燃料ピットへ流入しないような対策がとられた。にもかかわらず、緊急ほう酸注入タンクは使用出来ない状態であったので、運転制限条件を越えていた。</p> <p>5 月 22 日の週にブルガリア原子力安全委員会 (BNSA) により調査がおこなわれたが、SG ブローダウン配管の破損原因是、まだ明らかになっていない。BNSA はコズロドイ発電所の WWER-440 の SG の同様な配管すべてについてもチェックするように要求した。</p> <p>事象は、INES マニュアル III-3.2 に従って暫定的にレベル 1 と分類されたが、事象評価の結果、正当な理由なく運転要領書に違反したという安全文化の欠陥により BNSA はレベル 2 と分類した。</p>
国際評価尺度	レベル 2

**This is a blank page.**

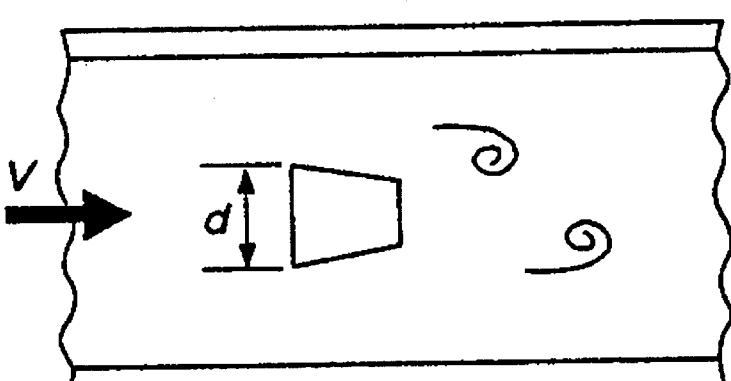
### 付録 3 ガス漏えい検知技術

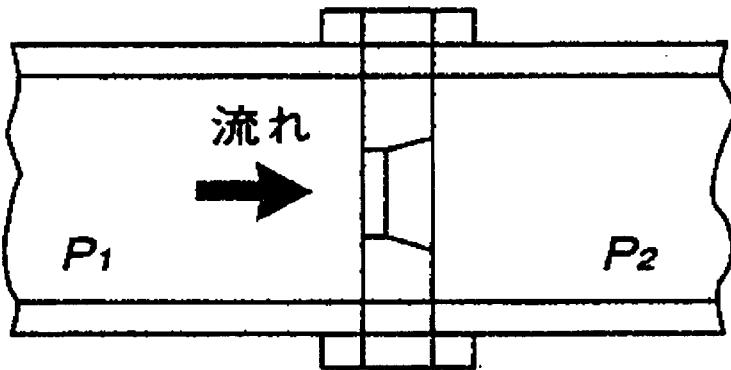
ガス漏えい検知に適用可能な検知技術を示す。なお、ここで引用した図等については、転載許諾が得られている。

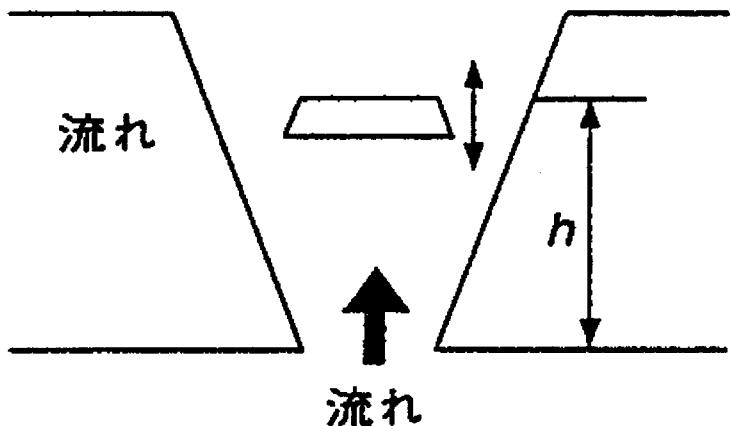
管理番号	B 1 - 1
キーワード	圧力センサ
題目	ピエゾ抵抗式圧力センサ、
執筆者	阿波 俊一郎
所属	山武ハネウエル工業 システム事業部
掲載文献名	日経メカニカル 1993.3.8
要旨	変換機構はシリコン単結晶ダイヤフラムを用いてい る。ピエゾ抵抗はその中に臭素、リンなどの不純物を拡 散もしくはイオン注入することによりダイヤフラムと全 く一体に形成することができる。表面の形成プロセスは、 半導体集積回路の形成と同じ方法で行うことができるの で、量産性および集積化が容易である。
要素技術	圧力・差圧発信器、流量・液位・温度などを同時に計測 できる複合機能センサ

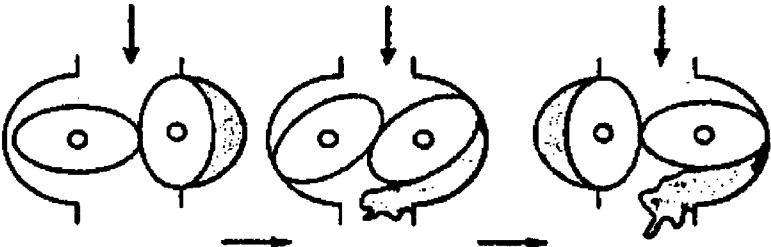
管理番号	B 1 - 2
キーワード	圧力センサ
題目	容量式圧力センサ
執筆者	阿波 俊一郎
所属	山武ハネウエル工業 システム事業部
掲載文献名	日経メカニカル 1993.3.8
要旨	ダイヤフラムはシリコン単結晶を用い、シリコン表面と絶縁物表面に金属電極を形成した構造であり、シリコン単結晶の機械的特性を利用していている。ギャップの形成、および電極の形成には半導体プロセスを用いているが、形状が3次元であるため集積化は難しい。
要素技術	圧力・差圧発信器、流量・液位・温度などを同時に計測できる複合機能センサ

管理番号	B 1 - 3
キーワード	圧力センサ
題目	振動式圧力センサ
執筆者	阿波 俊一郎
所属	山武ハネウエル工業 システム事業部
掲載文献名	日経メカニカル 1993.3.8
要旨	ダイヤフラムと振動子はすべてシリコン単結晶から作られる。ダイヤフラムに差圧がかかると、ダイヤフラム上に形成されたシリコン単結晶の振動子の張力が変化し、差圧変化が振動子の振動数変化となって現れる。信頼性の観点から見ると、真空環境使用時の長期安定性、単結晶で作られた振動子の完成度に不安がある。
要素技術	圧力・差圧発信器、流量・液位・温度などを同時に計測できる複合機能センサ

管理番号	B 1 - 4
キーワード	流量センサ
題目	渦流量計
執筆者	小嶋 進
所属	横河電機 センサ営業本部
掲載文献名	日経メカニカル 1993.3.8
要旨	<p>カルマン渦の数が流量に比例していることを利用した流量計である。カルマン渦とは、流体中の障害物の後ろに規則的に発生する渦をいう。測定原理を以下に示す。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 流体温度 : -200~400°C</li> <li>(2) 測定圧力 : ~30Mpa</li> <li>(3) 測定精度 : ±1% (of RATE)</li> </ul>  <p>渦発生体の下流側に、流速に比例した周波数(<math>f</math>)の渦が発生する</p> $Q \propto f = K \cdot V / d$
要素技術	温度と圧力を補正した流量測定法

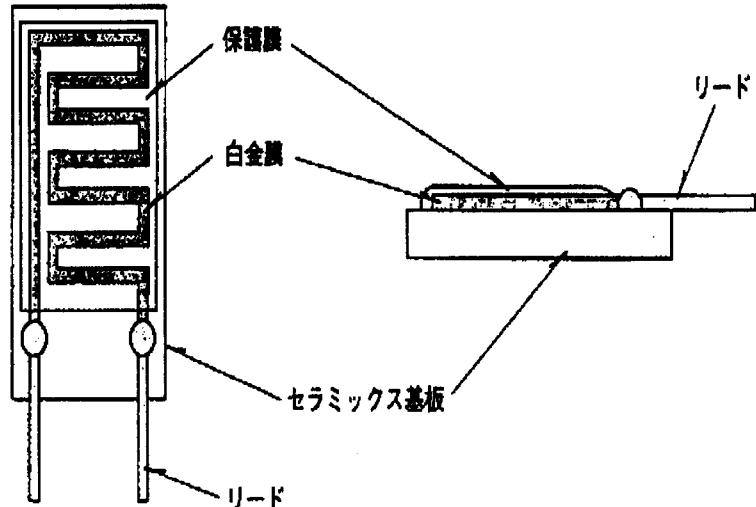
管理番号	B 1 - 5
キーワード	流量センサ
題目	絞り式流量計
執筆者	小嶋 進
所属	横河電機 センサ営業本部
掲載文献名	日経メカニカル 1993.3.8
要旨	<p>測定原理を以下に示す。</p> <p>(1) 流体温度 : -~500°C  (2) 測定圧力 : ~30Mpa  (3) 測定精度 : ±2% (of SPAN)</p>
	
	<p>ベルヌーイの定理を利用して、オリフィスの前と後の圧力差より流量を算出する</p> $Q = K \sqrt{P_1 - P_2}$
要素技術	温度と圧力を補正した流量測定法

管理番号	B 1 - 6
キーワード	流量センサ
題目	面積式流量計
執筆者	小嶋 進
所属	横河電機 センサ営業本部
掲載文献名	日経メカニカル 1993.3.8
要旨	<p>上部が太くなっているテーパ管と、中に浮かぶフロートから構成される。測定原理を以下に示す。</p> <p>(1) 流体温度 : <math>\sim 400^{\circ}\text{C}</math>  (2) 測定圧力 : <math>\sim 20\text{Mpa}</math>  (3) 測定精度 : 1~2% (of SPAN)</p>  <p>流れ</p> <p>流れ</p> <p><math>h</math></p>
要素技術	温度と圧力を補正した流量測定法

管理番号	B 1 - 7
キーワード	流量センサ
題目	容積式流量計
執筆者	小嶋 進
所属	横河電機 センサ営業本部
掲載文献名	日経メカニカル 1993.3.8
要旨	<p>測定原理を以下に示す。</p> <p>(1) 流体温度 : <math>\sim 400^{\circ}\text{C}</math></p> <p>(2) 測定圧力 : <math>\sim 20\text{Mpa}</math></p> <p>(3) 測定精度 : 1~2% (of SPAN)</p> <p>(4) 特 徴 : 積算体積を知ることができる。</p>
<p style="text-align: center;">(オーバル型)</p>  <p>もれなくかみ合った歯車が、1回転で定容積だけ送りだす。従って流量に比例した回転数(<math>N</math>)を示す</p> $Q = KN$	
要素技術	温度と圧力を補正した流量測定法

管理番号	B 1 - 8
キーワード	接触式温度センサ
題目	熱電対温度計
発行者	コロナ社
所属	—
掲載文献名	電気用語辞典 1990.11
要旨	<p>2種の金属を環状に接合し両接合点に温度差を与えることにより熱起電力を起すもの。この性質を利用して熱起電力を測定して温度差を測るのに使う。熱起電力は高い温度でも数十mV程度である。</p> <p>JIS C 1602には白金ロジウム-白金、クロメル-アルメル、鉄-コンスタンタン、銅-コンスタンタンの4種が規定されている。</p> <p>(1) 測定温度範囲：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>銅-コンスタンタン：-200~400°C</li> <li>鉄-コンスタンタン：-200~600°C</li> <li>クロメル-アルメル： 500~1000°C</li> <li>白金-白金ロジウム： 700~1400°C</li> </ul> <p>(2) 測定精度：±0.5°C</p>
要素技術	熱電対

管理番号	B 1 - 9
キーワード	接触式温度センサ
題目	薄膜白金測温抵抗体
発行者	春原 節昭
所属	チノー
掲載文献名	日経メカニカル 1993.3.8
要旨	<p>金属の抵抗値が温度により変化する現象を利用したもの。代表的なものに白金線、ニッケル線、銅線、ロジウム-鉄合金線、白金-コバルト線などがある。一般的な白金測温抵抗体は 0°Cで <math>100\Omega</math>となる長さの白金線をガラスまたはセラミックス製の巻枠に巻いて、ガラス管に封入した構造になっている。このため、応答性が悪く、コスト高になってしまっており、これを改良したもの。</p> <p>白金の薄膜をセラミックス基板上に形成した構造となっている。これにより、小型にできるので応答性が良くなり、量産性向上により低価格になる。</p> <p>(1) 測定温度範囲            白金測温抵抗体 : <math>-200\sim650^\circ\text{C}</math>            白金-コバルト測温抵抗体 : <math>-269\sim27^\circ\text{C}</math></p> <p>(2) 測定精度 : <math>\pm 1^\circ\text{C}</math></p>
要素技術	測温抵抗体



管理番号	B 1 - 1 0
キーワード	非接触式温度センサ
題目	ファイバ放射温度計
発行者	春原 節昭
所属	チノー
掲載文献名	日経メカニカル 1993.3.8
要旨	<p>被側温物体からの放射エネルギーを電気信号に変換するための光電変換素子に、光ファイバを取付けて放射エネルギーを導き温度を測定する。光ファイバの先端に集光用のレンズを配置して、測定対象物体の放射熱のみが入射するようにしている。</p> <p>一方、ファイバの機械的強度や耐熱性を強化するために、ステンレス鋼被覆の光ファイバを採用した。これにより、測定対象物に近接しての測定が可能となることから、光ファイバ先端の集光用レンズは省略した。</p> <p>(1) 測定温度範囲：600～1400°C  (2) 測定精度：10°C</p>
要素技術	光ファイバ、光電変換素子、集光用レンズ、 ファイバ被覆

管理番号	B 1 - 1 1
キーワード	非接触式温度センサ
題目	走査型放射温度計
発行者	春原 節昭
所属	チノー
掲載文献名	日経メカニカル 1993.3.8
要旨	<p>測定対象物体の物体がある大きさを持っており、全体の温度分布を温度パターンで確認したい場合に利用される。シリコン CCD や回転ミラーを使用した、一次元走査型放射温度計や以下のように、回転ミラーを組み合わせた二次元走査型放射温度計がある。</p> <p>(1) 測定温度範囲          シリコン CCD : 600~2000°C (90 回／秒)          回転ミラー : 100~500°C (50 回／秒)</p> <p>(2) 測定精度 : 10°C</p>
要素技術	シリコン CCD、回転ミラー

管理番号	B 1 - 1 2
キーワード	接触式・非接触式温度センサ
題目	DETECTION OF LEAKS IN STEAM LINES BY DISTRIBUTED FIBRE-OPTIC TEMPERATURE SENSING(DTS)
発行者	Neil G.Creik
所属	Nuclear Generation Consultant, Fredericton, N.B., Canada Ref[2]
掲載文献名	Canadian Nuclear Society 4 <sup>th</sup> International Conference on CANDU Maintenance Nov 16-18, 1987, Toronto, Canada
要旨	<p>2層の断熱材の間や蒸気配管上の断熱材を覆っているアルミニウムの下に光ファイバケーブルを敷設する。蒸気漏洩のため断熱材の温度が上昇して検出できる。</p> <p>たとえば、以下のように光ファイバケーブルを 0.25m 間隔で直径 2.5m の蒸気配管の円周方向に敷設する。蒸気漏洩のため断熱材の温度が局部的に上昇して、十分検出できるように配管の 1m 毎に 10 の温度測定点を設けた。また、より優れた実施例として、4km 光ファイバセンサケーブルで全体長 300m の蒸気配管モニタを行った。DTSまでの距離は 100m である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 測定温度範囲 : ~500°C</li> <li>(2) 測定精度 : 1°C</li> <li>(3) 測定距離 : 4km</li> <li>(4) 測定間隔 : 1m</li> <li>(5) 測定時間 : 20 秒</li> <li>(6) アラーム : 光ファイバ断線時に警報</li> </ul>
要素技術	センサの形状および敷設方法、耐熱性ファイバ

管理番号	B 2 - 1
キーワード	ガス濃度検出
題目	光ファイバリングレーザによる微量気体検出
執筆者	麦野 明 他 3 名
所属	千葉大学環境リモートセンシング研究センター
掲載文献名	第 18 回 光波センシング技術研究会 LST18-6 1996 年 12 月
要旨	可変型バンドパスフィルタ、アイソレータ、ガスセルモジュール、ファイバアンプ、カップラ等をリング状に構成したリング型ガスセンサにおいて、バンドパスフィルタをガスの吸収スペクトル波長に一致させるように設定し、レーザ発振光がガスセルモジュールを通過する際、ガスの濃度および圧力に依存して出力パワーおよび効率が変化し、光がリング内を周回する回数、すなわち有効吸収長が変化することを利用してガスの濃度を測定する。
要素技術	バンドパスフィルタ、アイソレータ、ガスセル、ファイバアンプ、ファイバカップラ

管理番号	B 2 - 2
キーワード	水素漏洩検知用ライン型ファイバセンサー
題目	光ファイバを使ったライン状水素センサの検討
執筆者	岡崎 慎司 他 3 名
所属	横浜国立大学工学部物質工学科
掲載文献名	第 23 回 光波センシング技術研究会 LST23-22 1999 年 6 月
要旨	光ファイバのクラッド部を伝搬するエバネッセント波がクラッド部の感応物質に吸収され、伝搬光に減衰を生じることを利用して漏洩を検知する。また、パルス状光源を利用して後方散乱光を検出する技術を応用し、漏洩点の位置検出を行う。水素の存在によって特性の変化する酸化タンゲステンが感応物質として有望である。
要素技術	光ファイバ、水素感応材料

管理番号	B 2 - 3
キーワード	空気密度計測
題目	光ファイバを用いた空気密度センサ
執筆者	松本 茂昭
所属	職業能力開発総合大学 情報工学科
掲載文献名	第 24 回 光波センシング技術研究会 LST24-5 1999 年 12 月
要旨	密封線源 ( $\alpha$ 線源) から放出された $\alpha$ 線は空気層を通過する際、飛程中の空気原子および分子の電離作用などによりエネルギーを減衰する。光ファイバケーブルは、 $\alpha$ 線により発生するシンチレーション光を伝送するためには用い、他方の端面には伝送したパルス光を電気信号に変換するために光電子倍増管が接続されている。これにより、 $\alpha$ 線一個一個に対応したパルス数を計測して空気密度を測定する。
要素技術	光ファイバ、 $\alpha$ 線シンチレーション検出器

管理番号	B 2 - 4
キーワード	同一位置の音圧と温度の同時測定
題目	高周波超音波測定用光ファイバプローブの細径化と音圧・温度の同時測定
執筆者	二村 浩司 他 2名
所属	東京工業大学 精密工学研究所
掲載文献名	第 24 回 光波センシング技術研究会 LST24-6 1999 年 12 月
要旨	光ファイバの端面に金のハーフミラーを介して長さ $100 \mu\text{m}$ 程度の高分子製円柱を付加し、さらに、端面を金の全反射ミラーでコーティングした構造を有した微小プローブである。波長可変レーザを用いて光ファイバへの入力波長を変化させ、プローブからの戻り光強度を観測する。超音波がプローブ部に照射されると、音圧に伴って光路長 $nL$ ( $n$ はキャビティ部樹脂の光屈折率) が変化し共振ピーク波長がシフトする。そこで、共振の光り波長をセットすると、プローブからの戻り光が強度変調されて超音波を観測できる。また、光波長対戻り光強度特性は音圧だけでなく温度変化によっても波長シフトするので、音圧と温度の同時計測を実現することが可能である。
要素技術	光ファイバプローブ、超音波医用診断

管理番号	B 3 - 1
キーワード	$\beta$ 線吸収
題目	Absorption of $\beta$ rays in matter. (物質中の $\beta$ 線の吸収)
執筆者	JOSEPH P J, DAVIS C L, HUNTER M
所属	Univ. Louisville, KY, USA
掲載文献名	D0323C (1050-2947) Phys Rev A VOL. 36
要旨	<p><math>\beta</math> 線が吸収物質中で指数関数的に数が減っていき、<math>\gamma</math> 線と類似した変化をする理由を解明した。<math>^{204}\text{Tl}</math> からの <math>\beta</math> 線を、0、24.8、75.9、283.7 <math>\mu\text{m}</math> 厚の Al 吸収板に通し、通過後の <math>\beta</math> 線のエネルギースペクトルがほぼ同一の形になる事と、吸収板の厚さの増加により <math>\beta</math> 線数が指数関数的に減少する事を確認した。</p> <p>またモンテカルロ計算でも同一の傾向を再現できる事を示した。MC 計算の条件と実験結果を検討し、初期 <math>\beta</math> 線のエネルギー分布と強度変化を考慮すれば、<math>\beta</math> 線の物質中の相互作用が <math>\gamma</math> 線と類似した単一相互作用と見なせ、指数関数的減少が説明できる事を示した。</p>
技術要素	電子吸収

管理番号	B 3 - 2
キーワード	ベータ線スペクトル
題目	Shape of $\beta$ Spectrum obtained with thin detectors (薄い検出器により測定した $\beta$ 線スペクトルの形)
執筆者	OUSEPH P J, DAVIS C L, BRYAN M R
所属	Univ. Louisville, KY, USA
掲載文献名	D0517A (RSINA) (0034-6748) Rev Sci Instrum VOL 60
要旨	厚さ $200\mu\text{m}$ 及び $1500\mu\text{m}$ の表面障壁型シリコン検出器により最高エネルギー $0.764\text{MeV}$ (飛程 $1400\mu\text{mSi}$ ) の $^{204}\text{Tl}$ $\beta$ 線スペクトルを測定し比較した。薄い検出器による測定結果はエネルギー $97\text{keV}$ の所にピークのある歪んだスペクトル形になった。薄い検出器におけるスペクトル形成過程をモンテカルロ法により計算して実験データと比較した。この結果、 $97\text{keV}$ のピークは約 $300\text{keV}$ 以上の最小電離電子により形成されており、より低いエネルギーの電子スペクトルと重ね合せることにより、計算結果は実験データをよく再現すると結論した。
技術要素	半導体放射線検出器

管理番号	B 3 - 3
キーワード	液体シンチレーション検出器、デコンポリューション
題目	Deconvolution of $^{204}\text{Tl} / ^{36}\text{Cl}$ and $^{147}\text{Pm} / ^{45}\text{Ca}$ dual mixtures. ( $^{204}\text{Tl} / ^{36}\text{Cl}$ および $^{147}\text{Pm} / ^{45}\text{Ca}$ の 2 元混合物のデコンポリューション)
執筆者	CARLES A G, BARQUERO L R, MALONDA A G
所属	CIEMAT, Madrid, ESP
掲載文献名	D0208 (NIMRD) (0168-9002) Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A Vol. 339
要旨	液体シンチレーション計数法で 2 元混合核種のスペクトルデコンポリューションを行う方法を標記 2 種類の混合核種に適用した。 $^{204}\text{Tl}$ と $^{36}\text{Cl}$ は $\beta$ 線のエネルギーが 710keV と 763keV と近く、 $^{147}\text{Pm}$ と $^{45}\text{Ca}$ も 224keV と 255keV である。クエンチ値と放射能比の異なる試料を分析してこの方法の制約事項を調べた。
技術要素	シンチレーション検出器

管理番号	B 3 - 4
キーワード	液体シンチレーション検出器、ベータ線スペクトル
題目	応用放射線エネルギー分析法(11) IV. ベータ線のエネルギー分析法とその応用(6) 液体シンチレーション測定による分析 Measurement of radiation energy and its application. IV. Measurement of beta-ray energy and its application (6). Liquid scintillation spectrometry.
執筆者	瀧上誠
所属	東京慈恵会医大
掲載文献名	G0494A (RAISA) (0033-8303) Radioisotopes VOL. 39
要旨	液体シンチレーション測定による $\beta$ 線スペクトル測定の概要について解説し、 $\alpha$ 放出体、 $\gamma$ 放出体のスペクトルについても述べた。クエンチングの違いによりスペクトルが異なるため、放射能測定にはクエンチングの補正が必要である。内部転換電子およびオージェ電子の測定、 $\beta$ 線滅弱スペクトルの測定、チェレンコフ効果による $\beta$ 線スペクトルにも触れた。
技術要素	シンチレーション検出器、緩和現象、電磁波放射、非熱的放射

管理番号	B 3 - 5
キーワード	ベータ線スペクトル
題目	応用放射線エネルギー分析法 (9) IV. ベータ線のエネルギー分析法とその応用 (2) 固体や気体を利用したベータ線検出器 Measurement of radiation energy and its application. IV. Measurement of beta-ray energy and its application. (2) . Beta-ray detectors using solids and gasses.
執筆者	川上宏金
所属	東大原子核研
掲載文献名	G0494A (RAISA) (0033-8303) Radioisotopes VOL. 39
要旨	(1) で述べた $\beta$ 線スペクトロメータ以外の固体や気体を利用した $\beta$ 線(電子線)検出器について簡単に紹介した。電子のエネルギー損失機構、検出器の種類とその利用法について解説した。
技術要素	スペクトル・荷電粒子検出

# 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>
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
干率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	アーロン	F	C/V
コンダクタンス	オーム	Ω	V/A
磁束	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
インダクタンス	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
セルシウス温度	ヘンリー	H	Wb/A
光束照度	セルシウス度	°C	
放熱能	ルーメン	lm	cd·sr
吸収線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
線量当量	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
	グレイ	Gy	J/kg
	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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	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、1eVおよび1u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、ヘクタ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

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

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 cal = 4.18605 J(計量法)
	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>	= 4.184 J(熱化学)
	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>	= 4.1855 J(15 °C)
	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>	= 4.1868 J(国際蒸気表)
	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>	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
	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>	= 735.499 W
	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	

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

(86年12月26日現在)

高温ヘリウム漏えい箇所特定システムの開発（共同研究） 第1報 漏えい事故事例およびガス漏えい検知技術の調査



古紙配合率100%  
白色度70%の再生紙を使用しています