

核燃料再処理プラントにおける計装システム

Instrumentation System of Nuclear Fuel Reprocessing Plant

福有 義裕*・立原 富夫**

Yoshihiro Fukuari, Tomio Tachihara

1. 核燃料サイクルと再処理

核燃料（ウラン（U）やプルトニウム（Pu））の核分裂を利用して電力を得る原子力発電は、エネルギー資源の乏しい我国では、その重要性が一層認識されつつある。核燃料を使用して電力を得ようとする場合、地中から採掘された鉱石中のウランはどのような経緯をたどり、どのように姿を変えていくのであろうか。その模様は図-1に示すようにウランのたどる道は一つの閉じた経路をつくっており、これを核燃料サイクルと呼んでいる。それでは核燃料を使用する場合に、石油や石炭を燃焼させる場合と異なって、なぜこのようなサイクルが形成されるのであろうか。それは原子炉に装荷された核燃料（U）が燃焼（核分裂）するにつれて、その中にプルトニウム（Pu-239）などの有用な核分裂性物質が新しく生成してくる。一方、燃料の中に初めから含まれているU-235などの核分裂性物質は、原子炉の中でそのすべてが燃焼しつくすわけではない。核燃料の燃焼が進むにつれて蓄積する核分裂生成物（Fission Product；FP）が炉心内の中性子を吸収して炉の反応の度合いを低下させてしまうので、生成あるいは残存する核分裂性物質はこのFPと燃料内で共存することになる。

核燃料燃焼のこのような特質にもとづいて、ある程度燃焼の進んだ使用済燃料は炉外に取り出して生成したPu、残存する²³⁵U、²³⁸UなどとFPとの相互分離及び精製という再処理操作を施し、得られたPu、Uなどの有用成分を燃料再加工のプロセスに戻してやるという作業が行われることになる。

さて、核燃料サイクルの中で再処理の持つ意味は極めて大きい。それは、エネルギー資源をはじめとして

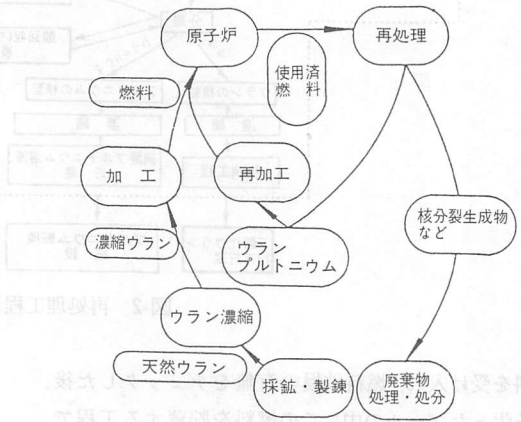


図-1 核燃料サイクル

諸々の資源・技術のナショナリズム化が進む中で、この再処理技術の確立があってはじめて核燃料サイクルが成し遂げられるからである。

2. 再処理工程の概要

使用済燃料の再処理は、核燃料サイクルを確立する上で不可欠であることを前述したが、この再処理の方法は、化学的及び物理的処理形態の違いによって、湿式法、半乾式法、乾式法などに分類される。このうち湿式法が現在の主流であり、なかでもリン酸トリブチル（TBP）による溶媒抽出を中心としたPurex法は、我国初の動力炉・核燃料開発事業団再処理工場（動燃再処理工場）も含め、世界各国の大部分の再処理施設で採用されている。

動燃再処理工場の処理工程は、受入・貯蔵工程、機械処理工程、溶解工程、清澄・調整工程、分離・精製工程、濃縮・脱硝工程、製品貯蔵工程及び各工程から排出される放射性廃棄物の処理工程などからなっており、再処理工程のフローは図-2に示すようになる。

以下に各工程と主な計装システムについて述べる。

(1) 受入・貯蔵工程

燃料容器（カスク）に納められ、搬入された使用済

* 動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所再処理工場工務部 技術課主査

**

課長代理

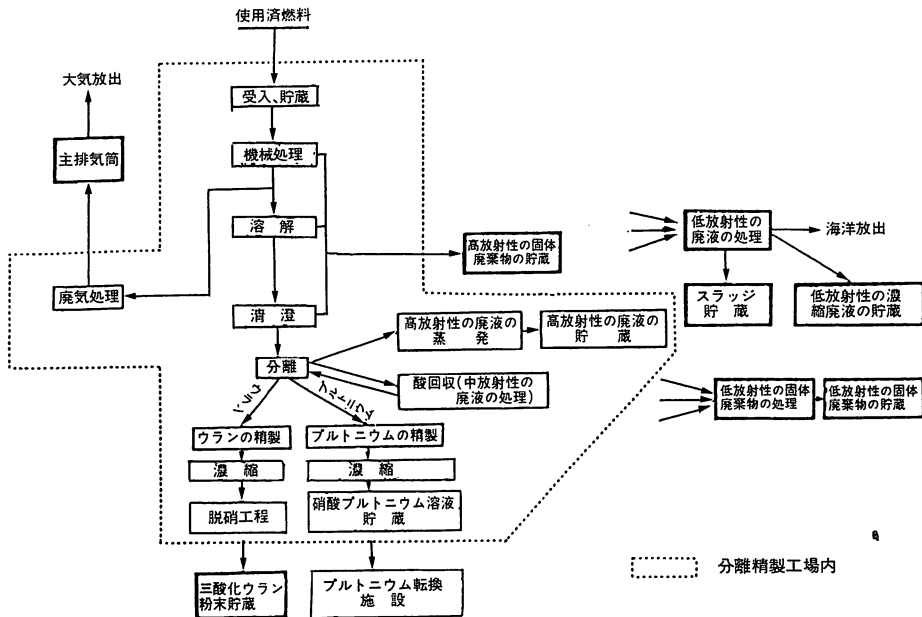


図-2 再処理工程フローシート

燃料を受け入れ、燃料破損の有無をチェックした後、水を張ったプールの中にこの燃料を貯蔵する工程で、カスク冷却水の放射能レベルを測定するインラインモニタなどが設置されている。

(2) 機械処理工程

燃料集合体を長さ3～4cmに機械的に切断し、次の溶解工程での反応がスムーズに進むようにする工程で、一連の操作において完全保持のために前の操作が完全に完了しないと、次の操作が開始できないような順序制御が行われている。

(3) 溶解工程

溶解槽にはいった燃料に硝酸を加えて溶解する工程で、溶解の進行状況は密度計などで把握される。この他、圧力計をはじめとして各種の安全確認を図るための計測器が計置されている。また、被覆中に残存するUを計量するための計測装置が設置されている。

(4) 清澄・調整工程

溶解槽から送られる溶液をウラン濃度・酸濃度を調整すると同時に正確に通過量を計量する。これは核燃料の計量管理で重要な意味を持つ。

(5) 分離・精製工程

この溶液を抽出器（動燃ではミキサセトラを使用している）に入れ、有機溶媒（30%TBP+70%ドデカン混合溶液）によって溶液中のU及びPuを有機相中へ抽出分離し、FPを硝酸溶液中に残す。後半にUとPu

をそれぞれ分離し精製する。

本工程を中心として高放射性溶液の流量を制御するため“DANAIDE（ダネード）”と称する特殊な流量調節器が用いられており、また、抽出状態を把握するために、サンプリング設備の他、各種の放射線計測器によるインラインモニタが設置されている。

(6) 濃縮・脱硝工程

精製されたU、Puはそれぞれ蒸発缶で溶液を濃縮し、Puは硝酸溶液の形で製品とする。Uは流動床型脱硝塔へ送り UO_2 粉末の形で製品とする。

本工程には圧力計や温度計をはじめとして各種の安全を保持するための計測器などが設置されている。

(7) 製品貯蔵工程

濃縮工程から出た製品Pu溶液は、中空円筒状のアンニラーベッセルに貯蔵する。また、脱硝塔を出た UO_2 粉末は専用容器に封入したのち計量し、さらに、パードケージに納められて製品貯蔵所に貯蔵される。

本工程では製品の量を厳密に管理するための計測器をはじめ、各種の計測器が設置されている。

(8) 放射性廃棄物の処理

放射性廃棄物は形状により気体廃棄物、液体廃棄物、固体廃棄物があり、それぞれ処理の方法が異なる。

- 1) 気体廃棄物：溶解槽、蒸発缶、貯槽、燃料せん断装置などからの廃気及び建家換気は、酸吸収、洗浄、ろ過などそ

それぞれの廃気に適した処理を施して安全を確認したのち、大気に放出する。

- 2) 液体廃棄物：各工程から排出される液体廃棄物は性状により、洗浄、蒸発濃縮、化学沈澱などを行い処分する。
- 3) 固体廃棄物：各工程から排出される固体廃棄物は、性状により専用貯蔵庫へ貯蔵するか、コンクリート詰め、焼却などの処理を行い貯蔵する。

これらの工程は、安全保持に対する慎重な計装設備の他は、一般化学工業のそれとあまり変わらない計測器が設置されている。

3. プロセス計装の基本方針

再処理工程では使用済燃料を開封状態で扱うため、安全に対する配慮が極めて重要視され、一般の化学工業で要求される工程管理の他に、臨界事故防止、放射線被ばくの防止など各種の安全管理及び、核燃料の移動量を正確に把握するための計量管理が、計装システムに直接・間接に課せられる。このことから、計装システム及びシステムを構成する単体機器には、信頼性、保守性、精度などの面で極めてきびしい条件が要求されることになり、計装システムの設計、設置を通じて慎重かつ綿密なチェックが常に要求されることとなる。このような条件をできるだけ満たすため、計装システムの設計に当たっては、次のような点を考慮する必要がある。

(1) 信頼度を高めるため、材質を吟味し耐食性のある使用実績に裏打ちされた長寿命の部材、及び機器の品質管理を厳密に行って採用する。材質は耐熱、耐食性といった項目の他に、耐放射線の面からも合格するものが選択されなければならない。

(2) アナログ信号測定系と、安全確認のための警報系を、それぞれ独立に設置する。さらにプロセスが危険な状態を引き起こす可能性のあるときに、他に優先してプロセスの安全保持動作が自動的に行われるようにする。ただし、この自動安全保持動作が、計器の誤動作や故障のために引き起こされることのないよう、単体計器の信頼度を高めることはもちろんのこと、必要に応じて計器故障を確認するための論理回路を構成する必要がある。

(3) 万一計装システムの動力源である圧空系、電源などが停止した場合でも、プロセスは安全な状態を

保持できるよう動作する系とする。

(4) 工程管理及び安全管理が効率的に行えるよう信号を集中化した中央管理方式とする。

(5) プロセス機器と差圧伝送器などの設置位置は10数mの高低差をつけ、さらに信号導圧管に常時エアパージする事により、放射性物質の逆流による汚染を防止する。また、万が一起こった場合の汚染の除去のため導圧管に除染タップを設ける。

(6) 運転中でも、できるだけ容易に、効率的に点検・保守が行えるように、たとえば伝送器を放射線から遮蔽された室内に納めたり、計器類をできるだけ一カ所に集めて設置する。

(7) 建設時においては、十分な技術レベルの技術員による入念な品質管理を行い、設計当初に計画した計装システムの質を保持する。

4. 各種の計測制御設備¹⁾

動燃再処理工場の計装システムに使用している計器は、昭和40年代の設計であるため、空気式計器を主体とし、用途に応じて電気式計器を併用している。高放射性溶液のプロセスの液位測定及び密度測定にはエアパージ方式を、流量測定には、“DANAIDE”と称する特殊な流量計を、界面測定には電極を、温度測定には熱電対を用いている。

また、プロセス中の放射性物質濃度を迅速に測定するために、 α 線、 γ 線、 n 線等の測定を利用したインラインモニタを設置している。その他ユーティリティ設備等の計測制御設備は一般化学工業の計測制御方式と同様である。

4.1 代表的な計測方式の種類

計測制御設備で使用している計測方式の種類を表-1に示す。

4.2 代表的な計測方式の例

計測制御設備で使用されている計測方式の代表的な例を以下に示す。

4.2.1 槽類の液位及び密度測定

液位及び密度測定は、一般的なエアパージ方式を用いている。この方式はセル内の槽類に2本のエアパージ用の導圧管を設置するだけであり、検出部には可動部を持たないため保守性にすぐれ、高放射性溶液の測定に適している。

導圧管は高放射性溶液に接しているため、万一の事故により、これらの溶液が導圧管を通して計装ラインを逆流する可能性が考えられるため、差圧伝送器は十

表 1 代表的な計測方式の種類

種類	計測方式	使用場所(計測対象プロセス)
液面計	エアバージ	槽類(放射性溶液)
	浮子	槽類(非放射性溶液)
	電極	槽類(放射性溶液)
	ゲージガラス	槽類(非放射性溶液)
界面計	電極	抽出器(放射性溶液)
流量計	ダネード	配管類(放射性溶液)
	オリフィス	配管類(放射性, 非放射性溶液)
	ロータメータ	配管類(非放射性溶液)
	タービン流量計	配管類(低放射性溶液)
	容積式流量計	配管類(非放射性溶液)
	電極	配管類(放射性溶液)
密度計	エアバージ	槽類(放射性溶液)
圧力計	エアバージ	槽類(放射性気体)
	ブルドン管	槽類, 配管類(非放射性気体)
	マノメータ	建家, 配管類(放射性, 非放射性気体)
差圧計	エアバージ	塔, 槽類(放射性気体)
	ダイヤフラム式	換気系のフィルタ類
温度計	熱電対	槽類(放射性溶液)
	膨張式温度計	槽類, 配管類, 換気系
	バイメタル形	換気系
pH計	ガラス電極	槽類, 配管類(放射性, 非放射性溶液)
電導度計	導電率電極形, 電磁形	槽類, 配管類(放射性溶液)
酸素濃度計	磁気酸素分析計	焼却炉廃気
窒素酸化物	紫外線吸収式	換気系
水素濃度計	接触燃焼式	換気系
湿度計	フィルムエレメント温度計	換気系
	ナイロンエレメント湿度計	換気系
回転速度計	タコメータ	定量ポンプ
地震器	加速度地震計	分離精製工場の地下
工程管理用放射線モニタ	アルファ線モニタ	抽出器, 配管類(放射性溶液)
	(Zns(Ag)シンチレータ)	抽出器(放射性溶液)
	中性子線モニタ	抽出器, 配管類(放射性溶液)
	(¹⁰ Bフิชシオンチェンバー, BF ₃ カウンタ)	抽出器, 配管類(放射性溶液)
	ガンマ線モニタ	(電離箱, GM管, NaI(Tl),

分に高い位置に設置している。また、導圧管にはステンレス鋼を使用し、希硝酸及び水を注入して除染を行えるようにしている。この方式の概略図を図-3及び図-4に示す。

4.2.2 流量測定及び調節

高放射性溶液の流量測定において一般的に使われているオリフィス流量計などは、保守及び溶液の漏れなどを考慮するとあまり望ましい方法ではない。

本工場ではフランス、サンゴバン社によって開発された“DANAIDE”と称する流量調節器を用いている。この機構は、オリフィスとメタリングチューブを組み合わせたもので、オリフィス部の流れによる差圧を、メタリングチューブ中のヘッド差として取り出し、このヘッドをパージ式液位測定の方法で検出し流量を測定している。流量調節は2つの調節弁を適度に調節して“DANAIDE”内の減圧度を調節する。この概略図を図-5に示す。

4.2.3 抽出器の界面調節

抽出器の界面調節も流量調節と同様にフランス、サ

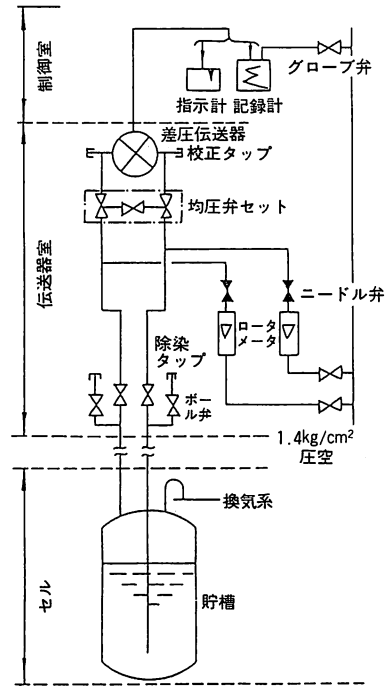


図-3 液位測定

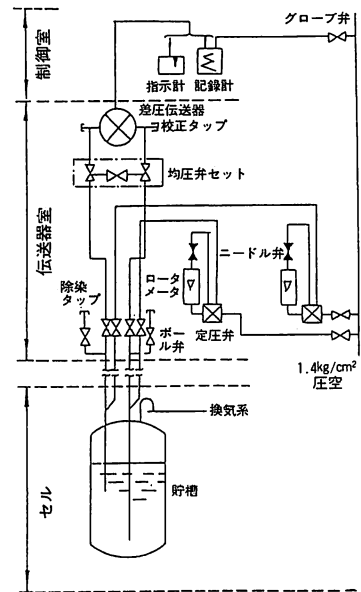


図-4 密度測定

ンゴバン社で開発された調節器を使用している。抽出器はミキサ部とセトラ部に分かれていて、セトラ部から出た溶液は中央の堰を越えて次のミキサ部にはいる。この堰を越えて流れる溶液を堰室の減圧度を当該調節器により、調節して界面調節を行っている。この概略

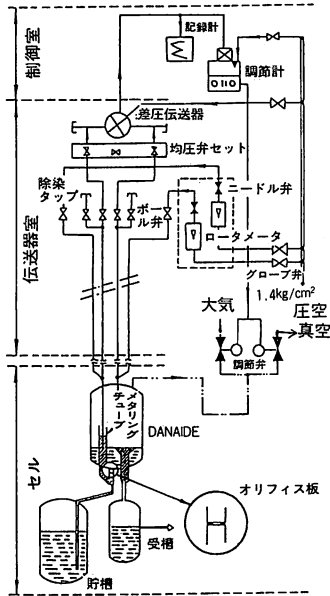


図-5 流量調節

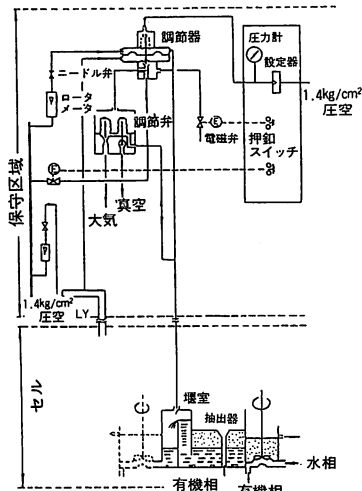


図-6 界面調節

図を図-6に示す。

4.2.4 γ 線インラインモニタ

プロセス溶液に含まれている核分裂生成物の濃度測定に γ 線インラインモニタを設置している。測定はセル内の γ 線の影響を避けるために、セル外の遮蔽セルまで溶液を引き上げて測定する。溶液はコニックポットの下部から入り、上部からオーバーフローさせ測定距離を一定に保ちながら、NaI (Tl) シンチレーション検出器などで測定する。この概略図を図-7に示す。

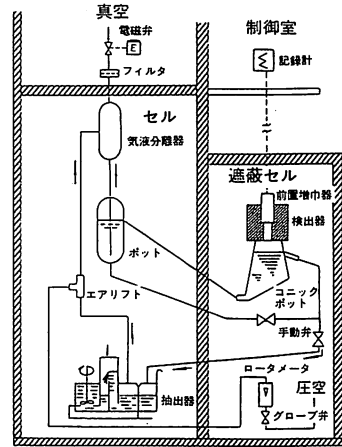
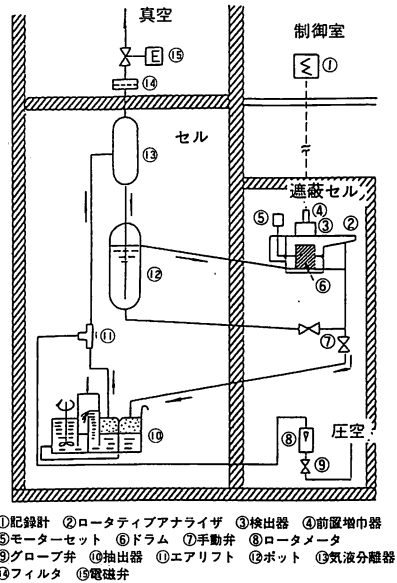


図-7 γ 線インラインモニタ



- ①記録計 ②ロータティブアナライザ ③検出器 ④前置増巾器
- ⑤モーターセット ⑥ドラム ⑦手動弁 ⑧ロータメータ
- ⑨グループ弁 ⑩抽出器 ⑪エアリフト ⑫ポット ⑬気液分離器
- ⑭フィルタ ⑮電磁弁

図-8 α 線インラインモニタ

4.2.5 α 線インラインモニタ

微量のプルトニウムを検出する必要のある箇所には α 線インラインモニタを設置している。 α 線インラインモニタはプルトニウムから放出する α 線を測定する。 γ 線インラインモニタと同様にセル内の γ 線の影響を避けるために、セル外の遮蔽セルまで溶液を引き上げて測定している。溶液はロータティブアナライザの下部を流し、液位を一定に保ちながらドラムを回転させ、ドラムに薄い液膜を作り、この膜に含まれている微量のプルトニウムによる α 線をZnS (Ag) シンチレーション検出器で測定している。この概略図を図-8に示す。

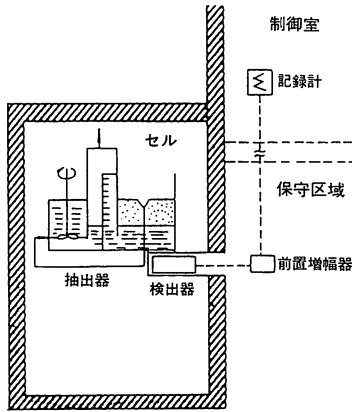


図-9 n線インラインモニタ

4.2.6 n線インラインモニタ

n線インラインモニタは主として抽出器内などの微量のプルトニウム測定に用いている。溶液中のプルトニウムは α 線を放出し、溶液中で(α, n)反応により中性子を放出する他、自発核分裂により中性子を放出する。これらのn線がプルトニウムの濃度に比例することを利用して、プルトニウムの濃度を測定する。 γ 線の影響を考慮して γ 線の強い場所にはウランフィッシュンチェンバ、 γ 線の弱い場所ではBF₃管を用いている。この概略図を図-9に示す。

4.2.7 放射能漏れ検出用としてのインラインモニタ

再処理工程は前述したように、受け入れ、貯蔵工程から始まり、放射性廃棄物の処理工程までの主要な工程で構成されている。これらの設備は優れた耐食性を要求されるので、材料の選定はもちろんのこと、極めて厳しい条件下での品質管理を経て製作されているが、

万一の場合を考慮して各工程で使用する、蒸気、温水、冷却水等のもどりラインに γ 線インラインモニタや α 線インラインモニタを設け、機器の腐食故障等を早期に検知できるようにしている。また、これらには緊急度に応じて自動安全保持機能を付加し、ある設定値に到達すると自動的に緊急停止できるようにしている。この概略図を図-10に示す。

おわりに

以上、核燃料サイクルにおける再処理と再処理工程における計装について概略を述べた。前述の通り再処理プラントは、基本的には一般の化学プラントとあまり変わらない。計装は言わばプラントの神経で、極めて重要な設備であり、再処理プラントにおいては核燃料を取り扱うという特徴があり、核燃料の臨界、放射線による被ばくなど安全面での配慮が必要となる。

再処理技術は我国でも20年近い経験があるが、技術は常に日進月歩でAIコンピュータといったような新しい技術を導入することによって²⁾、より安定、安全なプラントにする必要がある。特に下北に大型再処理プラントが進捗している現在、経済性も考慮した計装システムの開発が今後とも必要であり、我々計装技術者の抱える問題も多い。メーカー及び関係者各位の一層のご支援を切にお願いする次第である。

参考文献

- 1) 立原富夫, 竹内 仁; 核燃料再処理工程における計装システム, 計装, Vol. 18, No. 2 (1975), 28~34
- 2) 新谷貞夫; 東海再処理工場における技術開発, 原子力工業, 第34巻, 第2号 (1988), 11~19

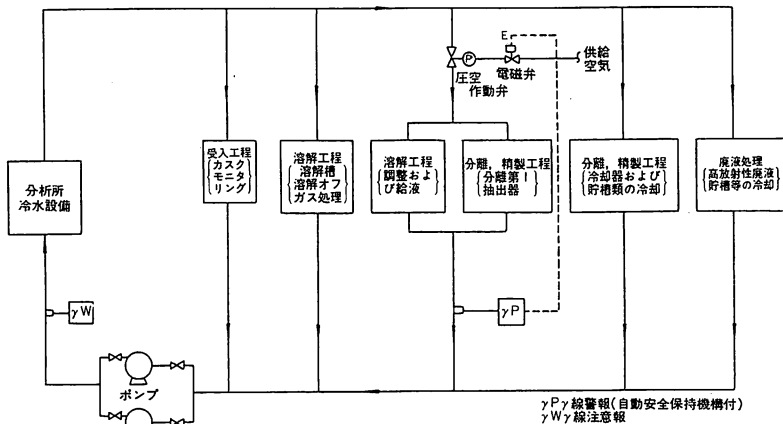


図-10 放射線漏れ検出用インラインモニタ (代表例)