UDC 621.039.548:621.039.587

原子力

ATR 用破損燃料検出装置の開発

Research and Development of Failed Fuel Detection System for Advanced Thermal Reactor

中野 誠* Makoto Nakano
金子 能成* Yoshinari Kaneko

I. 概要

計画中も含め現在ある原子力発電所で使用される核燃料は，通常被覆管の中に封じ込められており，核燃料が燃焼した時に出る核分裂生成物（以降ＦＰと略す）を外部に出さぬようになっている．しかし，この被覆管が破損し，ＦＰが漏れるとＦＰや核燃料破片の大量放出のおそれがある．しかし一般に二酸化ウランを燃料とした軽水炉，重水炉，改良型ガス冷却炉では燃料被覆管が破損しても二酸化ウランの冷却材に対する安定性が高いため，大きな事故に発展するおそれはないが，[1] 一次系が汚染されて保守点検の際に問題を残すとともに，直接サイクルの場合タービン・オフガスから大気中にＦＰが放出され環境を汚染するおそれもある．したがって，すべての原子力発電所は燃料被覆管の破損を早い時期に検出することと，その位置を探すためのなんらかの装置を備えている。

動燃事業団では，新型転換炉開発の一環として．原子炉稼動時に燃料破損の有無および破損チャネル位置の検出を行なう破損燃料検出装置の開発を進めている．その主な理由は(1)この原子炉が圧力管型であって，各燃料要素を冷却する冷却材はチャネルごとに独立しており，サンプリング点さえ考慮すれば各チャネルの冷却材は混合することなく，破損燃料位置の検出が可能であること，(2)出力運転中の燃料交換が可能なように設計されていることである．したがって破損燃料が検出された場合，稼動率を下げることなく燃料を交換することが可能となる。

この装置の開発にあたっては，現在建設に入った新型転換炉原型炉「ふげん」を当面の適用対象とした．この原子炉は軽水冷却型の発電用原子炉であって，224チャネルの圧力管の中にクラスタ状の燃料が収納されており，この圧力管の下方から約70気圧の高温高圧水が上昇し，燃料を冷却して二相流となり原子炉を出て蒸気ドラムへ入る．蒸気ドラムから蒸気はタービンへ，高温高圧水は再循環ポンプによって再び原子炉入口へと戻る。

破損燃料の検出には数多くの方法が考えられているが，本開発の対象とした方式はＦＰから放出される希ガスのうち２回ベータ崩壊する核種に着目したプレシピテーション法[2]であり，高温高圧二相流を原子炉出口から各チャネルごとに採取し，燃料破損にともなってこの二相流中に混在するＦＰのうち，希ガスをフラッシュタンクによってサンプリング水より分離しプレシピテータによって検知して燃料破損の有無を検出するものである。

II. 設計の考え方

現在原子力発電所で利用されている破損燃料検出方法は冷却材中に放出されたＦＰに依存していて，他の方法は実用性や感度の面で使用されていない．ＦＰの検出としてはガンマ線や遅発中性子の放射能を検出する方法，プレシピテーション法などがあるが，どの検出系でも表面汚染や被覆材の不純物としてのウラニウムがバック・グランドとなる．しかし重要なことはその他のバック・グランド放射能と比較し信号が明らかに異なっていることが必要なのである。

プレシピテーション法は，ＦＰから直接またはＦＰの娘核からできたガス状のクリプトン(Kr)，キセノン(Xe)がベータ崩壊して固体のセシウム(Cs)，ルビジウム(Rb)になり，さらにベータ崩壊する事実を利用したものであり，プラスに帯電した固体の娘核はプレシピテーション・チェンバ内のマイナスに帯電した電極に沈着し，その後この電極から放出されるベータ線を検出して燃料の破損を知る．この方法はバック・グランドが低くおさえることができるため感度が高くかつ検出が短くてすむ特長を持っている．また原電１号炉・東海発電所における経験をも考慮してこの方法が採用された。

プレシピテータはガス炉で開発された技術で検出放射線がベータ線であること，沈着の際の印加電圧の関係もあってガス体の中でのみ使用が可能である．したがって

* 原子力技術部

サンプリングした水中より希ガスをいかにしてガス系に捕集するかが問題となる．この方法として通常スクラバと呼ばれるものがある．これは水を傾斜板の上に流し，下方から捕集ガスを送り込んで水中の希ガスをこの捕集ガス中に取り込む方法[3]である．これは常温常圧に近い原子炉の場合であって，高温高圧の冷却水ではそのまま使用するわけにはいかない．スクラバを利用する場合に傾斜板を流れる水をキャリア・ガスで泡立たせると希ガスの捕集効率が上昇するという情報[4]や，原子炉格納器内に設置される機器は保守の面で制約があることから特に高い信頼性が要求されるため，二相流系のシステムをできるだけ簡素化し，かつ短半減期の放射能を数多く集めることが可能なように，サンプリング点から検出端までの放射能の通過時間を短縮させるという基本方針に基づいて，フラッシュ・タンクを考案した。

フラッシュ・タンク上流のサンプル水温度が，タンク内圧における飽和蒸気温度より高い場合，フラッシュ・タンクノズルから放出されたサンプル水は，すべてフラッシュされる．高圧ではガスの溶解度は高く，これを低圧の容器内にフラッシュさせると溶解度が低下するため，希ガスの低圧における溶解度以上の分は，もはや溶解し得ず，初期よりサンプル水中に混在していた希ガスとともに容器内に解放され，同時に系を流れるキャリア・ガスによって捕集され，クーラ，脱湿器を経て検出端へと移送される。

検出放射能として長い半減期の希ガスは一次系を何回か循環する可能性があって位置ぎめのための報情源としては精度が悪く，またキャリア・ガス系が閉回路の場合サンプリングした放射能が蓄積してバック・グランドを高め，分解能を悪くする．他方短半減期の放射能は信号が大きく，かつその結果残留放射能の影響が少ない．したがってサンプリング点より検出端までの希ガスの通過時間はできるだけ短い方が良いわけである。

最後に系統の概略を説明する．サンプリングした二相流はサンプル・クーラ，絞りをとおってフラッシュ・タンクでフラッシュし，同時に送り込まれたキャリア・ガスによって希ガスを捕集してクーラ，脱湿器を経てプレシピテータに入る．プレシピテータを出たキャリア・ガスはコンプレッサによりヘリウム・タンクに送られ一時貯蔵され残留放射能の減衰を待って再使用される。

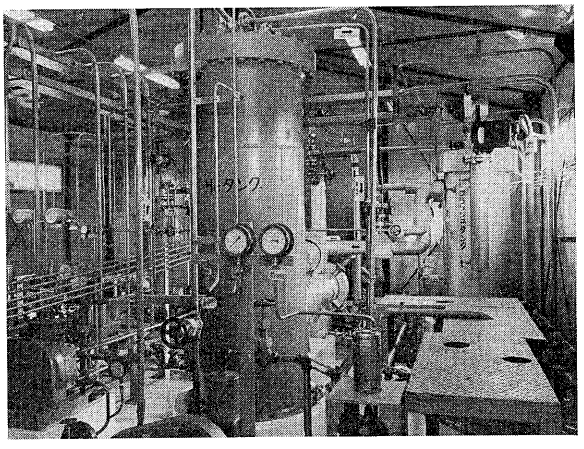
III. 試験装置試作および開発試験

新型転換炉のような軽水冷却炉において破損燃料検出装置としてプレシピテーション方式を採用したのは例がなく，その開発にあたっては原型炉「ふげん」と同等の仕様で試験装置を試作し，模擬ループを構成して諸試験を実施し，実機製作のためのデータを得ること，特に高温高圧の二相流中より放射性希ガスの分離効率を測定し，実機における実用性を実証することが必要である。

試験装置試作ならびに開発試験は上記の主旨により動力炉核燃料開発事業団より受注，受託して実施したものである。

1. 試験装置

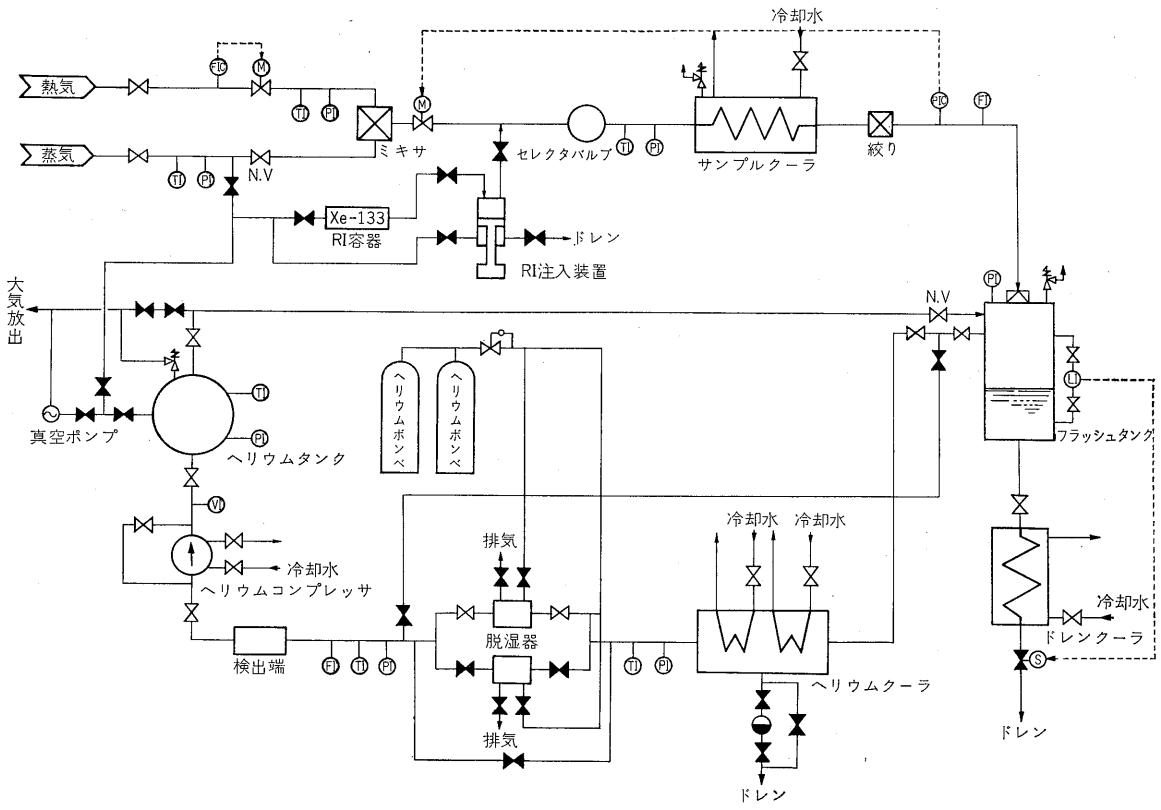
この装置はセレクタバルブ以降の系統を原型炉「ふげん」に模擬しており，分離効率測定用の放射性希ガスを系統に注入するための RI 注入系が付設されている（第1図参照)。



第1図　試験装置
Fig. 1.　Test rig

系統はフラッシュタンクまでの二相流系統と，それ以降のキャリアガス系統に大別される（第2図にフローシートを示す)。

一次冷却材と同等の二相流はおのおの単独で供給される蒸気•熱水をミキサで混合して作られる．二相流定格は実機とほぼ同等とすることとし，圧力 72.5 kg/cm²•g，温度286℃，流量 400 kg/h，蒸気重量比10%とした．ミキサで作られた二相流はセレクタバルブを経てサンプルクーラに入る．セレクタバルブは各燃料チャネルからのサンプリング水を順次選択して1チャネルずつ検出系に流すためのロータリバルブであり，1基のセレクタバルブは20本のサンプリング配管を切換えることができる．この試験装置においては，ポート切換えによる系統への影響，耐久性などを確認するために設置された．サンプルクーラに入った二相流は 175℃ 以下の温水に変えられ，絞りによって減圧された後，ノズルをとおってフラッシュタンク内に放出され蒸気と水になる．フラッシュタンクには放出の際の衝撃を緩和するために内筒およびバッフルが設けられている．水はフラッシュタンク内にたまり，タンクに取り付けられている水位計の信号により電磁弁が開閉し，ドレンクーラをとおして排出される．一方蒸気は，あらかじめ封入されているキャリアガスとともにキャリアガス系へ送られる。



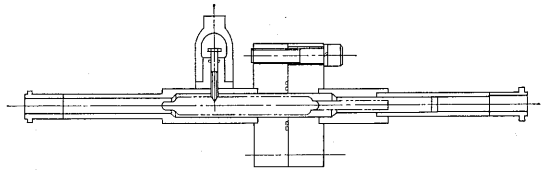
第2図　破損燃料検出試験装置フロシート
Fig. 2.　Flow sheet of F.F.D test rig

キャリアガスは化学的に不活性でかつ放射化しにくいヘリウムガスを採用した．キャリアガス系はフラッシュタンク・ヘリウムクーラ，脱湿器，希ガス検出端，ヘリウムコンプレッサおよびヘリウムタンクよりなり，閉回路を構成する．ヘリウムガスはヘリウムコンプレッサによりこの閉回路を循環する．キャリアガス系の定格はフラッシュタンク内圧力 2 kg/cm²•g，ヘリウムガス流量 5.6 Nm³/h である．フラッシュタンクを出た蒸気およびヘリウムガスはヘリウムクーラに入り，ここで大部分の蒸気が凝縮して水となりドレントラップをとおして排出される．ヘリウムクーラを出たヘリウムガスは脱湿器に入り，クーラでとれなかった水分はほぼ100％除去される．脱湿器出口の湿度は 500 ppm 以下を目標としている．吸着剤には活性アルミナを使用した．脱湿器を出たヘリウムガスは希ガス検出端を通過後，ヘリウムコンプレッサによってヘリウムタンクに送られ再びフラッシュタンクに戻る。

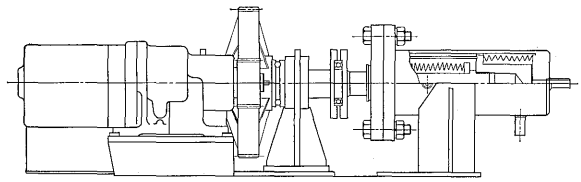
RI 注入系はRI 容器およびRI 注入装置よりなる．RI 容器は中央にフランジ部のある円筒状の容器で，入口側に希ガスアンプル破壊用のねじ部が設けられている（第3図参照）．RI 注入装置はシリンダ，ピストン，ピストンに溶接されたベローズおよび駆動部よりなる押し込み型である（第4図参照）．希ガスは半減期，入手期間などから Xe-133 ガスに決定した．Xe-133 ガスはパイレックスガラス製のアンプルに封入されている．このガラスアンプルを RI 容器に入れ，系統を真空引きした後，ねじでアンプルを破壊し，蒸気を導いて Xe ガスを RI 注入装置のベローズ内に送り込み，駆動装置を作動させてセレクタバルブ手前の二相流中に注入する．注入された希ガスは二相流とともに系統を流れ，フラッシュタンクにおいてヘリウム側に移行し，ヘリウムとともにキャリアガス系を循環する．試験終了後，希ガスはヘリウムとともに活性炭フィルタをとおって排気塔より大気へ放出される。

希ガスの放射能測定は，実機においてはプレシピテータを使用するが，非常に高価であるため，試験装置ではシンチレーションカウンタで代用している。

この試験装置は放射性希ガスおよびヘリウムガスを使用するので，配管，機器の接続部はできるだけ溶接接続



第3図　RI容器
Fig. 3.　Radio isotope container



第4図　RI注入装置
Fig. 4.　Radio isotope injection gear

を採用し，キャリアガス系のバルブについてはベローズバルブまたはダイアフラムバルブを採用して系統外への漏洩を少なくしている．また排気塔にはブロワを設けて，希ガス放出の際空気で充分希釈して大気へ放出するよう計画されている．試験装置建屋には2個の換気扇が設けられ，試験中常時室内の換気を行なう。

試験装置は46年5月より動燃事業団大洗工学センターのCTL（コンポーネント・テスト・ループ）敷地内に建設を開始し，8月に完成した。

2. 開 発 試 験

開発試験はつぎの三段階にわけて実施した。

1) 系 統 試 験

二相流系統およびキャリアガス系統について安定な運転が可能であることを確認する。

2) 性 能 試 験

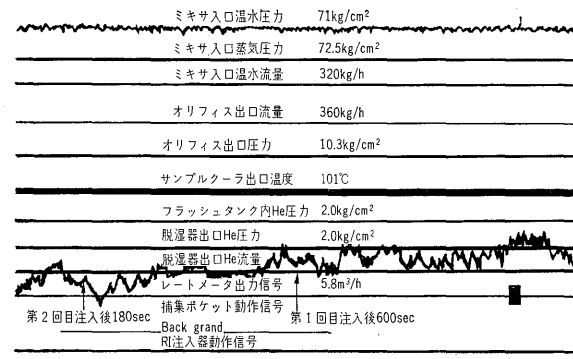
二相流中へ放射性希ガスを注入し，希ガス検出端にて放射能を測定してフラッシュタンクにおける希ガスの分離効率を求める。

3) 耐 久 試 験

二相流による配管および機器内面の腐食状態などを調査する。

系統試験は46年9月下旬から10日間に渡って，各系統単独運転および総合組合せ運転試験を行ない．ほぼ安定した運転結果が得られ，プレシピテータ流入条件（圧力2 kg/cm²•g，温度40℃）が満足されることを確認した．組合せ運転中にセレクタバルブを駆動して，ポートの切換えによる系統への影響を調査したが特に変化は見られなかった．これはポートの移動による流れの停止時間が短かく，すぐ次のポートとのオーバラップが始まるためと思われる。

性能試験はパラメータとして二相流中の蒸気量の比率を変えた場合，フラッシュタンク入口温度をフラッシュ内圧における飽和温度以下にした場合などを選んで行なった．二相流中の蒸気量をパラメータとしたのは，実機において出力変化があり蒸気量が変動した場合にRI分離効率に影響があるかどうかを知るためであり，フラッシュタンク入口における温度変化は，タンク入口温度によるRI分離効率の影響を調べサンプルクーラ出口温度

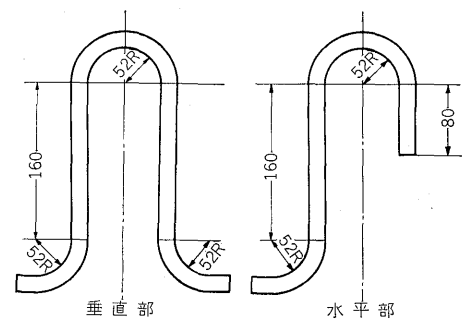


第5図　性能試験（第5回）オシログラム
Fig. 5.　Oscillogram of performance test

設定の指針とするためのものである。

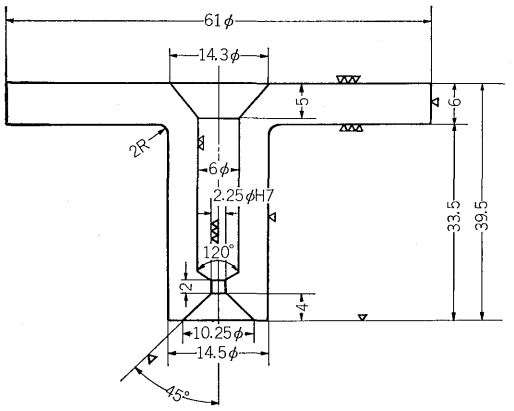
試験の結果，二相流中の蒸気量を変えた場合でも60%以上の分離効率であった．またフラッシュタンク入口の温度変化による分離効率への影響はなかった．これにより実機におけるサンプルクーラの設計裕度が増し，系統制御上も有利となった．しかしこの性能試験において希ガスの検出端への到達時間が目標値よりも大幅に遅れた．この原因が脱湿器にあることが脱湿器バイパス試験により判明した．この時間遅れについての評価はRI検出器を決定する際に重要な決定因子となるので今後この遅れをどのように改善することができるかが重要な課題である。

耐久試験は昭和47年9月～12月まで計700時間行なわれた．テスト部には配管曲り部（第6図参照），絞り，フラッシュタンクノズル（第7図参照）を選び，系統に取付けるものと放置するものおのおの1組ずつ製作した．試験後テスト部を系統より取はずし，現在，中央研究所において解析中である。



最高使用圧力　82 kg/cm²•g　　材　質　SUS27
〃　温度　296℃　　口　径　3/8B

第6図　曲　り　管
Fig. 6.　Bent pipe



最高使用圧力　20 kg/cm²•g　　材　質　SUS27
〃　温度　175℃

第7図　フラッシュタンク・ノズル

Fig. 7. Flash tank nozzle

IV. あとがき

今回の試作，試験の結果，実証化の見通しを得たが，実機の設計を行なうためには，さきに述べたようにその性能についてさらに試験を続ける必要がある。

なおこの試験を行なうにあたって動力炉・核燃料開発事業団ＡＴＲ本部の多くの方々にご指導，ご鞭撻をいただいた．また試験装置運転にあたっては同事業団大洗工学センタ関係者各位にご尽力をいただいた．厚くお礼申しあげる次第である。

参考文献

(1) PL 255/5 Failed Fuel Detection and Location in U.S. Reactor by S.N. Ceja

(2) Burst Cartridge Detection in British Gas-cooled Reactors by K.H. Dent et. al. Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 177 No. 12 1963

(3) PL 265/6 Burst Can Detection System in the FR 2 by S. Jacobi

(4) AECL 839 Detection of Gaseous Fission Products in Water by P.R. Tunnicliffe

技術論文社外公表一覧

題　　目	所　属	氏　名	発　表　機　関	
オゾンによる水処理	中央研究所	井関　昇	公害管理者技術情報	
On the Finite Element Analysis of Thin-watted Structures with Application to Structural Problems in Reactor Technology	川崎工場	豊吉　隆憲	Second International Conference on STRUCTUAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY	
同期調相機による製鋼アーク炉のフリッカ対策	工業事業部	久保田　勉	第52回通常総会研究会講演	日本電気協会
ガス冷却炉	川崎工場	雪島　伊乙夫	日本機械学会誌（年鑑）	日本機械学会
自家用電気設備の保護リレー	建設事業部	八島　荘市	電気評論（臨時増刊号）	電気評論社
プラスチックモールド形における電気加工機の応用	生産技術部	井手　稔	プレス技術誌6月号	日刊工業新聞社
整流器負荷の同期機に及ぼす影響	川崎工場	高橋　満	技術総説誌4月号	電気学会
工場配電系統における地絡保護について	システム開発部	四十万　稔	静岡地区講演会	日本電気技術者協会
タービン自動試験装置	電力技術部	門田一男	通常総会研究会講演	電気協会
油圧操作式ガスしゃ断器の開発	川崎工場	川畑博資	〃	〃
異容量結線回路用三相4線式電力量計ＦＦ13形	松本工場	里見義朗 牧垣　貢	〃	〃

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。