

区 分 変 更	
変更後資料番号	9420
決裁年月日	平成 13 年 7 月 31 日

ナトリウム微小漏洩検出系の高度化

— 概 念 検 討 —

1997年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

製
下



ナトリウム微量漏洩検出系の高度化

—概念検討—

林田 均*

要 旨

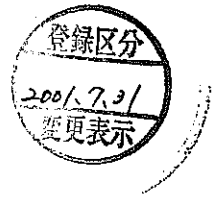
FBRプラントのナトリウム微量漏洩検出系を高度化し、性能を向上させることを目的に検討を行った。

先ず、将来的に性能向上が、検出系の高度化に有効だと思われる項目を検討し、S/N (雑音比)、応答性、ナトリウム選択検出性に注目することにした。

次に、これを実現可能と考えられる新たな検出手法について検討し、将来の研究の進展が期待できるレーザ応用計測技術の中からレーザーブレークダウン分光法を選定し、そのシステム適用概念を示した。

最後に、今後のR&Dの課題を抽出し、研究開発の方向を提案した。

*大洗工学センター 安全工学部 原子炉工学室



A study on an improvement of the small sodium leakage detection system

Conceptual study

Hitoshi Hayashida *

Abstract

A study on an improvement of the small sodium leakage detection system of the FBR plant was carried out.

At first, the item which should be improved were examined and focused to S/N, responsibility and exclusive detectability for sodium aerosol.

Next, the feature of the new detection techniques which could be feasible was studied. Then, the laser breakdown spectroscopy was selected as an advanced system.

Finally, development subjects were picked up, and the direction of the research and development program was proposed.

* Reactor Engineering Section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC

目 次

1. 緒言	1
2. 検出系の性能向上項目	2
2.1 既存検出系の概要	2
2.2 性能向上項目	3
3. 検出手法の調査検討	4
3.1 微量物質検出手法	4
3.2 原子スペクトル分析法の原理	4
3.3 原子発光分析法の原理	5
4. 高度化システムの適用概念	7
4.1 システム適用概念	7
4.2 システム構成	7
5. 課題及び今後の計画	9
5.1 課題	9
5.2 今後の方向	10
6. 結言	11
7. 謝辞	12
8. 参考文献	13

図・表リスト

表 1. ナトリウム漏洩検出器の原理と用途, 特徴	14
図 1. アニュラス部のエアロゾル濃度減衰	15
図 2. サンプリング配管内のエアロゾル濃度減衰	16
図 3. 原子スペクトル分析法の原理図	17
図 4. レーザーブレイクダウン分光法の原理図	18
図 5. 高度化ナトリウム微量漏洩検出システムの適用概念	19

1. 緒 言

これまで、FBRプラントにおけるナトリウム微量漏洩検出系は、漏洩先行型破損（LBB）思想を基に、安全性確保上十分な様に性能設定されたものが設置されてきている。

しかしながら、原型炉「もんじゅ」の2次主冷却系からのナトリウム漏洩を鑑みると、将来的には、信頼性を向上させ、かつ合理的にナトリウム微量漏洩を検出及び判定できる様に、システムの高度化を図ることが必用になると考えられる。

そこで、これまでの研究開発成果を基に、ナトリウム微量漏洩検出系の高度化を図る上で有効と考えられる項目を抽出し、その実現方策として適用可能と思われる新たな検出手法を研究の進展を勘案して選定した。

そして、選定した新たな手法についてシステム概念を検討し、今後のR&Dの課題の抽出と研究開発の方向を提案した。

2. 検出系の性能向上項目

2.1 既存検出系の概要

検出系の高度化を図る上で有効な項目を明らかにするために、原型炉「もんじゅ」を対象に実施された研究開発の結果を基に検討した。

2.1.1 原型炉のナトリウム微少漏洩検出系の概要⁽¹⁾

原型炉のナトリウム微少漏洩検出系は、ガスサンプリング式が採用されている。

これは、漏洩ナトリウムから発生するエアロゾルをサンプリングし、サンプリング管により検出器にエアロゾルを導き検出するものである。検出器は、ナトリウムをイオン化してイオン電流を測定するSID (Sodium Ionization Detector) と、放射線を用いてエアロゾルを検出するRID (Radiative Ionization Detector)、及び、エアロゾルがフィルタを目詰まりさせることを用いるDPD (Differential Pressure Detector) が用いられている。

これらの概要を表1⁽¹⁾に示す。

2.1.2 研究開発成果の整理

ナトリウム微少漏洩検出システムの高度化を考えた場合、検出対象物としては既存と同様に漏洩に伴い発生するエアロゾルを検出する手法が系統的に適していると考えられる。これは、限られた検出器数で広い範囲の対象からのナトリウムの微少漏洩を検出するには、他の物理量（発熱や発光等）では困難と考えられるからである。

そこで、ナトリウム漏洩に起因するエアロゾルが発生した時に、発生場所から検出器までのエアロゾルの移動と検出器での検出に関わる部分について、高度化を図る観点から研究開発成果を整理する。

(1) エアロゾル濃度減衰挙動⁽¹⁾

漏洩ナトリウムにより発生したエアロゾルが、配管または機器外面と保温材内装板との間のアニュラス空間や、漏洩検出系サンプリング配管内を経て検出器に至る輸送経路内において濃度が減衰する。

アニュラス空間及びサンプリング配管での濃度減衰の要因は、拡散、沈着、該当空間内の他の場所から流入する雰囲気ガスによる希釈、流路内面への付着等である。

これらは、エアロゾル濃度及び粒径、配管表面の温度、雰囲気湿分、キャリアガス流量、サンプリング配管長等の影響を受け、減衰量が変化する。試験により得られているエアロゾル濃度減衰特性例を図1と2⁽¹⁾に示す。

(2) 検出器の特性⁽¹⁾⁽²⁾

ガスサンプリング式微少漏洩検出系の検出器として使われているSID、RIDの検出限界感度は、それぞれエアロゾル濃度 10^{11} g/cc程度と 10^{10} g/cc程度であり、DPDは34g/h漏洩の検出ができることが確認されている。⁽¹⁾ また、特に微少漏洩検出に適しているSID及びRIDは、それぞれ以下の様な特性であることがわかっている。

SID は、感度が高いが不活性雰囲気中でしか使用できず、フィラメント温度、キャリアガス流量、温度や湿度等の雰囲気条件により特性が変化する。

RID は、キャリアガス流量、雰囲気条件、エアロゾルの化学組成により特性が変化する⁽¹⁾。また、フロンガスにより校正が可能⁽²⁾な反面、加熱により保温材から発生するガスに対しても感度を有する⁽³⁾。

以上の様に、微量漏洩検出器は様々な要因で出力が変化し誤報を出す恐れがあるので、ナトリウム微量漏洩の判定は、検出器と並列に設けたフィルタに付着させたナトリウムをオフラインで分析して確認することで行うものとしている⁽⁴⁾。

2.2 性能向上項目

前項の内容を、ナトリウム微量漏洩検出系の高度化を図る観点でまとめると、漏洩位置から検出器までのエアロゾル濃度の減衰による感度低下及び輸送遅れにより生じる検出時間遅れ、雰囲気条件等による検出器特性の変化、ナトリウム以外に感度を有する点などが挙げられる。

これらを基に、漏洩検出系を高度化するための性能向上項目は、サンプリング配管を使用しなくて良い様に検出部を漏洩部近傍への近接分散配置、環境変化や雑音に強い検出手法、ナトリウムエアロゾルに対する高い選択検出性を持たせること、などであると考えられる。

3. 検出手法の調査検討

3.1 微量物質検出手法

2章により、ナトリウム微量漏洩検出系の高度化において求められる特性が得られたが、先ず、微量なナトリウムエアロゾルの検出が可能と思われる手法について2章の内容を考慮して検討する。

微量物質を分析する手法としては、電磁波を利用する方法（光分析）、導電性を利用する方法（電気分析）、分離を利用する方法（分離分析）、その他の方法（比重・透磁率の測定、質量分析等）などがある⁶⁾。

電磁波を利用する方法は、測定対象の光の屈折、吸収、発光、散乱等を用いて分析する手法で、特に物質分離検出に物質固有の光波長を用いる原子スペクトル分析法⁶⁾（発光分析法、吸光分析法、蛍光分析法）は、選択検出性を高め易い。

導電性を利用する方法は電気化学分析法、分離を利用する方法はクロマトグラフ法である。これらは、選択検出性の面でナトリウム以外の物質による検出妨害の可能性が考えられたり、ある程度検出遅延時間が必要であったりする。

その他の方法のうち、比重や透磁率を測定する方法は選択検出性に難があるが、質量分析計による質量スペクトルの測定は選択検出性が得られる。しかし、オンラインでの連続計測への適用は困難である。

以上から、微量物質検出手法の中で、オンラインで連続的に計測が可能な点と、ナトリウムエアロゾルに対して高い選択検出性が容易に可能と考えられる点などから、原子スペクトル分析法が最も適用可能性が高いと考えられる。

3.2 原子スペクトル分析法の原理

原子スペクトル分析法は、原子固有の原子スペクトル線を生じる最外殻電子の励起を行い、この際の励起または放射過程の光を検出して、測定対象中の含有元素の定性、定量を行う分析法である。この時の原子の励起及び光の検出手段により分類して、原理的に原子発光分析法、原子吸光分析法及び原子蛍光分析法の3種類に大別できる。⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾

原子発光分析法は、対象物を加熱等で原子化（プラズマ化）し、それにより励起された原子が基底状態に戻るときの発光を利用する。この発光は、元素特有のスペクトルを示すので、特有なスペクトル光を検出することで対象物の含有元素が分析できる。原子発光分析法は、他の手法に比べて原子を光学的に励起する光源が要らない利点があるが、含有元素すべてから発光があるので、分光して求める元素のスペクトルを抽出する必要があることと、他の方法より少し感度が劣ると言われている。⁷⁾

原子吸光分析法は、基底状態にある元素が特有のスペクトル光を吸収して励起状態になることを利用するもので、対象物を基底状態に原子化して検出対象元素特有のスペクトル光を照射し吸収特性を計測する。本方式では、原子化装置に加えて対象元素に合わせた線スペクトル光源が必要になる。

原子蛍光分析法は、原子化された対象物の原子が光を受けることで励起し、この光励

起によって励起された原子が放出する光を観測する手法である。この手法では、励起するための光源と得られた光を分光する必要がある。⁽⁸⁾この手法は、実際にナトリウム漏洩検出用の研究も行われている。⁽⁹⁾

図3にこれらの原理図⁽⁴⁾を示す。

図のように原子スペクトル分析法のシステムは、分析対象を原子化する部分、受光分析を行う部分、原子発光分析法以外は光源部分から構成される。

ナトリウム微量漏洩を検出するシステムを考えた場合に、原子スペクトル分析システムを一体構成にすると、既存の微量漏洩検出系（SID等）の検出部に相当し、既存システムのようにサンプリングライン等を用いてナトリウム漏洩に伴うエアロゾルを検出部まで導く必要がある。

そこで本手法で、ナトリウム微量漏洩検出系の高度化を図る上で、サンプリング配管を使用せずに、漏洩位置近傍で検出することが可能か検討する。

まず、対象物まで光を導くことと、対象物からの光信号を受光部まで導くことは光ファイバにより原理的に可能である。そこで、原子化部を漏洩位置近傍に配置できるかを考えると、原子化部に光ファイバにてエネルギーを伝送して原子化する方法が採れば、原子化部は単なる小室（チャンバ）で済み最も単純な構成となる。

この方法は、光エネルギーにより対象物の原子化を行うもので、原子化により励起された原子が基底状態に戻る際の発光を測定することで元素分析が可能であり、原子発光分析法の一手法に当たる。この手法は、レーザーブレイクダウン分光法とも称されている。⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾図4にレーザーブレイクダウン分光法の原理を示す。

この方法以外では、原子化部の原子化エネルギー供給が他に必要になり原子化部の構成が複雑になる。そのため、多数の測定点を漏洩可能性のある位置に分散して配置することを考えると、この手法が最も信頼性及び経済性の面で有利である。

3.3 原子発光分析法の原理

前項で、最も有力な手法と考えられた原子発光分析法の原理を簡単に記述する。⁽⁴⁾

原子発光分析法は、プラズマ化された原子が熱的励起過程によって励起され、原子中の各エネルギー準位に分布する。励起された原子が基底状態に戻る際に原子固有の発光をするので、それを測定する手法である。原子のエネルギー分布はボルツマン分布則に従い、単位体積当たりの原子の総数をNとすると、励起状態 E_j に分布する原子数 N_j は、以下のようになる。

$$N_j = \frac{N}{Z(T)} g_j e^{-\Delta E_j / kT} \quad [1]$$

$$Z(T) = \sum_{j=0}^{\infty} g_j e^{-\Delta E_j / kT} \quad [2]$$

$Z(T)$: 分配関数
 ΔE_j : E_j の基底状態とのエネルギー差
 g_j : E_j の統計的確率
 k : ボルツマン定数
 T : 絶対温度

また、放出される光の振動数 ν_{nm} は、遷移するエネルギー準位間のエネルギー差 ($E_n - E_m$) によって決まり、次のようになる。

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h} \quad [3]$$

h : プランク定数

さらに、発光線の中で特定振動数 ν において観測される発光エネルギー ϵ は、次のようになる。

$$\epsilon = \int_0^{\infty} \epsilon_{\nu} d\nu = \frac{1}{4\pi} A_{nm} N_m h \nu \quad [4]$$

ϵ_{ν} : 発光係数

A_{nm} : $E_n - E_m$ のアインシュタイン係数

また、発光分析では、この発光エネルギー ϵ を光強度として測定することで定量分析を行う。

光強度は近似的には次のようになる。

$$I_{\nu} = \epsilon_{\nu} \ell \propto N \ell \quad [5]$$

$$I = \int_0^{\infty} I_{\nu} d\nu = (\epsilon_{\nu} / K_{\nu}) \int_0^{\infty} (1 - e^{-K_{\nu} \ell}) d\nu \quad [6]$$

I_{ν} : 振動数 ν の発光強度

ℓ : 発光部長さ

K_{ν} : 振動数 ν での原子線吸光係数

以上のように、最大の発光周波数は元素毎に定まり (ナトリウムは、589.592nm と 588.995nm の2つのスペクトルが強く出る。⁽¹³⁾)、その光強度は原子数に比例するので含有元素の定量分析ができる。

4. 高度化システムの適用概念

4.1 システム適用概念

ナトリウム微量漏洩検出系の高度化として、漏洩部から検出部までの感度低下や輸送遅れが無く、高いナトリウム選択検出性を持つナトリウム微量漏洩系を実現するには、3章の結果から原子発光分析法の一手法であるレーザーブレイクダウン分光法が適合性が高いと考えられる。そこで、レーザーブレイクダウン分光法を、実際のプラントに適用した場合のシステム概念について検討する。

まず、ナトリウムエアロゾルを検出する検出部の位置について考える。実際に容器や配管からのナトリウムの微量漏洩を検出するには、漏洩により生じるエアロゾルをできるだけ近くで検出することが応答性や感度の面で有利である。そこで、配管等と保温材の間のアニュラス空間にあるエアロゾルを直接検出するシステム適用概念を考える。

また、レーザーブレイクダウン分光法は、検出位置にて原子化を行い、それによる発光を測定するシステムである。従って、検出部は単なる小室であるが、そこに原子化させるためのレーザー光を導く必要があるとともに、発光を検出部から実際の光測定部まで導く必要がある。これらは、どちらも光ファイバを用いることができる。

光ファイバによる光伝送を行うことで、レーザー光源及び分光器（電気信号に変換する光検出器を含む。）は、検出部から十分離れた場所に設置することが可能である。これは、実際のプラントにおいて保守性を確保することが容易になる利点がある。また、光伝送網は、光切替器、光分配器、光結合器等を用いることで、多数の検出部を漏洩可能性位置に配置することが経済性及び信頼性高く実現できる。さらに、検出部が静的機器のみで構成されることでも経済性及び信頼性が高くなる。実際のプラントにおいて保守性を確保することが容易になる。

図5に高度化ナトリウム微量漏洩検出システムの適用概念を示す。

4.2 システム構成

レーザーブレイクダウン分光法のシステムは主に、発光部、送光用光ファイバ、検出部（原子化部）、受光用光ファイバ、分光器（光検出器を含む。）、信号処理装置などの機器で構成される。

発光部は、ナトリウムエアロゾルを原子化するのに十分なエネルギーを供給するレーザー光源（原子化のエネルギー源であり、発光波長は問題にならない。）が必要である。これには、出力及び耐久性等からYAGレーザーを用いることが考えられる。⁽¹⁾

検出部は、レーザーブレイクダウン分光法では単なる小室であり、4.1項のシステムでは配管等と保温材との空間そのものが検出部に当たる。

送光用及び受光用光ファイバは、それぞれYAGレーザー用高出力伝送用ファイバとナトリウム発光波長に最適なファイバを用いる。

分光器は、ナトリウム発光波長に対して十分な分解能が必要となる。一般に当該波長範囲の分光器で0.1nm程度の分解能は得られるため、ナトリウム特有の589.592nmと

588.995nm の 2 つのスペクトルは容易に分離できる。

信号処理装置は、分光器からの信号を基にナトリウム特有の信号をパターン抽出し、ナトリウムの漏洩の判定を行う。また、ナトリウム特有なスペクトルの信号強度から漏洩量を測定する。

以上の構成機器は、単体レベルにおいては、原理的にそれぞれ既存の技術で実現できると考えられる。システムとしてのナトリウム微量漏洩検出特性については、次章で検討する。

5. 課題及び今後の計画

5.1 課題

ナトリウム微量漏洩検出系の高度化として、レーザーブレイクダウン分光法を適用するためには、その手法について詳細な特性評価が必要になる。

それらを、検出特性、光伝送特性、レーザー耐久性、システム特性に分けて研究課題を検討する。

5.1.1 検出特性

先ず、評価を容易にするために、ナトリウムエアロゾルの検出特性を（光伝送部を除いた）検出要素について検討する。検出要素については、原理通りに機能するか確認するとともに測定系としての成立性を評価するために各種条件における検出特性を調べる必要がある。必要な特性の内で主なものを以下に示す。

(1) レーザー特性による影響

レーザーの出力、光周波数、照射周期のナトリウム発光信号に及ぼす影響等を調べる。これらは、最適なレーザーの選定等のために必要である。

(2) 発光信号の特徴把握

ナトリウムの発光信号のスペクトル分布、ダイナミックレンジ（照射光との対応特性）、時間変化（照射位置で、原子化により密度低下が起こると考えられるので発光信号が時間減衰する可能性がある。）等を調べる。これらは、受光部の最適設定とナトリウムエアロゾルの定量計測等のために必要である。

(3) エアロゾル条件の影響

ナトリウムエアロゾルの粒径、温度、湿度、流動速度（キャリアガス等による）、雰囲気（空気、窒素ガス等）の検出特性に与える影響等を調べる。これらは、ナトリウムエアロゾルの定量計測等のために必要である。

また、図5の様に配管等の外側空間のナトリウムエアロゾルを検出する場合に、アニュラス循環系を用いないと既存のサンプリング方式に比べてエアロゾル流動が少ない状態となる。これにより、漏洩位置から検出位置までのエアロゾル移行が遅れたり濃度減衰する可能性があり、図5の様にアニュラス雰囲気循環系を設けて、配管等と保温材との空間の雰囲気を流動させる必要が生じることも考えられる。その場合は、それに必要なシステム対応についても評価する必要がある。

(4) 不純物の影響

通常、プラント使用時に考えられる不純物（保温材から発生する揮発物質等）の検出特性に与える影響等を調べる。これらは、ナトリウムエアロゾルの定量計測（特にS/Nや誤動作評価）等のために必要である。

5.1.2 光伝送特性

レーザー送光及び受光を行う光伝送系の特性を明らかにする必要がある。送光及び受光に最適な光ファイバの選定と伝播特性を評価する。また、レーザーと光ファイバ、光ファイバと分光器との光伝達特性も評価する。さらに、最も影響の大きいと思われる原子化部での光送受特性を最適な構成にする必要がある。これらは、S/N (感度) を向上させるために必要である。

また、システム化を図る上で、多数の位置の漏洩を検出するために複数の光ファイバに光分配及び結合を行う必要があり、それらについても特性を評価する必要がある。

加えて、漏洩検出系を高速炉の1次系にも適用する場合には、光伝送系（特に光ファイバ）には耐放射線性が必要となり、放射線環境下での適用性を評価する必要がある。これまでに、高速炉の供用期間中炉容器検査に用いるイメージファイバとして耐放射線性に優れた光ファイバが開発されており⁽⁴⁾、基本的に同様の技術により、本手法で使用する光ファイバの耐放射線性も向上可能と考えられる。但し、プラント運転中の1次系条件となりため、温度及び放射線量などの雰囲気条件は、より厳しいと想定される。

5.1.3 レーザー耐久性

本システムの構成機器の中で、一番耐久性上問題になると思われるレーザーについて耐久性を評価する必要がある。耐久性は、レーザー種類の選定に加えて使用方法（出力裕度、照射パルス幅及び周期等）の影響もあるので、上記ナトリウム検出特性も勘案して評価する必要がある。

5.1.4 システム特性

最終的にはナトリウム微量漏洩系全体での検出特性を基に適用性を評価する必要がある。

5.1.1～5.1.3の課題について、主に要素試験を通して解決していき、最終的に5.1.4のシステム特性試験にて総合的に適用性を判断することになると考えられる。

5.2 今後の方向

今後の方向としては、5.1に記したように基本的な特性を、主に要素試験を通して得ることで評価していく。研究の進展にあわせて適宜計画等を修正し、最終的に総合システム試験によりナトリウム微量漏洩検出系の高度化が図られると考えられる。

また、エアロゾル挙動については、配管等と保温材の間の空間での挙動が破損形態や雰囲気条件等による違いを含めて詳細に評価できる解析コードを作成し、検出位置でのエアロゾル状態が評価できるようにしていく。解析コードで不足な部分についてエアロゾル挙動に関する試験を行って補うことが必要である。

6. 結 言

FBRプラントのナトリウム微量漏洩検出系の高度化を図るための検討を行い、以下のような結果を得た。

先ず、ナトリウム漏洩検出系の高度化に有効だと思われる項目を、これまでのナトリウム微量漏洩検出系の研究開発の成果を基に検討し、その結果、S/N及び応答性、ナトリウム選択検出性の向上について着目する事とした。

次に、これを実現する手法について文献等を調査及び検討し、微量分析手法の中からレーザーブレイクダウン分光法を選定した。そして、レーザーブレイクダウン分光法について、光ファイバ網による検出部分散配置のシステム適用概念を示した。

最後に、ナトリウム微量漏洩検出手法として新しい手法であるレーザーブレイクダウン分光法のR&Dの課題の抽出と開発の方向を提案した。

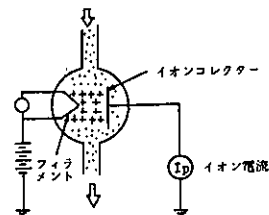
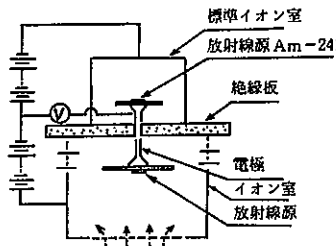
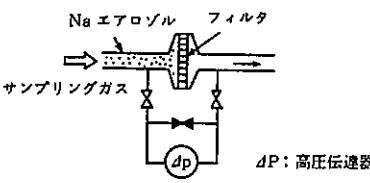
7. 謝 辞

本検討を行うに際し、株式会社東芝、磯子エンジニアリングセンター、動力炉開発部の竹島徳幸氏に有益な助言を頂いた。ここに、深甚なる謝意を表します。

8. 参考文献

- (1) 荒邦章 他：「高速増殖大型炉の設計主要目に関する研究（I） ナトリウム漏洩検出系の検出感度」, PNC SN9410 88-116, (1988)
- (2) 出雲考 他：「高速増殖原型炉もんじゅ総合機能試験報告書 2次冷却系ナトリウム漏えい検出系試験」, PNC PN2410 94-031, (1994)
- (3) 川面博司 他：「機器分析 基礎と応用」第2版, 廣川書店, (1992)
- (4) 不破敬一郎 他：「ICP発光分析」, 南江堂, (1980)
- (5) 日本分析化学会編：「原子スペクトル分析（上）」, 丸善, (1979)
- (6) 日本分析化学会編：「原子スペクトル分析（下）」, 丸善, (1979)
- (7) 長谷文昌 他：「レーザアブレーションICP発光分光分析法に関する文献調査報告」, PNC PN8420 93-014, (1993)
- (8) 佐藤宗一 他：「再処理オフガス中よう素・NO_xのリアルタイム分析法の開発（1）」, PNC ZN8410 91-224, (1991)
- (9) 上原国男 他：「レーザ励起型ナトリウム漏洩検出器の開発」, 日本機械学会通常総会講演会講演論文集, Vol.68 PP430-432, (1991)
- (10) T.R.Loree and L.J.Radziemskie, et. al.: 「Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Time-Integrated Applications」, Plasma Chemistry and Prasma Processing, Vol.1 No.3, (1981)
- (11) D.A.Cremers and L.J.Radziemski: 「Detection of Chlorine and Fluorine in Air by Laser-Induced Breakdown Spectrometry」, Analytical Chemistry, Vol.55 No.8, (1983)
- (12) Kay Niemax and Wolfgang Sdorra: 「Optical emission spectrometry and laser-induced fluorescence of laser produced sample plumes」, Applied Optics, Vol.29 No.33, (1990)
- (13) 国立天文台編：「理科年表 平成9年」, 丸善, (1996)
- (14) 荒 他：「耐熱・耐放射線イメージファイバの開発(5)－総括報告－」, 日本原子力学会「昭63年年会」E36, (1988)

表1. ナトリウム漏洩検出器の原理と用途、特徴

検出器の種類と原理	用途・特徴	
<p>ナトリウムイオン化式検出器 (SID: Sodium Ionization Detector)</p> <p>検出原理を右図に示す。 検出器ハウジング部に導びかれたサンプリングガス中のナトリウムエアロゾルは、高温に保たれたフィラメントにより電離、イオン化され、フィラメントコレクタ間にイオン電流が流れる。このイオン電流を検知することにより微量ナトリウム漏えいを検出する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 本検出器は、不活性ガス雰囲気中のナトリウムエアロゾルの有無を検出するのに適する。 1次冷却系の部屋、機器、配管の保温層間の空間雰囲気の監視に用いる。 検出器感度は、10^{-10} g/ccのナトリウムエアロゾルに対して有意な信号を検出する。 	
<p>放射線イオン化式検出器 (RID: Radiative Ionization Detector)</p> <p>検出原理を右図に示す。 検出器に導びかれたサンプリングガス中のナトリウムエアロゾルは Am-241 によりイオン化されたガスに付着し、外部から電解を加えた電極間に流れる電流が減少する。この電流変化を標準イオン室側との電位差で検知することにより微量ナトリウム漏えいを検出する。 フィルタ (バックアップ用)。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 本検出器は、空気雰囲気中のナトリウムエアロゾルの有無を検出するのに適する。 2次冷却系の機器、配管の保温層間の空間雰囲気の監視に用いる。 検出感度は、10^{-10} g/ccのナトリウムエアロゾルに対して有意な信号を検出する。 	
<p>差圧式検出器 (DPD: Differential Pressure Detector)</p> <p>検出原理を右図に示す。 フィルタ部に導びかれたサンプリングガス中のナトリウムエアロゾルは、フィルタに捕集され、フィルタ上流、下流間の差圧が増大する。この差圧変化を検知することにより微量ナトリウム漏えいを検出する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> フィルタにナトリウムエアロゾルを捕集することを利用して蓄積形の検出器といえる。 不活性ガス雰囲気、空気雰囲気のいずれの雰囲気にも適する。 検出器感度は、フィルタ前後のバックグラウンド差圧の25%増に対して有意な信号を検出する。 フィルタを取りはずし、目視又は分析することにより確実な確認が可能。 	

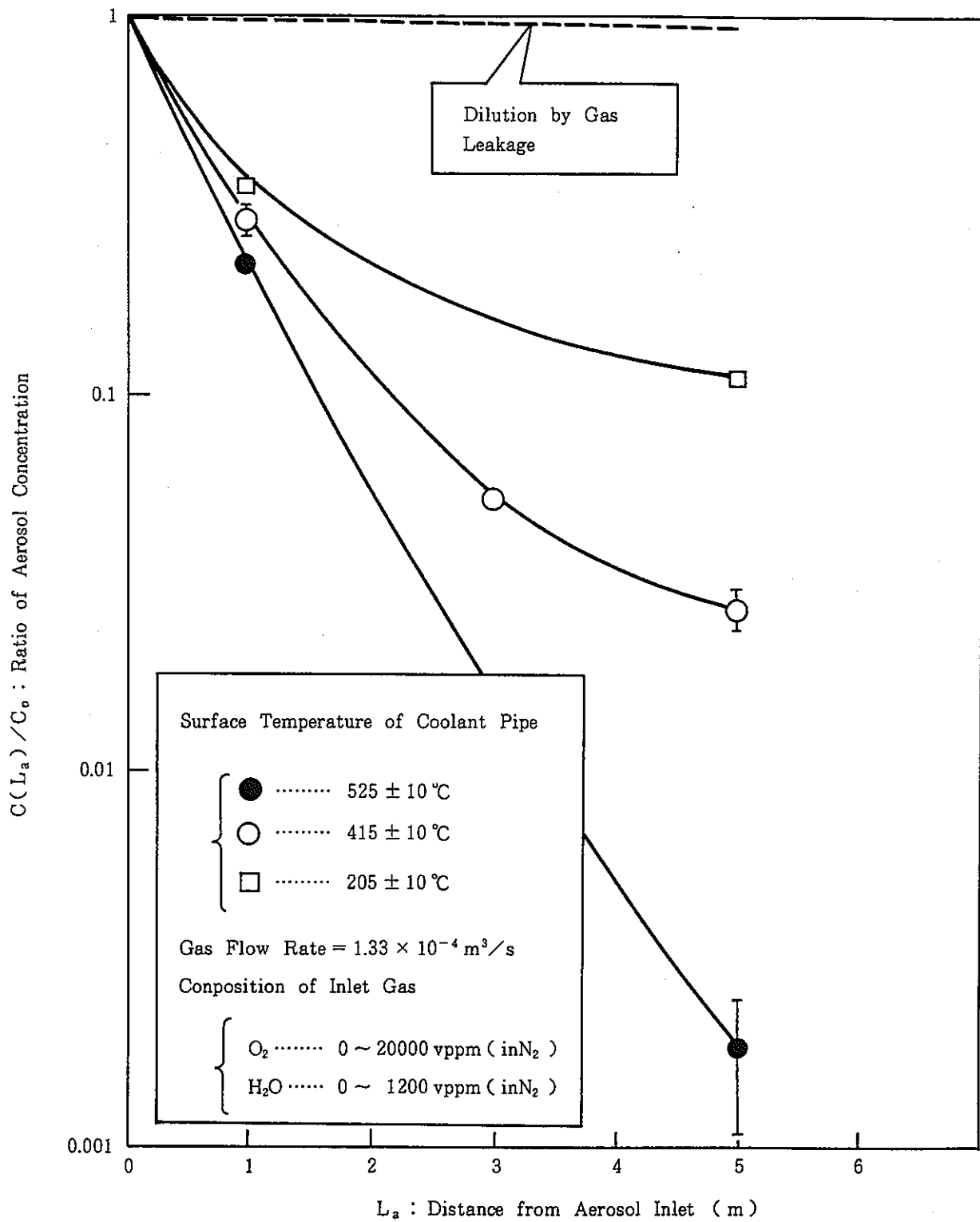


図1. アニュラス部のエアロゾル濃度減衰

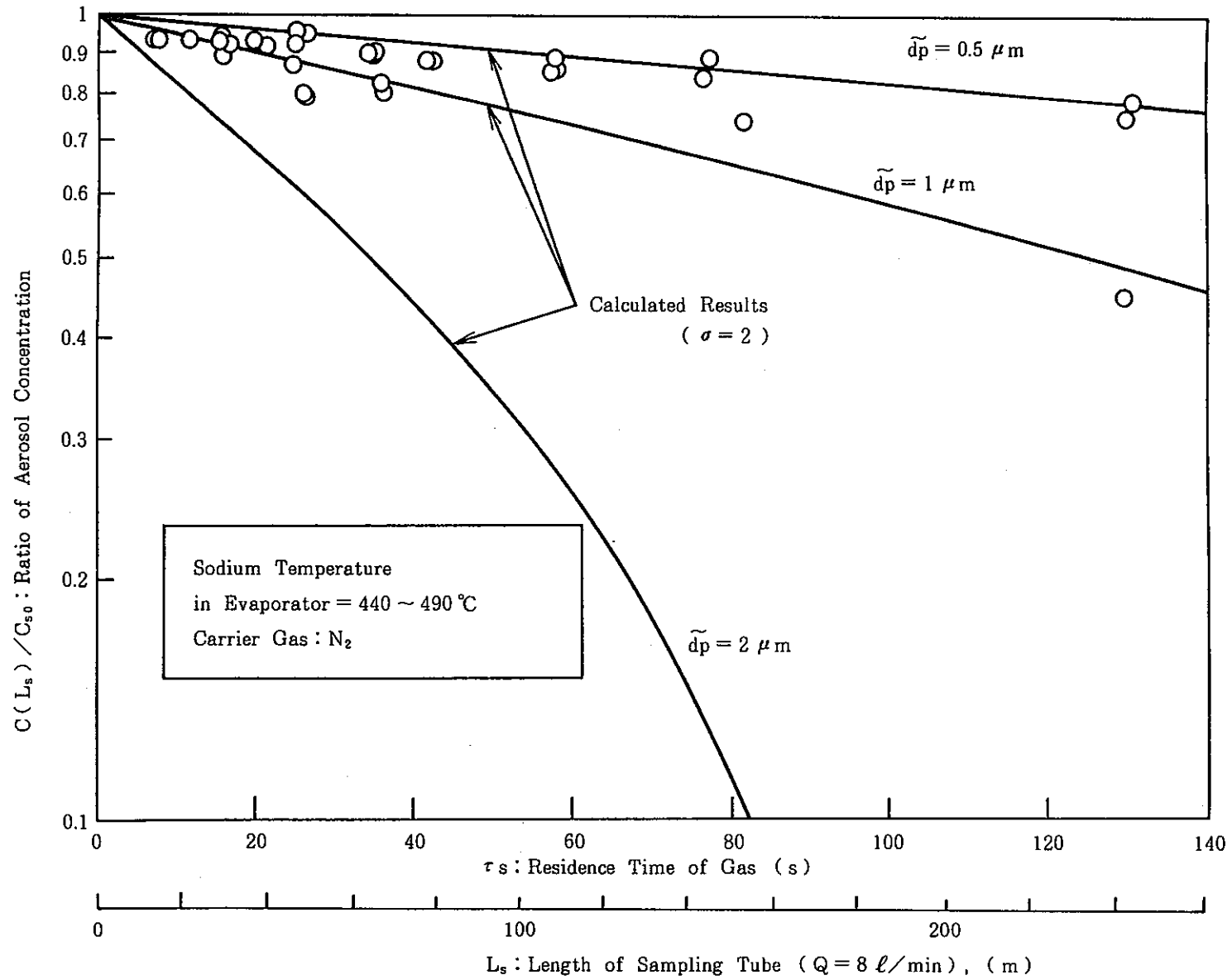
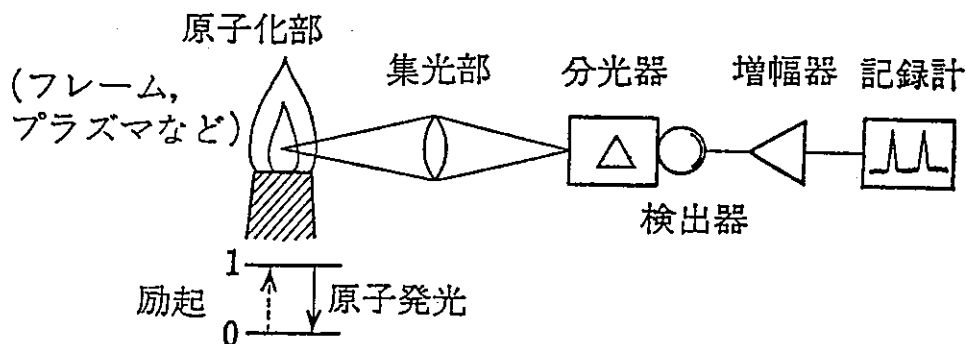
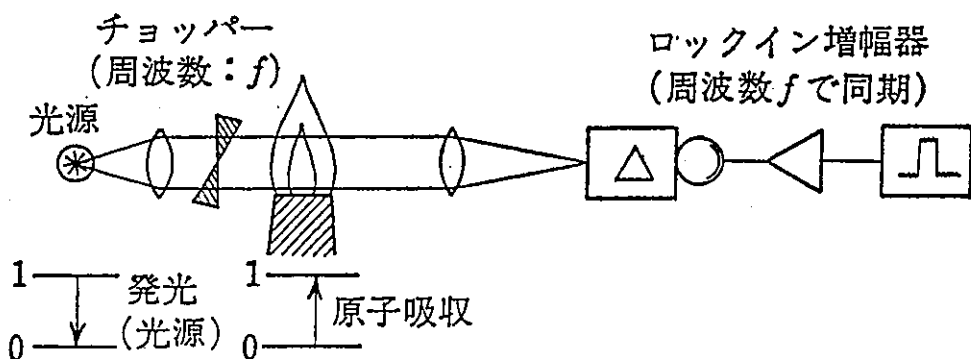


図2. サンプルング配管内のエアロゾル濃度減衰

原子発光分析法



原子吸収分析法



原子けい光分析法

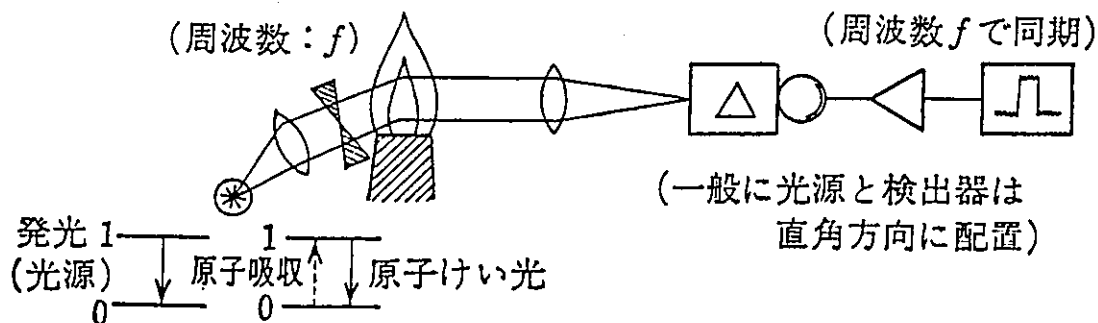
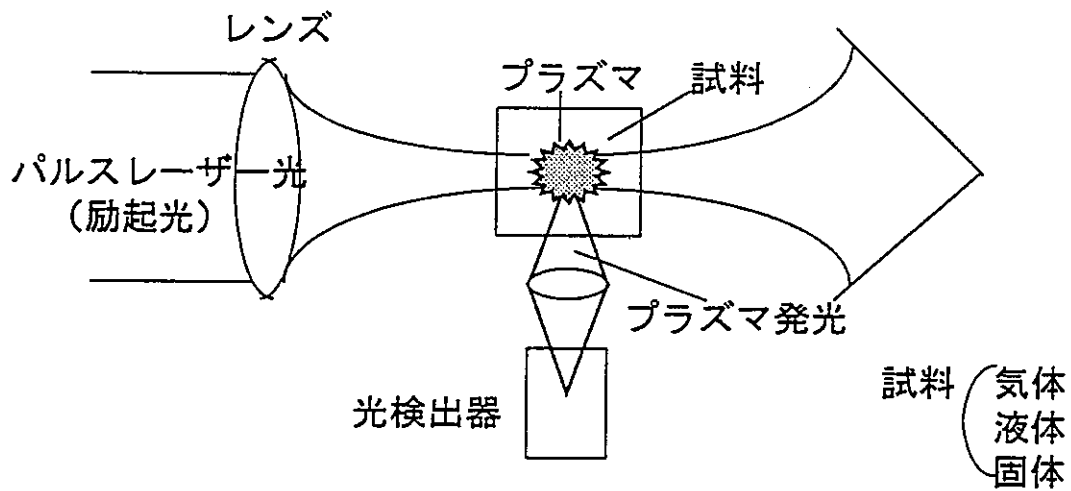
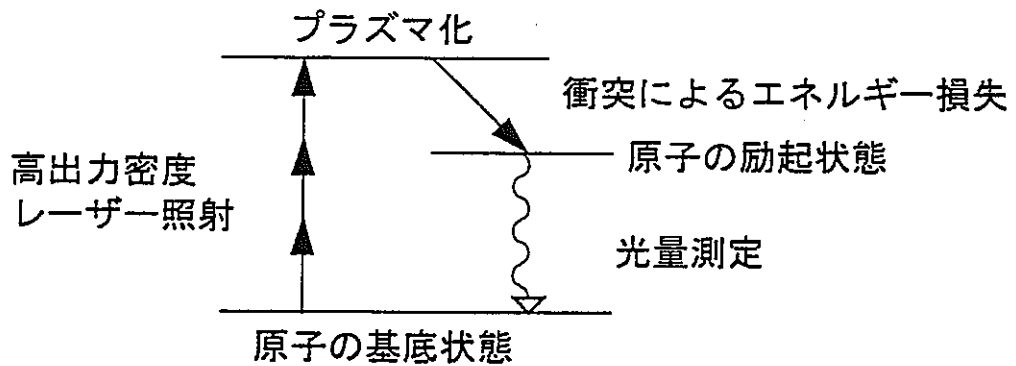


図3. 原子スペクトル分析法の原理図



光反応プロセス



光波長は原子に固有 ➡ 成分同定
光強度 \propto 原子密度 ➡ 定量

図4. レーザーブレイクダウン分光法の原理図

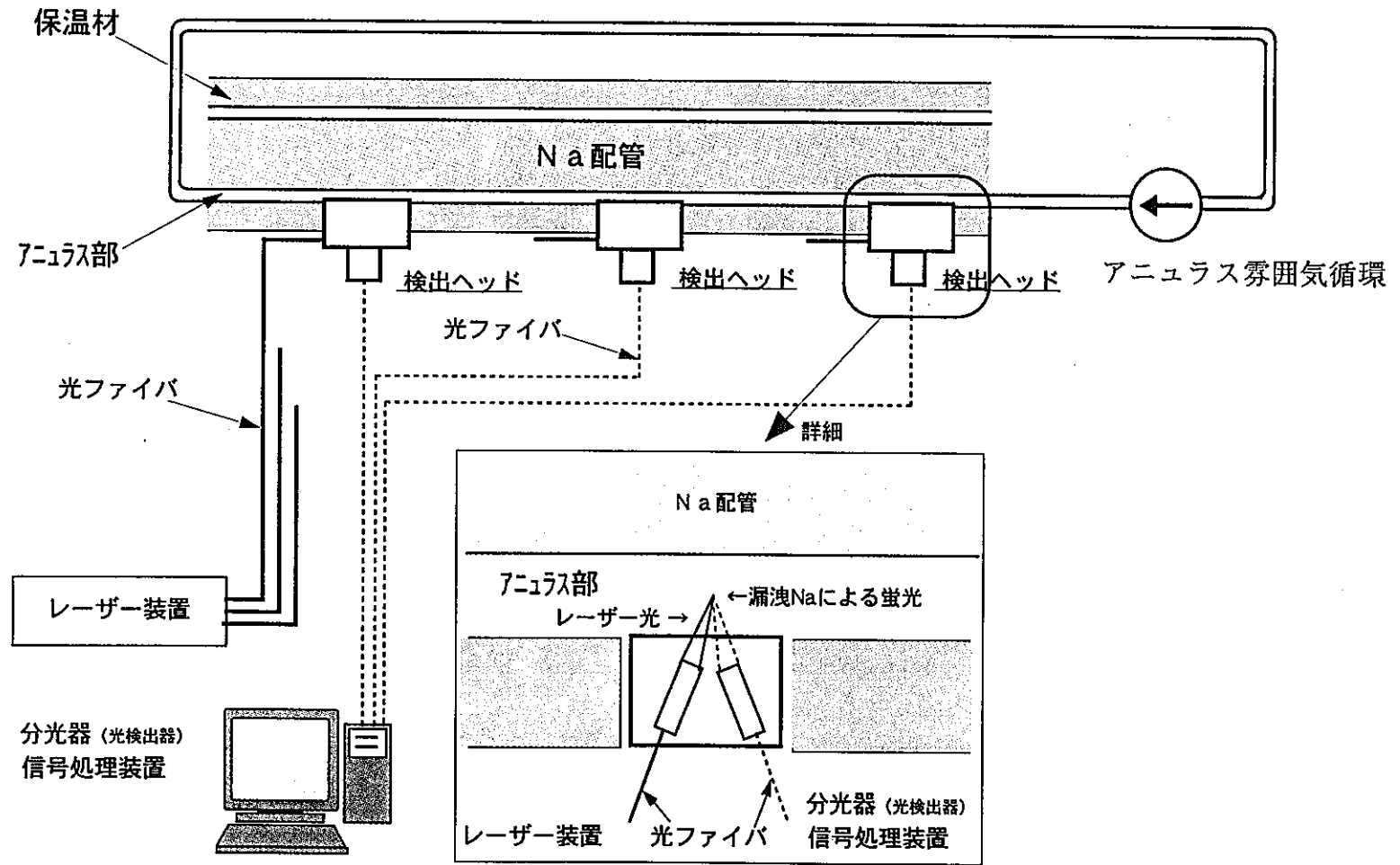


図5. 高度化ナトリウム微小漏洩検出システムの適用概念