

本資料はH13年 7月 31日付けで登録区分  
変更する。  
[技術情報グループ]

高速炉資料 44-001

*Handwritten signature and number 69-5-*

# 破損燃料検出の現状と問題点

昭和44年4月

動力炉・核燃料開発事業団

## 破損燃料検出の現状と問題点

### 要 旨

この本は、昭和44年日本原子力学会年会に於て著者が「破損燃料検出の現状と問題点」と題して特別講演した時の原稿をやゝ加筆して本題についてまとめたものである。

高 速 増 殖 炉 開 発 本 部

望 月 恵 一

## 論 文 抄

破損燃料検出と言う問題は燃料材料，炉物理，安全性，放射化学，炉運転，計測と多方面に関係する問題であるが，今回はその計測法についての現状と問題点をまとめた。

破損燃料検出計測法については炉型その他の因子によつてかなり差がある。然し世界各国の例を集めると大体の傾向があるのでその実例，性能，作動経験，長所短所などをまとめた。そのあとこの計測法を設計する場合の考えるべき因子について論じてある。

尚この書は著者が昭和44年日本原子力学会年会で「破損燃料検出の現状と問題点」と題して特別講演した時の講演乃至予稿に不充分だったと思われる所を加筆したものである。同種の論文を学会誌にも投稿中であるが本書は動燃事業団の非公式書類であるのでかなり個人的見解も含ませた。

昭和44年4月2日

## I. はじめに

唯今から「破損燃料検出の現状と問題点」と題しましてお話し致します。

破損燃料の検出と言う問題は、色々の分野に関係します。例えば、破損が起る前に燃料ペレットの中での核分裂生成物(FP)の分布と挙動、FPガスの化学状態、燃料棒内のFPガス圧力、被覆材との反応、被覆材の製造方法と破損の関係、こわれ方、破損部からFPの漏出の仕方などを考えると「燃料材料」の問題に関係し、燃料の熔融およびその時の生成物の漏出、分裂生成物のプラント内での挙動、プラントの外への放出と言う問題では「安全性」と言う問題と関係します。また、燃料温度、熱流束<sup>束</sup>、機械的特性、過渡運転状態と破損との関連などと言うことでは「炉心設計」と言う問題と関係し、FPの化学的特性及びその分析と言う面では「放射化学」に関係します。然し本日の議論は、燃料棒乃至集合体が破損したかどうか、破損が増大したかどうかを検出する「計測系」に就いて行いたいと存じます。

先づ最初に破損燃料検出の「目的」について述べます。これは非均質型原子炉に通常使用される燃料の被覆が破損し、核物質や、核分裂生成物(FP)が冷却材中に逸散し始めたこと、あるいは逸散が拡大し始めたことを検出し、必要な情報を提供することを目的とすると言えませう。これにより、プラントに於て適当な処置がほどこされ、若し破損が激しい場合には破損した燃料の近傍にある他の燃料や、冷却材流路や諸機器に対する被害の波及するかも知れない事態を未然に防ぎ、これによりプラントの汚染、環境汚染、運転者、一般公衆の放射線障害をできるだけ少く抑える処置ができる様にするのであります。

破損燃料を検出する必要性、重要性は、それを設ける炉の型、燃料の種類、その他いろいろの因子によつてかなり異なります。例えば、金属燃料を利用するガス冷却炉では、破損はすみやかに検出されることが望ましいですが、酸化ウランを燃料とする軽水炉では、さほど火急的検出は必要でない。液体燃料を用いる原子炉では破損燃料検出という問題は起りません。また、高速炉では将来FPを制限された量だけたえず放出するVented fuelを用いる設計がありますが、これでは今までの如く常時は完全に被覆管で密封されている燃料が破損した場合と較べてかなり違つた検出方法を考える必要があります。これら各種の問題は後半で論

じます。

さて、破損燃料検出は英語で言うと Failed Fuel Detection and Location, 略して FFDL と言ひ、正確に言うと2つの意味が有ります。1つは「Detection」で、つまり、原子炉内での、または、使用済み燃料の破損を、そのどれが破損したかを問わず、燃料集合体の集まる集団のどれかが破損したことを、その集団全体として「検出」と言うこととあります。他の1つは「Location」で、つまり、その燃料集団の内どの燃料が破損したか、その場所を探す位置ぎめをすることとあります。検出、つまり「Detection」をする為の計測法、計測器は位置ぎめつまり「Location」の為にも使えますが「位置ぎめ」にはそれなりの技術があります。然し検出「Detection」が基礎となりますので先づ、Detection からお話しを致します。

## II. 検 出 Detection

燃料の破創が起つた時、それを検出する為に、測定の対象となり得る量として考えられるのは、直接的なものとしては、燃料被覆材の金属冶金的变化、長さ、膨らみ、燃料棒内の圧力など機械的諸量の変化があります。また破損の結果生ずる間接的なものとしては、FPの冷却材への放出を冷却材中の放射能、反応度、および、機械量(例えば気泡など)の変化をとること、あるいは冷却材の熱的、流体力学的変化量としてとるなど色々考えられますが、最も測定し易いものはFPであります。従つて先づFPの検出と言うことから述べることにします。

FPを検出する装置としては、原子炉内からか、またはFPの混るかも知れない流体(1次冷却材やオフガスあるいはカバーガス)の流路から必要なサンプリング管を導き出し、非連続的に抽出して放射化学分析するか、若し連続測定が必要ならば流れるパイプに検出器をあて測ればよい。

対象とするFPも色々な形で存在します。つまり 1)ガス状のFP(例えばXe, Kr) 2)放射性沃素類(ハロゲン化物) 3)遅発中性子を出す先行核となるFP 4)沈着をし易いF

P 5 ) 或いは大きな破損の場合は固形FPを含む核燃料破片および 6 ) それらの娘核種があります。これらがどの位の量放出されるかと言う事はお話の始めに申しました「燃料材料」の問題であり且つどんな状態で運転したかと言うことは「炉心設計」にも関係しますが、今日はそこまでは触れません。

さて上記のFPを測る方法を大別しますと現状では4つに分れます。すなわち FPの  $\beta$ ・ $\gamma$ 線を直接測る方法 2) 遅発中性子法 3) プレンビテーション法 4) その他FPの activity 以外で測る、でありますので下に順にのべて行きます。

これらの方法を採用するにあたり、特に計測装置を作る場合に、注意しなければならぬ事を先づ考えますと、1) 原子炉プラントの中で冷却水の中に逸散して来たFPは其の他の夾雑物すなわち放射性腐蝕生成物や冷却材自体その他キャリヤガスの放射化されたものと一諸になつて循環回路を循環し始めます、2) このFPは他のものと混るにつれて希釈されかつ自然崩壊して減衰して行く、3) 循環回路には必ず浄化系として例えばフィルター、トラップ、イオン交換樹脂などがあかれてあるのでこれらに夾雑物と一諸に捕獲されてしまう可能性がある、4) FPの一部あるいはその他の夾雑物は物体表面に吸着をするので循環回路、サンプリングラインあるいは検出器表面を汚染する。この洗滌が案外大変である。——JRR-3の最近の例、5) 固形物は沈澱している、などの状況下にありますのでこれらを考慮しなければならぬ。これらを考慮して最も計測法として大切な事は現在の如き原子炉体系でFPの放出し「始め」を検出することでありますから出来るだけ感度をあげる、S/N比をあげる、その為には夾雑物を除いてFPのみを取り出せる様に工夫することであります。従つて以下の事もこの為の対策工夫限界、問題点を中心にお話しします。

## II 1. FPの $\beta$ ・ $\gamma$ 線を直接測る方法

FPから出る $\beta$ 、 $\gamma$ 線はその強度のかなり強いものが有り、半減期も測定系から言つて適切ですからこれを測定対象とすることは容易に考えられます。従つて破損燃料検出法として最も良く各種の原子炉で実用されています。どの様な放射線スペクトルを持っているかと言う例として第1図にJRR-3で燃料が破損した時放出されたFPをGe半導体で測つた場合

を掲げます。大体普通数 KeV ~ 数 MeV の間で 20 ~ 30 の特性スペクトル線を見出すことが出来ます。対象となる核種を表に示しますと第 1 表のようになります。

放射性夾雑物によるバックグラウンドが無いが、少い場合には、グロスの  $\beta$ 、 $\gamma$  線強度を測れば良いので検出器として単に GM 管、電離箱、シンチレーターで測るので良く極めて簡単である。この場合各種の炉で考えられるバックグラウンド核種をまとめると第 2 表のようになります。Na 冷却高速炉では、通常 Na が放射化され Na-22, Na-24 がバックグラウンドとして混り、冷却材中でも 1 ~ 100 mCi/ml, カバーガス中で 10  $\mu$ Ci/ml もあると言われ<sup>1),2)</sup> ます。(カバーガスに Ar を使用すれば Ar-41 も含まれることとなります) 然しこれらの存在したまゝでも EBR-II での実績結果から考えて簡単に比例計数管またはシングルチャンネルガンマスペクトロメータで測る事が研究されている。然し現在一般には S/N 比を上げる色々の対策がなされている。

第 1 は強エネルギー、短半減期のバックグラウンド核種の減衰を待つ乃至は遅延回路を設ける。水炉で N<sup>16</sup>, O<sup>16</sup> はこの方法で除ける。

第 2 は放射性不純物の除去でガラスウール、フィルター、活性炭コールドトラップ(金属メッシュでできている)で固形物を取除く<sup>5)</sup>。Na 冷却炉で使うコールドトラップでは FP の I や Cs すらも 90% 以上捕獲できる<sup>3)</sup> と言うのでこれを測定することも考えられる。イオン化された夾雑物はイオン交換樹脂で取り除くことが出来る。

第 3 に此の場合逆に FP の分離乃至濃縮と言う事も考えられるわけで例えばイオン交換樹脂のうちカチオンで大部分の夾雑物を取り去つたあと沃素をアニオンに吸着させてこれを測定する<sup>4) 5)</sup>。あるいは沃素はハロゲン化銀に吸着され易いこと<sup>6) 7), 8), 9)</sup>、また 4 塩化炭素で抽出され易い事を利用して分離し濃度を増してやることも出来る<sup>10)</sup>。また気相液相への FP の拡散の割合の違い(沃素の水中から蒸気中への拡散は 1/100 以下である)を利用して一方の相へのみ濃縮させることも出来る<sup>11)</sup>。Xe とか Kr は molecular sieve (モレキュラーシーブ 13x で Ar + Kr と Xe を分離, モレキュラーシーブ 5A R 活性炭で Ar と Kr を分離)を使つてそれぞれを別に、またキャリヤガスからも分離して濃縮させることが出来ます<sup>12)</sup>。(原研の特許に

なつている)

以上の方法の上に第4に検出器や回路の改良や性能向上があります。第1には性能の良い検出器を用い特にFPの $\beta$ 、 $\gamma$ 線の特徴エネルギースペクトルを正確に測るようにすることである。(Naは1 MeV以上に高いピーク $\gamma$ を出す)あるいは各種FPの存在比ないしその変化も判るようにする。この検出器としてシングルチャンネルガンマスpektロメータ、マルチチャンネルガンマスpektロメータや更にはGe (Li drifted) 半導体検出器がある。Ge 半導体検出器は第1図にも見られた様に極めてするどい分解能を持つている点優れているが、常時装置を液体窒素などで冷却しておかなければならないので商業発電用原子炉などで用いるには更に一段の工学的改良が必要となるでせう。以上の他の回路の開発としては先づCoincidence technique<sup>13)</sup>があります。これは遅発中性子先行核となり得るFPの或る特定のものを取り上げ2つの検出器と1つの電氣的遅延回路を用いて、その即発 $\gamma$ 線と遅発中性子との同時検出が出来るようにしておく方法であります。未だこの方法が実用化された事は聞きません。次にはdouble duodecompton suppression spectrometer 法です。<sup>14) 15)</sup>これは2つの半導体を用いるか2結晶半導体を用いピーク対コンプトン比を改善してS/N比を上げる方法です。一般に半導体で $\gamma$ スペクトル波高分布を測定した時第1図でも判る様にコンプトン散乱のバックグラウンドが大きく、 $\gamma$ 線の全吸収ピークがその上に僅かに乗つていると言ひ形で、正確なピーク面積の算出が困難である為です。この2半導体を用いる測定系の原理は片方の検出器はFPなどからの $\gamma$ スペクトル信号をとりますが、その時この検出時にコンプトン散乱した $\gamma$ 分を、他方の検出器が吸収するので、この散乱 $\gamma$ 線を吸収した時だけ両者の出力を加算するゲート回路を設けておけば、全吸収ピークが得られ、コンプトンバックグラウンドは減らされる。この方法は研究論文は有るが炉に應用された例は知らない。次にチェレンコフカウンター法<sup>6) 7)</sup>が有ります。大部分のFPや腐蝕生成物、あるいは水の活性化による $\beta$ 線のエネルギーは5 MeV以下であるが第3表に見られる如く、少数のFPの $\beta$ 線は5 MeVより高いものがある。従つてチェレンコフカウンターの設定点を5 MeVより大きくしておけばFPの存在を知る。この方法は既に水型研究炉やループなどにはよく用いられているが、チェレンコフ光を光電増倍管で取る方法なので、冷却材が可視光線に不透明な(例えばNaなど)場合は使えない。また光電増倍管は冷却をしないとノイズ分が多くなり、かなり冷却をしなければならぬので高温



の動力炉に実用することには不便がある。<sup>17)</sup>

第5は測定技術の問題である。先づ破損が起つたらF Pの混つて来た冷却材が回路を循環してその間に希釈される，崩壊減衰する，あるいはバクグラウンドが上ると言う前にできるだけ速やかに測定すること，少く共，サンプリング（試料の採取）を終えることが必要です。次に濃縮と言う項に入れても良いですが沃素をアニオンで吸着させるとかまた特定のF P例えばMo<sup>99</sup>やTe<sup>132</sup>がモネルメタルやNiには特にtrap吸着されるのでこれらMonelやNiを挿入してF Pを収集すると言う技巧<sup>18)</sup>を使う方法がある。第2図はカナダで測つたモネルメタルに捕獲された $\gamma$ 放射線スペクトルである。次には以上でもF Pを集め難い場合は刺戟法を使います。即ち原子炉出力を過渡的に変える事により平衡状態が破れF Pの量に変化（一般的には増加）を与える。或は起動停止を行えば水炉などではwater loggingと言つて破損孔よりの冷却材の出入りに伴つてF Pの放逸を誘起することが出来る。またガス炉などでは冷却材圧力の変動をさせてF P放出を誘起するなど一連の刺戟法が有用であります。この刺戟法は検出Detectionの他の方法の場合にもまたLocationの場合にも屢々用いられ小さな破損の検出に有用であります。

次に実際の装置として圧力管型に近い炉心設計では各燃料チャンネル毎にサンプリングパイプを取り出す方法を用いていますが，軽水炉の特にBWRでは蒸気に含まれたF Pをタービン発電機復水器の空気抽出器またはタービン軸封から取つて検出している。これを第3図に示す。SGHWRの例を第4図に示す。これらの回路で短半減期の不純物の減衰を得る様検出器まで遅延がなされる様になつてることが判る。

次に以上のF Pの $\beta$ ， $\gamma$ を連続測定する方法の問題点をのべる。

冷却水についてはカチオン樹脂で夾雑物を除去しそのeffluentをアニオン樹脂に通して沈着した沃素を連続測定する方法<sup>5)</sup>は有るが運転成果は未知である。カチオンが他の腐蝕生成物を吸着しないかS/N比がどの位になるか不明である。冷却水自体の中の沃素を4塩化炭素で抽出する方法はJPDRなどで試験的行なわれ<sup>10)</sup>，性能はかなり良い様であるがこれを実用的に連続に近い状態にする開発が必要であらう。

次に既に燃料破損が有つたり，燃料棒表面汚染の為に冷却材にFPが混つて居りバックグラウンドの高い状態で更に燃料破損が起つた事を検出する方法としては感度の良く且つ飽和しない様な検出器を使うことが必要となるがそれ以外にFP核種の存在比の違いで見ることが出来る。例えば定常状態で $I^{131} / I^{135}$ の比は0.5位であるが破損が起るとその生成率と半減期の違いによりこの比が2~4になると言われ<sup>19)</sup>，同じ様なことがJPDRでも $Xe^{135} / Xe^{138}$ の比について観測されたと言われている。<sup>20)</sup>

結論としてFPの $\beta$ ・ $\gamma$ 線を直接測る方法は最も簡便で広く利用されているが，S/N比を改善する工夫が安価で実用的にできる必要があると思われる。

## II 2 遅発中性子法

FPのうち $I^{137}$ ， $Br^{87}$ はそれぞれ半減期22秒，56秒を以て6%，2%の割合で遅発中性子を出すのでこれらFPの混る冷却材を炉心から離れた処に導き，遮蔽された状態で中性子検出器に感知出来る信号を与えれば破損の有つた事を知る。この方法は，中性子の検出であるから， $\beta$ ・ $\gamma$ 線バックグラウンドの影響を受けない筈であり良い考案と言える。動力炉，研究炉共に採用している。吾が国ではJRR-3，JRR-4が採用している。此処で中性子バックグラウンドとなるのは水炉で $N^{17}$ が半減期4.2秒だが中性子を出す，また高水炉では $N^{16}$ が半減期7.4秒だが強い $\gamma$ 線を出しこれで光中性子が出る。然し幸いにしてこれらは半減期が短いので30秒程度の遅延装置を通つたあと測れば良い。第5図がその減衰状態を示している。装置としては冷却水サンプリングパイプを丁度囲うような形で黒鉛やポリエチレンなどの減速材ブロックを置きその中にBF<sub>3</sub>カウンタやBoron被覆計数管を入れてある。フランスORISIS(重水)炉の例を第6図，第7図に示す。サンプリングパイプはこの減速材ブロックの中でやゝ滞留できるよう太くしてある。このブロックまで冷却材が到達する時間は上記の如く10数秒から数10秒位とれる様に流速や位置をきめている。

遅発中性子法は考案としては $\beta$ ・ $\gamma$ 線バックグラウンドの影響を受けない点甚だ良いが次の如き欠点がある。第1は $I^{137}$ ， $Br^{87}$ の半減期が短いので，原子炉が運転中している間しか検出ができない。炉が停止後は用い得ないこと，また破損が小さいlong leak pathになる

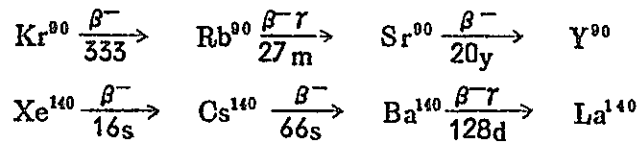
様な場合は主として破損孔が燃料棒プレナム領域にあると、遅発中性子先行核は燃料棒の外へ出て来る迄にかなり時間を経過してしまうので、此の方法では測り難いことである。第2は  $I^{137}$ ,  $Br^{87}$  が逸散する全FPの中での含まれる割合が小さく且つこれから遅発中性子が出る割合は夫々6%、2%と小さいので検出効率は極めて小さいことである。EBR-IIでは検出効率は1%としている。<sup>21)</sup>

従つて相当大きな破損であるか、然らざれば感度の高い中性子検出器を多数設け、そのサンプル流からの位置を適切にすること、また遅発中性子が最も効率よく感知できるように流量ないし遅延時間を調節することが必要である。但し下記の如き Power cyclingを行えば10ミル(0.25mm)位のピンホールを検出できるとも言われる。<sup>22)</sup> 第3にはNa冷却高速炉で問題になることですがこの方法は $\beta$ 、 $\gamma$ 線の影響は受けないと言つても冷却材の $\gamma$ バックグラウンドが余り高いと、カウンター類でも電離箱的な働きをしてgammaのpileupにより出力電流が飽和して来る心配が有る。それを防ぐ為適当な $\gamma$ 線遮蔽をする必要がある。<sup>23) 24)</sup> 冷却材が高温の場合は検出器をその熱から保護してやる必要がある。回路としてn- $\gamma$ の弁別を良くする方法には先づ周波数帯域を出来るだけ抜ける(例えば30MHz<sup>21)</sup>)にすることと共に最近ではnと $\gamma$ の立ち上り波形の違いからこの両者を弁別する方法も発表されている。<sup>25)</sup> この他He-3カウンタ、スパークカウンタ其の他特殊なchamberやcounterを採用することも考えられている。<sup>23)</sup> 感度が小さい事に対する対策としては前述と同じ刺戟法がある。出力の周期的変動つまりpower cyclingもこの方法である。この方法を用いてOANDU型人工破損燃料をNRX炉ループ内で試験した結果を第8図に、またEBR-II炉で裸の燃料ピンを出し入れして遅発中性子法で測つた例を第9図に示す。尚FP内の強いガンマにより重水炉で出る光中性子を測つて破損を見つける方法、D( $\gamma$ , n)H<sup>45)</sup>も有る。まとめとして遅発中性子法は $\beta$ nバックグラウンドの影響を受けず、原子炉運転中であれば、短時間に破損を検出できる優れた方法であるが感度が低く測定可能時間が短いので小破損の検出には適さない。

### 1.3 プレシピテーション法

プレシピテーション法は下に示される式の崩壊でできるRb, Csがプラスの電荷を持つ固

体で、これらが更にβ崩壊してSr, Ba になる時のβあるいはγ線をシンチレータで測ること



とによりFPの存在を知る。実際に対象となるKr, Xe, Rb, Csは第4表に示す。この方法はKr, Xe およびそれらの娘核種の持の半減期の為に検出までに1分乃至10数分の遅れを持つが、Rb, Csを他の核種から完全に分離してから測るので、S/N比は良く高い検出効率を得られます。殆んど100%とも言われます。<sup>26)</sup>従つて各種の動力炉研究炉に利用され、わが国では東海発電炉やJRR-2のループに採用されています。装置は第10図の如くFPの混つた炉水はスクラバーの中でキャリヤ・ガスによつてFPガスを奪われ、そのFPガスを含むキャリヤガスは冷却凝縮器とフィルタを通りプレシピテータチェンバーに入る。プレシピテータは心線にマイナス、外円筒にプラスの電圧(数百乃至数千ボルト)をかけてある。こゝに入つたFPガス(Kr, Xe)はゆつくり流れる間にβ崩壊してRb, Csになり、これは心線に電氣的に吸引され沈着する。心線の厚みあるいは直径は6ミル程度<sup>27) 28)</sup>のステンレス製、容器は直径50~200mm位である。この心線を移動し適当な時間の後崩壊して出来たSr, Baの出すβまたはγ線をシンチレータで検出する。フェルミ炉の例を第11図に示す。~~EBR-Iの場合、プレシピテータ・チェンバーを出たあとワイヤを水の中を通過せしめる。この時Rb, Csは水と反応し水を活性化する。キャリヤガスArもAr-41となつて~~<sup>30)</sup>~~いるが、これは崩壊して安定なKr-41となつていたので測定に悪影響しない。~~冷却材中に溶けたFPガスをキャリヤガスに移すためにはガストリッパー乃至スクラバーを用いる。第12図にドイツFR-2(重水炉)のスクラバーを示す。すなわち円錐型の間隙を落下するFP入りの冷却水に対し下方切線上にキャリヤガスを吹き込むとガスは旋回しながら上昇して行く間にFPガスを奪い取る。同じ様な意味でNa冷却炉ではカバーガスを引き出して来る時、それに混るNaの蒸気を連続的にトラブすることが必要である。プレシピテートされるワイヤは巻取型(第13図)、循環型(第14図)、往復運動型<sup>29)</sup>など色々ある。また独乙では第15図のようにプレシピテータと超小型GMカウンターを一体にした様な型にし

ている。この時電極間隔は0.1mmと言う。EBR-IIでは容器からワイヤの出口のシールのため水銀溜めを設けてあり、特に出口でワイヤは水銀の上に溜つた水をくぐつて出る。この時ワイヤに沈着しているRb, Csは水と反応させ放射性の水酸化物となるのでこれを測定している。この場合カバーガスの活性化したAr<sup>41</sup>の娘核種のK<sup>41</sup>も水にとけるが幸い安定な核種であるから放射性検出には影響を与えない。<sup>30)</sup>

プレシピテータ法は効率が良くまたS/N比も優れているが検出までに上記の如く1分乃至10数分の時間を要する欠点がある。然しその遅れはせいぜい半減期のオーダーであるので、long leak pathの破損の場合や、炉を停止してからでは測定は不可能である。プレシピテータの感度を上げるにはサンプルガス流を増す程良くなる筈であるが経済的理由もありコールダホール炉では0.06lb/Sにしている。

プレシピテータ法を用いても感度を上げる為に刺戟法を用いることがある。第16図は東海発電所で人工破損燃料により検出系の較正試験の為、出力および圧力を変動させた時の例である。プレシピテータの変型として2枚のフィルターを使い最初の1枚でサンプルガス内の固型夾雑物を除き、ガスが第2のフィルターに至るまでに遅延させると、第2のフィルターにはRb, Csが捕獲できる。これを測ると言う方法もある。<sup>8)</sup>

まとめとしてプレシピテータ法はS/N比感度など優れて最も良い方法だが検出にかゝる時間がかゝる欠点がある。

#### II 4. 其の他の方法

以上はFPの放射能を利用した方法でしたが其の他には次のような方法があります。

- 1) ガスクロマトグラフの利用。前述したmolecular sieveとガスクロマトグラフを用いるとXe, Krを分離して検出することが出来る。<sup>31) 32) 16)</sup> 第16図にフローダイヤグラム、第17図に典型的な信号例を示します。原研の研究炉のループに於て試験では成功をおさめているようです。<sup>33)</sup> 但し第17図に見るように測定には5~20分のおくれが有る点が欠点です。
- 2) 燃料棒内封入Heガス圧の変化、燃料棒を製作する時通常Heガスを封入するので

燃料棒にキャピラリーをつけて炉外に引き出しその He 圧力の変化を監視しておく。若し圧力が下れば破損漏洩が有つたと考える。<sup>6) 34)</sup> この方法は古い研究炉で燃料が単純、出力も余り出ない場合は良いが最近の動力炉には使い難い。

- 3) 通常冷却材には気泡が混つていない型の炉では若し破損が起ると F P ガスが噴出して来るのでこの気泡を機械的に、あるいは電氣的にあるいは炉の反応度の変化として求めこれにより破損を知ると言うことも考えられる。この内、反応度の変化で求める方法は水炉や高速炉で考えられているが、この場合反応度のポイド係数が大きくないと測定は難しい。高速炉で予想される破損では気泡発生による反応度変化は 2 セントにすぎないと言われ<sup>35)</sup>る。機械的電氣的な測定法はあとで述べる。

以上 Detection のまとめとしては「検出」には 3 つの代表的な方法があります。F P の  $\beta$ 、 $\gamma$  を直接はかる方法、遅発中性子法、プレシピテーション法です。それぞれ長所欠点はあるが実用されています。尚アメリカ H W O T R ( 重水炉 ) では上記の 3 大方法を含めて各種の検出法をとりつけ運転性能の比較をしているので興味深い。<sup>43) 44)</sup>

## Ⅲ. 位置ぎめ (Location)

次の問題はどの燃料がこわれたか、その燃料の位置を探し求める事です。これはその破損燃料を速かに取り出し、新燃料と交換する上で必要であります。若し「位置ぎめ」する為の技術装置が全く無い場合は、試行錯誤方式で、破損したらしいと思われる燃料を順次 1 本づつ健全な燃料と交換して運転を繰返し、上記検出 Detection の何れかの方法によつて変化を監視しそれにより破損を知ります。E B R - I は今の所この方法で Location して<sup>36)</sup>います。然し一般には下記のような装置あるいは技術が用いられ或は開発されています。

### Ⅲ 1. サンプリング法

最も正統的な方法は各燃料要素チャンネル出口から、冷却材を一部サンプリングして引き出し、その放射線強度を上記 Detection の所でのべた方法で検出すればよい。問題は ① 燃料チャンネルが沢山ある ( 動力炉では数 1 0 0 ~ 数千 ) 場合にはそのチャンネル毎にサン

ブルライン及び検出器を設ける事は経済的に不可能である事 ②冷却材流量や燃料交換操作の障害とならずに十分なサンプル量を連続的に取り出さなければならない。従つてこれらの理由から此の燃料出口からすべてのサンプルを取り出すと言う事は炉の型によつては、その必然性、安全性、経済性、炉の構造や操作の容易性などから考えて、つけている場合とつけていない場合があります。前者の代表例は天然ウランガス冷却の東海発電炉、後者の代表例はPWR、BWRの軽水炉です。またたとえサンプルラインをつけたとしても高価な検出器の数を出来るだけ少なくする努力がなされています。その方法の1つは「グループサンプル」法です。東海発電炉では燃料チャンネルは2052個有りますが、その6個づつを最小サンプル単位にまとめ、この最小単位群を21～22グループ集めてそれを順次スキャンしながら1ケのプレシピテータ検出器で検出する。この21～22のグループは合計8ケあるので検出器も8ケである。以上 $6 \times (21 \sim 22) \times 8 = 2052$ となります。スキャンはバルブ切換操作で行い、30秒毎に移ります。この方法では他のグループをスキャンし測定している間は、その目的とするグループに破損が発生しても判らないと言う不便はあるが、事態が異常に激しくなれば冷却ガス全体の放射能を監視している点で、これを知ることが出来る。また、一旦その最小単位において異常が発見されれば、それを構成する6チャンネルの各々1つ毎に観測して、最終的にどの1チャンネルであるかを見つけることは可能である。以上の如く、この方法は最も正統的な方法であるが構造が複雑になる欠点がある。

第2の例としてAGRやJRR-3のごときマトリックス法がある。第18図はその模型図である。各燃料チャンネル毎に取り出されるサンプルを2手に分け行方向と列方向でそれぞれまとめたマニホルドに入れる。マニホルド毎に検出器がつく。従つて $m$ 行 $n$ 列の燃料チャンネルを持つ炉に対し検出器 $(m+n)$ 個ですむ。今 $p$ 、 $q$ 両マニホルドのサンプルの放射能が高い事が検出されると、その交点であるチャンネルが破損と見なされる。この方法も検出器の数を減らす点で良いが、同時に、あるいは1つの観測時間中に複数個の破損が起ると擬似検出をする欠陥がある。またJRR-3の如く行、列共に炉から検出器までの放射能減衰時間を同じにする為にはサンプルパイプの長さを調節する施設が必要になる。

### III 2. Tagging 法あるいは Coding 法 36) 2)

各燃料集合体毎にそれぞれ異なる標識同位元素を含ませておく。燃料被覆材が破れると、その Tag 元素が冷却材の中へ逸散して来るので、これをサンプリングし「スパークソース質量分析器」で検出する。これは放射能の測定ではないが、感度は良く 0.3 g 位が冷却中に放散されただけで検出が可能と言う。Tag 元素としては通常腐蝕生成物などで現れる元素以外なら何でも良い筈であるが、その種類、その元素と燃料材料乃至冷却材との共存性、破損時の冷却材中への逸散率など未だ多くの問題がある。種類が少ないので Tag 元素の種類の組合せなど考えられる。この方法が実用化されたとは聞かない。

### III 3. Flux Tilting 法 19) 37) 38) 39)

Location の施設が全く無くても次の方法により大略破損燃料の識別をすることが出来る。これは一種の刺戟法である。

運転中の原子炉で、或 1 本の制御棒を引き抜き、局部的中性子束のピーク、歪を起させ (tilting)、核反応を活発にし、これにより若しその制御棒の周りに破損燃料があればそこからの FP の放出が盛になることが Detection 法で判るので、少くも破損燃料はその抜いた制御棒の周囲ないし近傍にあることが判る。JPDR など成功している。この方法は大掛りな装置なしに Location する事が出来るので便利であり、金もかゝらず有力な方法であるが、問題点としては、制御棒が原子炉内に大略均等に配置されて居り、しかもその間隔は migration area の平方根かそれ以下である様にしないと、炉心のすべての燃料が制御棒引き抜きによる局部的中性子束ピークの影響を受けない。従つて最近の加圧水型のように液体毒物制御を行つて制御棒本数が少かつたり、高速炉の様に制御棒の入る位置が炉心で限られている場合は効果が薄いかも知れない。また、やゝ試行錯誤的に制御棒を抜くので時間がかゝる。また正確に破損燃料を探すにはこの Tilting 法のあと更に別な方法 (例えばあとでのべる sipping 法など) が必要になる。また、若し制御棒を抜いた為に FP の放出以外で放射能を増す (例えば水の放射能による分解やそれに伴う  $N^{16}$  の増加など) 要素があるならば、これを抑える為に別の制御棒を挿入すると言う操作が必要になる。又 water logging 効果を用



いるなどの技巧が必要になる。然しこの方法は破損検出が緊急を要さない場合は極めて簡便に破損燃料の概略の位置をきめる良い方法である。J P D Rでの例を第19図に示す。16ヶの制御棒の内斜線を引いた処のものが tilting を起させる目的の制御棒である。F I ( Full in ) の状態から104 ( *cm* ) 乃至F O ( Full out ) まで引抜くと或特定の制御棒の場合は activity が大きく上昇することが判る。これによりJ P D Rでは総数72本ある燃料集合体の内あやしいと思われる燃料を2~3本までにつめることができた。

#### III 4. 其の他の方法

##### 4.1 On-Power Refueling Machine を用いる方法 40)

On-Power Refueling Machine 即ち運転中に燃料交換出来る機械があれば破損らしい燃料をこれに取り上げて運転を続け冷却材の放射能が下れば取り上げた燃料を以て破損とする。破損燃料カートリジの上におかれた健全カートリジを取除いただけでも中性子束分布の変化で破損その判別ができると言う。新燃料を入れた時も熱衝撃が与えられるので同様にその破損の有無は判る。商業発電炉になると(例えば英口O E G B) 前述した power cycle, pressure step などの刺戟法を余り屢々使うわけには行かないのでこの Refueling Machine を使うテストを考えている。

##### 4.2 炉内燃料操作機の利用 36)

燃料を炉から取り出すはん雑さを避ける為E B R - II では破損燃料検出器は炉心中央にのみ設けておき、炉停止中、炉内燃料操作機を用いて、破損と思われる燃料と思われる燃料を1本づつそこまで運びチェックをする方法を考えているが実行されたかどうかは聞いていない。

##### 4.3 F P ガス(気泡)の利用

##### (サイクロン法) 35)

通常は気泡の存在しない炉に於てF P ガスの気泡が冷却材中に混入して来た時これを機械的に集めて測定する方法にサイクロン法がある。英国のNa冷却高速炉用に開発されているものは第20図に示す。燃料集合体出口にガイドベーンを設け冷却材に旋回力を与えると

サイクロン式に気泡だけは中心軸に集つて上昇するのでこれを圧力計流量計などで測定する。

(燃料出口温度変化の統計的測定) 35)

次に開発されているのはNa冷却高速炉などで燃料集合体の一部に破損ないし閉塞が起ると、燃料出口の平均温度の絶対値は余り変わらないとしても、温度のその燃料チャンネル内分布が変わるので出口温度の“ゆらぎ”も変わる筈です。その“ゆらぎ”の変化から破損乃至閉塞を識ると言ひ方法です。この方法をNa冷却高速炉に適用するならば、その感度は平均温度の変化をとるより10倍もよいと言われています。然し実用されているわけではなく熱電対の性能、温度ゆらぎのスペクトルの吟味など今後の一層の開発が必要でせう。

(FPガスの音響的検出法) 35) 41)

気泡のつぶれる時の音響スペクトルは特有(多分かなり高い周波数)のスペクトルであるので各燃料チャンネル出口に静電容量型トランスデューサーか、或はウェーブガイド用のパイプを設けて、炉外でピエゾ電氣的に検出する方法も考案されて居ます。この方法の問題点はそれぞれの型の炉の中でのFP気泡の真の音響スペクトルを知る事とこれのバックグラウンド音響となるポンプなどの音響振動スペクトルを分析し且つ弁別し得る様にしておく事である。

以上 位置ぎぬLocationをまとめると、サンプリングと言ひ正統的な方法があるが炉型によつてはこの様な構造は複雑になるのでtiltingやtaggingなどの技術も利用乃至開発されている。

#### IV. 使用済み燃料の非破壊的破損検出法

使用済み燃料集合体を炉心から取り出して再処理工場などへ送る前に破損の有無を検査しておくことは、それ以降のプロセスをきめる上で必要なことであります。

実際に行ひ方法の代表は“Sipping”法<sup>42)</sup>でこれにはWett法とdry法とあります。JPDRで用いた方法はWett法で第21, 22, 23図にこれを示す。燃料プールなどに特別設けた密閉箱の中に使用済み燃料を1体入れ、暫く放置すると崩壊熱により暖められFPガスや

I がその箱内の冷却材の中へ散出してきます。この水またはガスを吸い上げ sipping して放射化学分析ないし  $\beta$ 、 $\gamma$  の放射能測定をする。これを速進する為加熱したり、減圧したりする方法も考えられては居ります。dry 法は第 24 図の如く密閉箱に圧さく空気を押込んで冷却材を排除し、FP ガスをその空气中に逸散せしめ、そのあと空気を吸い上げサンプルするのである。

## V. FFDL の諸問題点

以上破損燃料の Detection と Location ならびに使用済み燃料の非破壊的検査法を総覧したがこゝで一般的な問題点をまとめて見る。

### V 1. 感 度

各国の原子炉における破損燃料検出の感度をまとめると第 5 表のようになる。FFDL における感度の表現としてよく使うものに、信号をバックグラウンドの 2 倍にするないし、その信号を出す為に人工破損燃料として或は裸の燃料の露出面積が何  $cm^2$  かと云う表現を使います。又 clusec と云う単位もある。これは 1 atm の圧力差で漏洩が起り、1 l の真空溜めの圧力が 10  $\mu\text{Hg}/\text{sec}$  で上昇する様な漏洩で、大略 1 clusec に相当する孔の直径は 1.34  $\mu\text{m}$  と言われますが、この clusec を使うことも有ります。第 5 表を見るとプレシピテータ法を用いたガス炉は感度は極めて高いが、高速炉になると N a バックグラウンドが高く破損検出が困難なことが判ります。従つてどの位の感度で設計すべきかは炉型によつて当然違つて来ると思ひます。

### V 2. 設計上考慮すべき点

FFDL にどの様な性能を持たせ、どの位の金を投じて作り、据付けるべきかを考える時考慮すべき点を以下にのべます。

#### 1) 燃料材料

金属ウランを用いる場合は、被覆の破損によりウランが  $\text{CO}_2$  や水と酸化反応を起

すと酸化物となり熱伝達，熱の放散を悪くし，ウランの結晶変化，スエリング溶融を起すので破損は早く発見する必要が有るが，酸化物を用いる場合にはFPの retention が強く化学反応もなく，極めて安定であるので，数本の燃料破損があつても原子炉運転は続けられる。

## 2) 燃料集合体

燃料集合体の設計，製作，検査が確実でないとき破損を起す。tramp uranium などの表面汚染はバックグラウンドとなるので注意を要す。破損の有る場合，起動時は大抵 overshoot があるので tramp uranium でないことは判る。大型高速炉でNaのボイド係数が正になると，高燃焼で，燃料ビンの内圧を非常に高く設計する場合には，被覆が破損すると，FPガスは急激に冷却材中に放散し，ボイド係数も手伝つて，破損事故が隣へ波及する可能性があるので破損を速かに検出する事が必要になるかも知れないが，現在のFFDLの技術では検出に10秒は最低かゝるので上記問題を完全に解決したとは言い難い。但し現在のような小型で低燃焼の高速炉の間は問題ないであろう。

## 3) 燃料交換方式

燃料交換を炉停止中に行う軽水炉の場合には停止中にFPのγ線を検出する方法で実施できるので運転中検出する如き高価なFFDL施設は不要です。

## 4) 冷却方式

1次回路が閉回路になつている原子炉では，BWRの如き開回路の場合に較べ重要度は低い。然し回路内の腐蝕生成物の量，その処理能力，誘導放射能など炉の運転条件を各種考慮しなければならぬ。

## 5) 運転モード

起動停止或は過渡変化を屢々行う炉あるいは限界設計に近い運転を続ける場合は，FFDLは必要となるがベースロードで連続運転する場合は重要度は低い。

## 6) 安全系への連けい。

現状では未だFFDLの信号はその場合毎で解釈する必要がある。東海発電所でも信号が上昇してもその量、上昇率など検討して燃料交換あるいは炉停止の必要性をきめている。安全系への連けいは慎重を要する。

#### 7) 破損点を探すこと

燃料集合体が数10本以上の燃料棒で出来ている時はこれのどの燃料棒が破損しているか発見する方法はその集合体を分解して見る以外にない。現状では一旦分解したら再使用は不可能である。プレナム部の破損かミート部の破損かは前者が主としてFPガスを後者が主として遅発中性子先行核を出すと言ひ風に考え得ると言ひ説もある。またFlux tiltingで制御棒の抜き始めの開始点を移動して破損点を見つける事がJRR-3やJPDRで行われたが明確な成果は上つていない。

#### V 3. 将来の方向及び問題点

将来の方向乃至問題点として第1はFFDLが次第に簡便になり、不必要に大がかりの事はしなくなつて来た。これは燃料が金属から酸化物系に移つた事も一理である。またその為破損が起つても少々ならばそのまま運転を続行する方向にある。第2の問題はそれを拡大してvented fuelを使う様になる。この様な場合にはFFDLも異つた考え方を採用しなければならぬ。例えばFPの相対的な存在比の変化とか、特殊な元素乃至FP核種のみ注目すると言ひ事が必要になるが今後大なる開発、その為の先づ施設の開発も必要であろう。第3は検出応答時間を早くする事、その次には予告出来るようにする努力が必要でせう。第4は破損を定量的に観測できること及びLocationを安価で簡便に行えることも必要となりませう。

## VI. ま と め

以上破損燃料検出位置きめをまとめると次の様になる。破損燃料の検出は公衆運転員、プラントの安全の為に必要なことである。但しこれをどの程度装備するかは炉型其の他各種の因子によつて大分異なる。検出には破損検出(Detection)と位置きめ(Location)とが有

る。DetectionにはFPの $\beta$ 、 $\gamma$ 線を直接測る方法、遅発中性子測定法、プレシピテータ法の3種があり、それぞれ長所短所が有りますが、ほぼ実用化されている。Locationにはサンプリング法と言ひ正統的方法が有るが構造的、経済的などの理由ですべての炉に装備する事はできないので他の各種の測定技術が試験開発されている。今までの経験はループ、研究炉、実験炉、原型炉までの経験ですから今後実用商業発電炉などになると更に一層の検討が必要になるでせう。もつと経済性、信頼性、使用の容易さが要求され且つ測定技術についても再考を要する所があります。従つて尙一段の実用的試験開発が必要であると考えます。

文 献

1. Cartwright D.K.:IAEA Report of a Panel, Vienna, 13-17, Nov.1967, "Detection and Location of Failed Fuel Element" P.P.207
2. USAEC:LMFBR Program Plan, WASH 1104 Aug.1968, P.P.4-88
3. 日本原子力発電会社:「ソ連高速実験炉 BR-5 の運転経験」アトムナヤ.エネルギー抜すい 開発-55 高速炉-10, 1968
4. Ceja S.N.: 1と同じ P.P.223
5. Heath, R.L.:Fission product monitoring in reactor coolant water, Nuclearonics Vol.15, No.12(1957)P.P.54
6. Briggs D.S.: 1と同じ P.P.21
7. Howes, J.E.Jr. et al:Development of a fuel-element leak-detection system based on the principle of isotope exchange, BMI-1432
8. Nuclear Safety: Fuel element leak detection, Vol.2, No.3(March 1961)P. P.27
9. Nuclear Safety: Control and Instrumentation Vol.4, No.1 P.P.58
10. 石渡, 島山: 炉水アイオダイノモニタの試作 JAERI-memo 2647(1967.1)
11. 原子炉安全研究協会: 核分裂生成物の放出と移行 昭42年3月 P.P.227
12. 戸根: 原子炉燃料の破損検出装置 特許 43-20229
13. Yevick, J.G.:Fast Reactor Technology:Plant Design (1966) P.P.642
14. 阪井: 半導体ガンマ線検出器 応用物理 Vol.38 No.1 (1969) P.P.16
15. IEEE Nuclear Science Series Vol.15, No.3(1968)にこの関数の文献が3編有る。
16. Gordon, C.M.;Burst-slug Cerenkov detector, Nucl.Vol.15, No.1(1957)P.P. 91
17. 山田(日立)との私信
18. Lipsett, J.J et. al 1と同じ P.P.27
19. Ceja, S.N.: 1と同じ P.P.216
20. 11.と同じ P.P.226
21. Ceja, S.N.:1と同じ P.P.231

22. Palmer, J.F.: Finding Failed Fuel in CANDU, Nucl. Vol. 22, No. 6 (June 1964) P.P. 39
23. USAEC 2と同じ P.P. 4-92
24. 白山(東芝)との私信
25. 大西ほか, JRR-4 起動系の検討 (n-r 波形弁別) (2) 昭 43 炉物理炉工学分科会 D-6
26. Briggs, D.S: 1.と同じ P.P. 7
27. Ceja, S.N.: 1.と同じ P.P. 228
28. Smith R.R.: Fission product monitoring in EBR-I, Mark IV, ANL 6788, Jan, 1964
29. Aliaga-Kelly D.: Burst slug detection in water-cooled reactors, Nuclear Power, Vol. 4, No. 39 (1959) P.P. 77
30. Ceja, S.N 1.と同じ P.P. 227
31. Kritz, W.R. Gas Chromatograph Monitors for Fuel Failure, Nucl. Vol. 19, No. 4 (1961) P.P. 106
32. Kritz, W.R. An Automatic gas chromatograph for monitoring of reactor fuel failure--Part IV Model 2 design, DP-668 (1962)
33. 北原: TLG-1 における FFD 実験, FFD 研究討論会予稿 原研 (1969年1月)
34. FOX.M "The Brookhaven reactor"; Geneva Conference Paper (1955), Vol. 2 UN, New York (1956) P.P. 353
35. Evans, P.B.F. et al. Control and Instrumentation of Prototype Fast Reactor, London Conference on FBR, B.N.E.S. Ref.: 5A/5 (1966)
36. Winkleblack, R.K. Recent EBR-II operating experience; Preprint to the 1967 Winter Meeting A.N.S. Chicago, Nov. 1967
37. Mochizuki 1.と同じ P.P. 129
38. Robertson, R.F.S: Tests of Defected  $UO_2$ - $ThO_2$  Fuel Specimens in EBWR ANL-6022
39. Misenheimer, L.J. et al. Detection and identification of a ruptured fuel element at the SM-1 (APPR-1) nuclear power plant, Trans. Am. Nuc. Soc. Vol. 6 (Suppl. 1) (Oct. 1963) P.P. 49



40. Cartwright D.K.: 1と同じ P.P.198
41. USAEC 2と同じ P.P.4-95
42. Osborne R.N. Locating Failed Fuel in Water Reactors Nucl.  
(1961) P.P.84
43. Ceja, S.N. 1と同じ P.P.235
44. Arnett, L.M.et al. "The Heavy Water Component Test Reactor: Safety  
Systems, Fuel Failure Detection, and Stand-by Condition" DP-1049,  
(May 1966)

第1表  $\beta$ ,  $\gamma$  線検出に利用される核分裂性物質および娘核種

核種	半減期	放射線強度 (MeV)
Kr 85m	4.4 h	$\beta^-$ 0.83 $\gamma$ 0.15, 0.30
Kr 87	78 m	$\beta^-$ 3.8 (70%) 1.3 (2.5%) $\gamma$ 0.40, 0.85
Kr 88	2.8 h	$\beta^-$ 0.52 (68%) 2.8 (20%) 0.9 (12%) $\gamma$ 0.028 0.19 1.5 2.4
Kr 89	3.2 m	$\beta^-$ 4.0
Kr 90	33 s	$\beta^-$ 3.2
Kr 91	9.8 s	$\beta^-$ 3.6
Rb 88	17.8 m	$\beta^-$ 5.3 $\gamma$ 1.86 0.90
Rb 89	15 m	$\beta^-$ 3.9 $\gamma$ 1.1 0.67
Rb 90	2.7 m	$\beta^-$ 5.7
Rb 91	100 s	$\beta^-$ 4.6 $\gamma$
Mo 99	67 h	$\beta^-$ 1.2 (83%) 0.4 (14%) $\gamma$ 0.14, 0.18, 0.74,
I 131	8 d	$\beta^-$ 0.61 (87%) $\gamma$ 0.36 (80%)
I 132	2.3 h	$\beta^-$ 2.1 (18%) 1.5 (24%) 1.2 (23%) 0.9 (20%) $\gamma$ 0.7 0.5 0.8
I 133	20.8 h	$\beta^-$ 1.4 (94%) $\gamma$ 0.53 (94%)
I 134	52.5 m	$\beta^-$ 2.5 $\gamma$ 0.86 0.1
I 135	6.7 h	$\beta^-$ 0.5 (85%) 1.0 (40%) 1.4 (25%) $\gamma$ 0.53 (27%) 1.1 (37%) 1.3 (34%) 1.7 (19%)
Te 132	77 h	$\beta^-$ 0.2 $\gamma$ 0.23
Xe 133	5.3 d	$\beta^-$ 0.34 $\gamma$ 0.08
Xe 135	9.2 h	$\beta^-$ 0.91 $\gamma$ 0.25, 0.36, 0.61
Xe 138	17 m	$\beta^-$ 2.4 $\gamma$ 0.42, 0.51
Cs 137	27 y	$\beta^-$ 0.51 (92%) $\gamma$ 0.66
Cs 138	32 m	$\beta^-$ 2.6, 3.4 $\gamma$ 1.4 (73%) 1.0 (25%) 0.46 (23%) 2.2 (18%)

Radiological Health Handbook Sept. 1960

Friedlander, G. et al. Nuclear and Radiochemistry (1955)

第 2 表 バクグラウンド核種

核種	半減期	放射線強度 (Mcy)	備考
T <sup>3</sup>	12.3y	$\beta^-$ 0.018	重水炉 D <sup>2</sup> (n・r)
N <sup>13</sup>	10 m	$\beta^+$	水 炉 O <sup>16</sup> (p・a)
N <sup>16</sup>	7.4 s	$\beta^-$ 10.4, 4.4 r 6.13.	水 炉 O <sup>16</sup> (n・p)
O <sup>15</sup>	2 m	$\beta^+$ 1.7	水 炉 O <sup>16</sup> (r・n)
O <sup>19</sup>	29 s	$\beta^-$ 4.5, 2.7 r 0.2 1.4	水 炉 O <sup>18</sup> (n・r)
F <sup>17</sup>	67 s	$\beta^+$ 1.7	重水炉 O <sup>17</sup> (p・n)
F <sup>18</sup>	112 m	$\beta^+$ 6.4	水 炉 O <sup>18</sup> (p・n)
Na <sup>22</sup>	2.6y	$\beta^+$ 0.5 r 1.27	Na 炉 Na <sup>23</sup> (n・2n)
Na <sup>24</sup>	15 h	$\beta^-$ 1.39 r 1.37, 2.75	Na 炉 Na <sup>23</sup> (n-r)
A <sup>41</sup>	110 m	$\beta^-$ 1.2 r 1.3	カバ-ガス A <sup>40</sup> (n・r)
C <sub>r</sub> <sup>51</sup>	28 d	r 0.3	腐 触 Cr <sup>50</sup> (n・r)
Mn <sup>56</sup>	2.6 h	$\beta^-$ 2.89, 1.1, 0.75 r 0.85, 1.81	全 上 Fe <sup>56</sup> (n・p)
Co <sup>60</sup>	5.3y	$\beta^-$ 0.31 r 1.17	全 上 Co <sup>59</sup> (n・r)
Co <sup>64</sup>	12.8 h	$\beta^-$ 0.57 r 1.35	全 上 Cu <sup>63</sup> (n・r)
W <sup>187</sup>	24 h	$\beta^-$ 1.3, 0.63, 0.34 r 0.07, 0.13, 0.48	全 上 W <sup>186</sup> (n・r)

第3表 5 MeV以上のβ線を放出するF.P.

核種	半減期	生成率	β線	エネルギー
Br <sup>87</sup>	55.6 <sup>s</sup>	1.9%	30%	8.0 MeV
Kr <sup>88</sup>	2.77 <sup>h</sup>	2.6	78	5.3
Rb <sup>90</sup>	2.7 <sup>m</sup>	3.3	100	5.7
Y <sup>94</sup>	16.5 <sup>m</sup>	4.8	100	5.4
I <sup>136</sup>	86.0 <sup>s</sup>	2.9	100	6.4

Gordon, Hoover; Burst slug Cherenkov detector

Nucleonics 15, 1 (1957)91.

第4表 DETAILS OF FISSION GASES OF INTEREST IN BCD

Nuclide	Percentage fission yield	Half-life	Daughter product	Half-life
Krypton 88	3.7	2.77 h	Rubidium 88	17.8 min
89	4.6	3.18 min	89	15.4 min
90	5.2	33.0 s	90	2.74 min
91	3.7	9.8 s	91	14.0 min
92	2.7	3.0 s	92	80.0 s
93	1.3	2.0 s	93	Short
94	0.6	1.4 s	94	Short
Xenon 138	5.5	17 min	Caesium 138	32.0 min
139	4.7	41 s	139	9.5 min
140	3.7	16 s	140	66.0 s
141	1.8	1.7 s	141	Short
143	0.2	1.0 s	143	Short

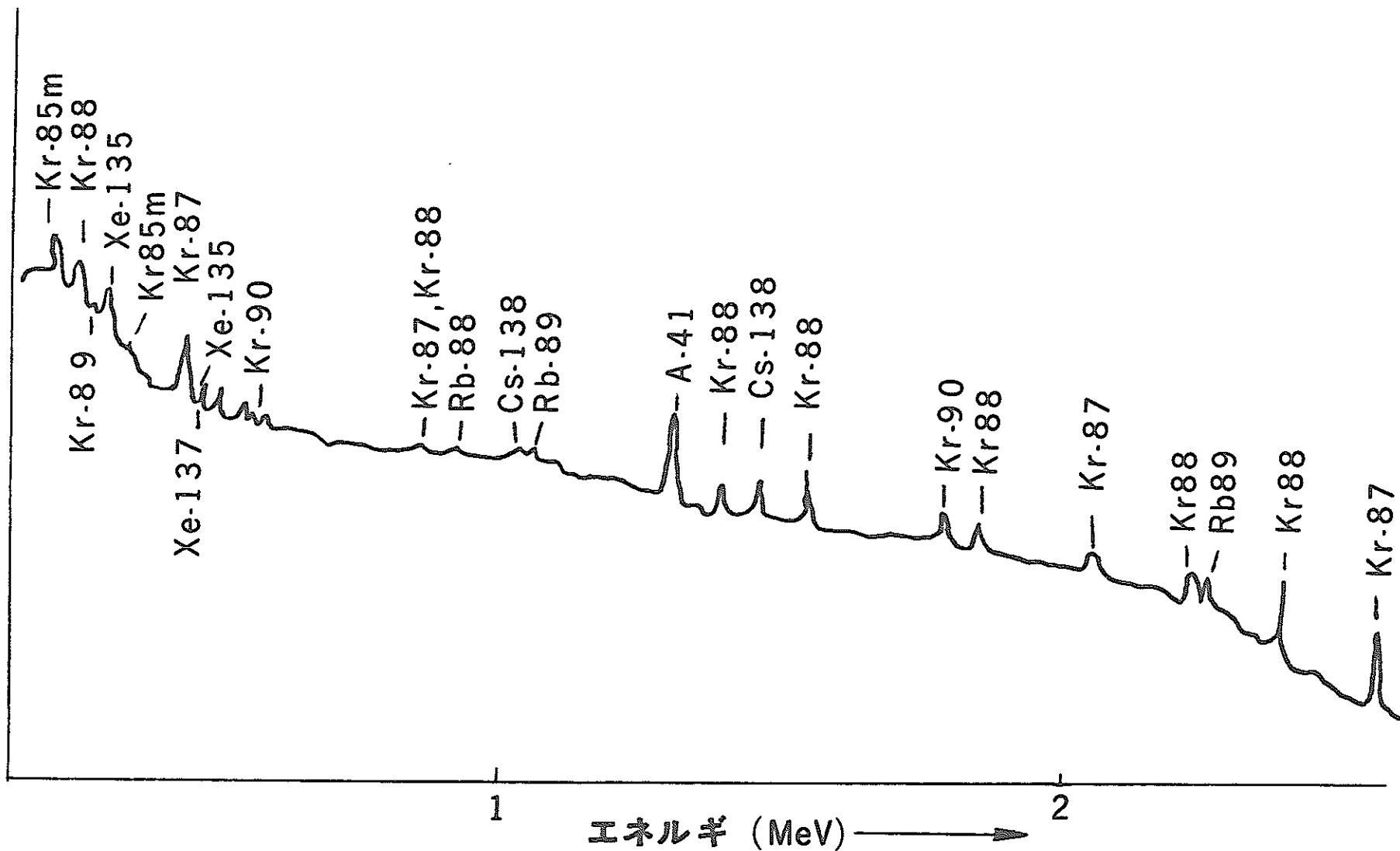
;AEA:FFDL Report P.178以下引用

第5表 各種原子炉破損燃料検出系の感度

国	原子炉	FFDL	感 度	性能 その他
カナダ	NRX-ループ	Ge半導体 γスペクトル	S/N 0.25 以上  power cyclingで10 ミルのピンホールの検出可能	モノル. SSへのMo, Te, のtrap  全 上
	NPD	Ge半導体 γスペクトル		全 上
	CANDU-PHW	遅発中性子 γスペクトル		全 上
フランス	EDF-1, 2, 3	プレシビテータ	500~1000 cps/cm <sup>2</sup>	天然ウラン露出面積換算  全 上 全 上
	ORISIS	遅発中性子	16 cps/cm <sup>2</sup>	
	EL-4	遅発中性子 プレシビテータ	400~500 cps/cm <sup>2</sup>	
	PEGASE-ループ	プレシビテータ	35,000 cps/cm <sup>2</sup>	
	RAPSODIE	遅発中性子 プレシビテータ		
独	FR-2	プレシビテータ	S/N : 3.4~72	
日	東海	プレシビテータ	power cycle, pressurestepで 50~170 clusecの人工破損燃料の検出可能	10数ミル以下の破損をfluxtiltingで検出
	JPDR	γシンチレータ		
スウェーデン	Ågesta	γシンチ プレシビテータ	90mg	信号をバックグラウンドの2倍にする に必要な露出天然ウラン換算
	R-2	βシンチ	27mg	全 上
	R-2-ループ2	チエレンコフ	1.1mg	全 上
イギリス	Calder Hall	プレシビテータ	0.04 cm <sup>2</sup>	信号をバックグラウンドの2倍にする に必要な露出天然ウラン面積 換算
	Hinkley Point	プレシビテータ	0.06 cm <sup>2</sup>	全 上
	Wylfa	プレシビテータ	0.2~0.004 cm <sup>2</sup>	全 上
	AGR	プレシビテータ	1 cm <sup>2</sup> の孔なら直ちに検出, 0.04 径の孔なら数時間で 検出.	
	FBR	遅発中性子	a few~several cm <sup>2</sup>	信号をバックグラウンドの2倍にする に必要な露出面積換算
	PFR	遅発中性子		
	CVTR	γ, β	5~10%の出力変動を与えて 検出 S/N : 1.1~15	
	EBR-II	プレシビテータ 遅発中性子	S/N 12 (濃縮度52.4%Uの裸丸棒(14.8 "L, 0.188 "D) U-235 68mg)を吊してテストした	
	Fermi	γ プレシビテータ		

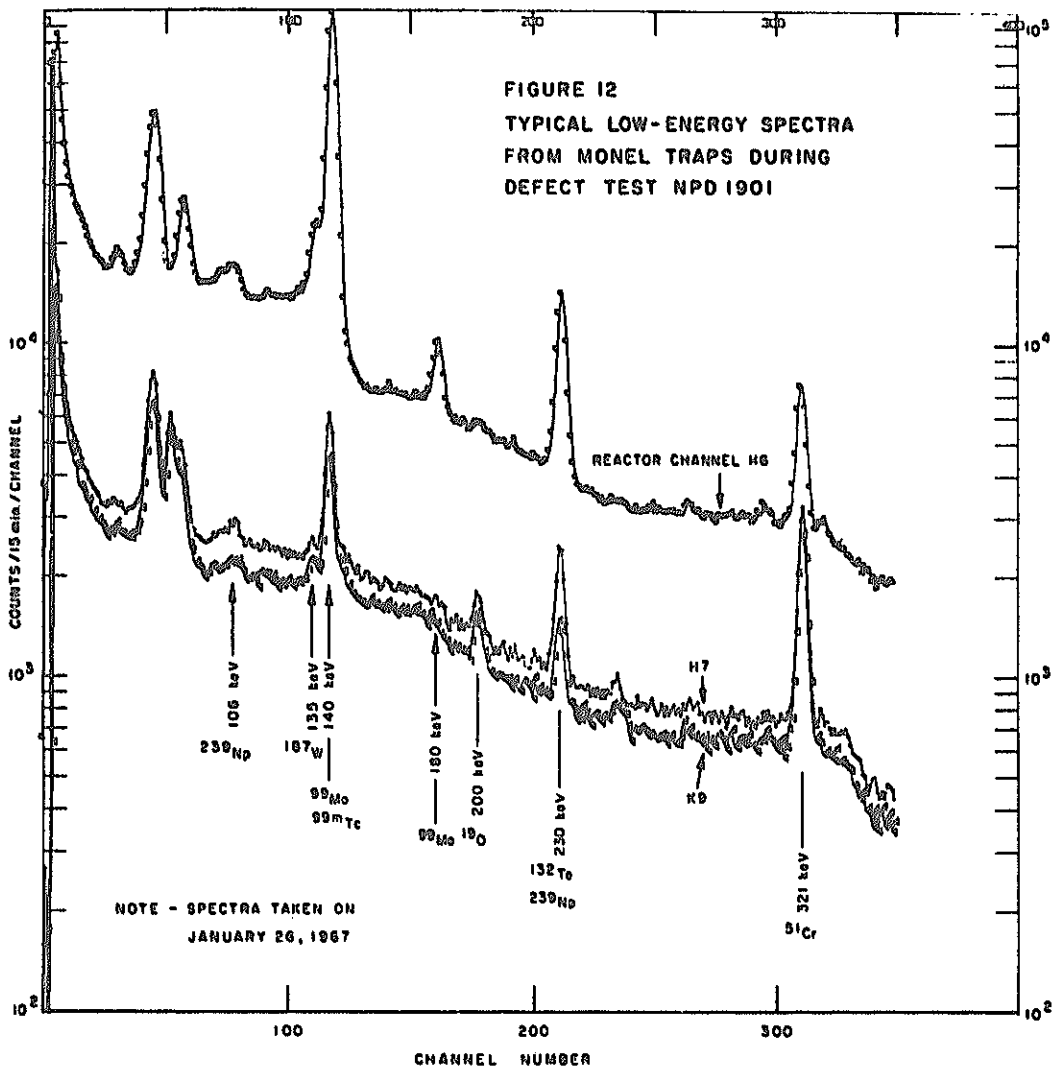
引用した文献は IAEA, FFDL Report (1968), Nucleonics 15.12, 21.3, 22.6

BNES London Conf. 5A/5 (1966), FBR Technology Plant Design.

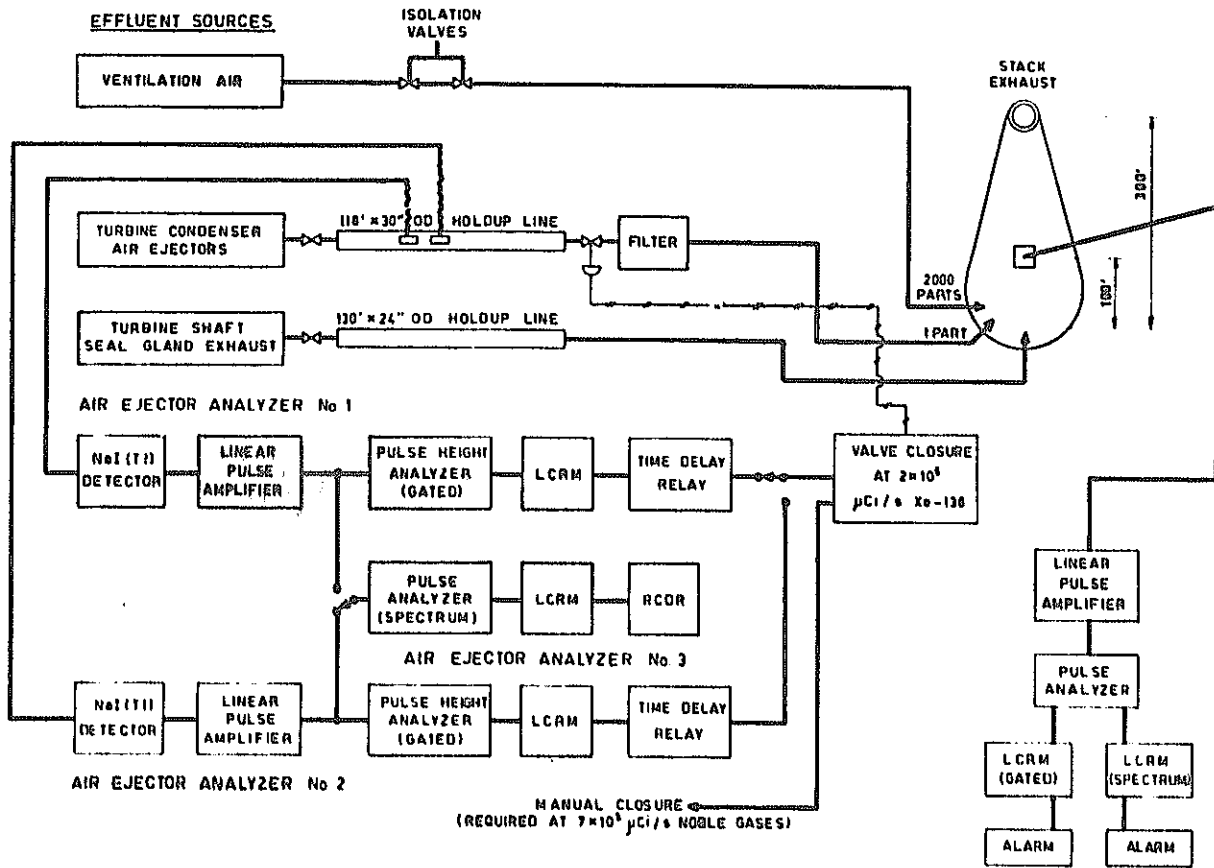


第1図 JRR-3での破損燃料F.P. スペクトル分布測定

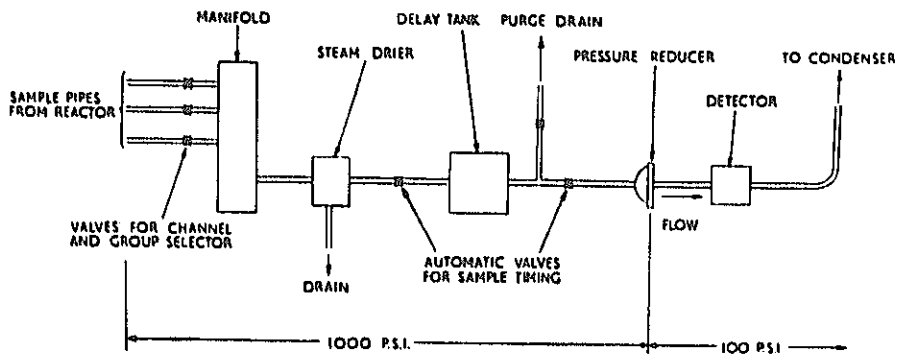
(根本・JRR-3燃料破損時の水・ガスγスペクトル及びJRR-2FFDの概要)  
 FFD討論会予稿、原研 1969.1.31



第2図 カナダNPDでモネル金属にトラブされたγ スペクトル (IAEA FFDL Report p.p.42)

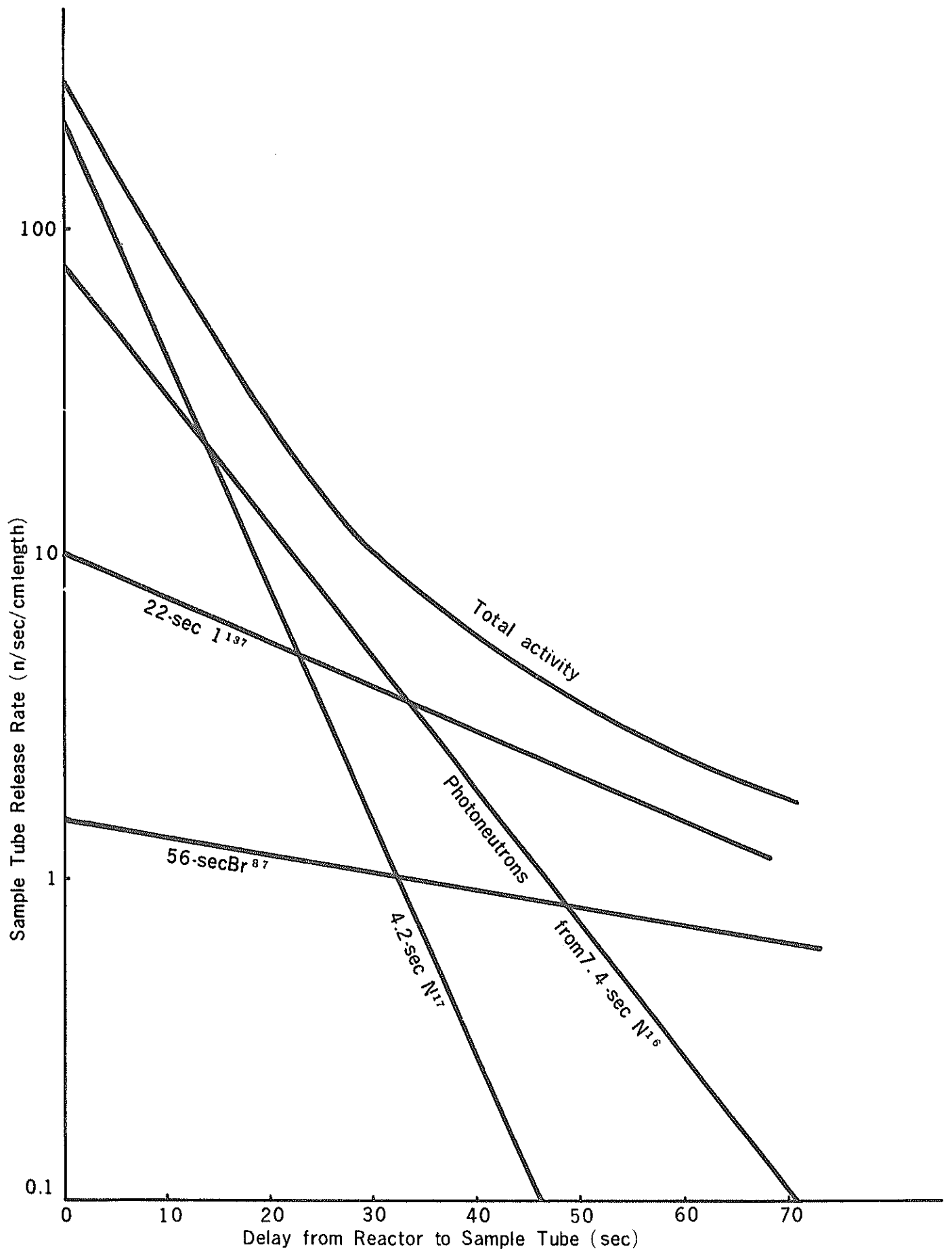


第3圖 Gaseous waste-disposal system.  
(IAEA : FFDL Report 19引用)



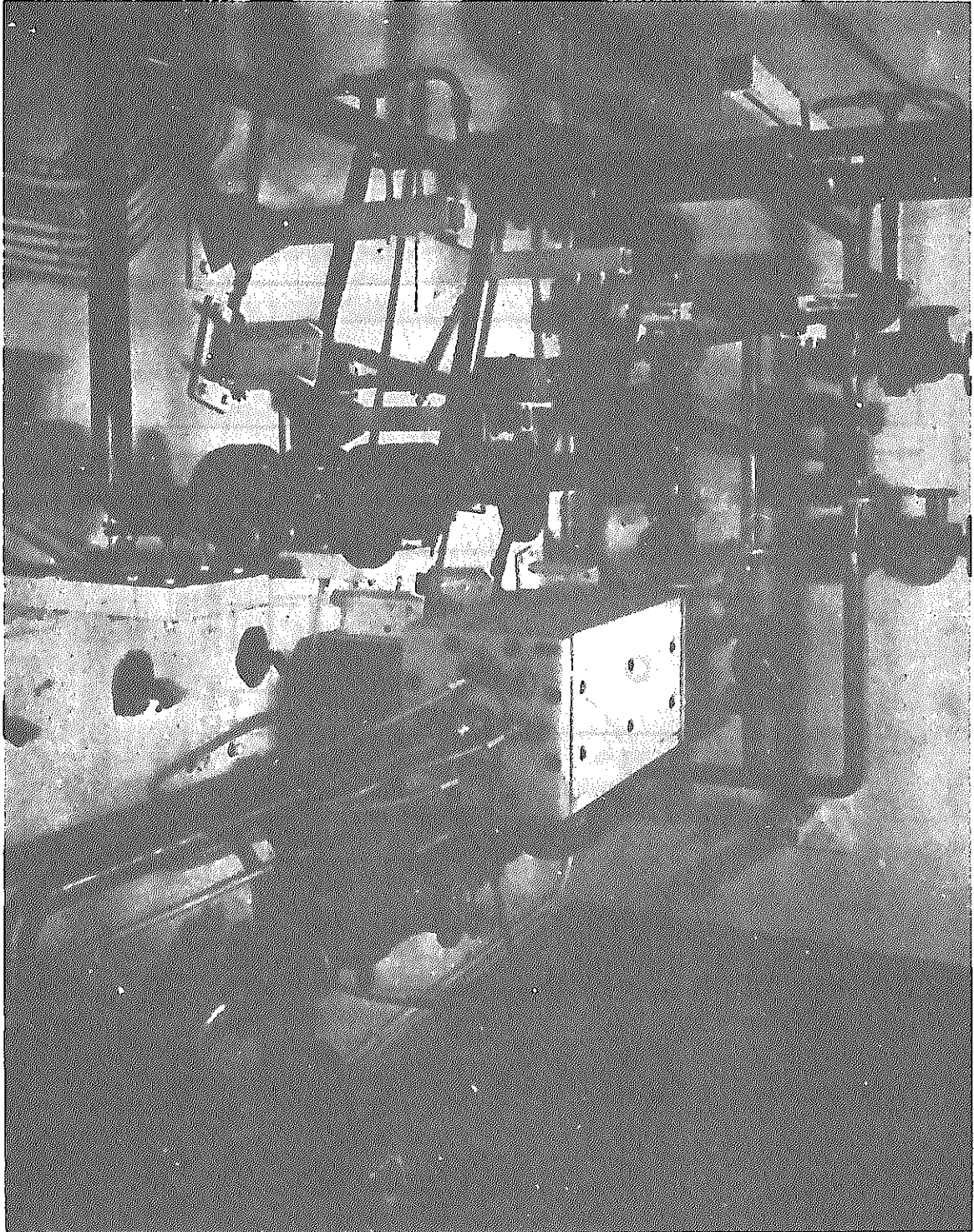
第4圖 Diagram of possible BCD arrangement to SGHWR,  
IAEA FFDL Report 19引用 p.p.210 19引用



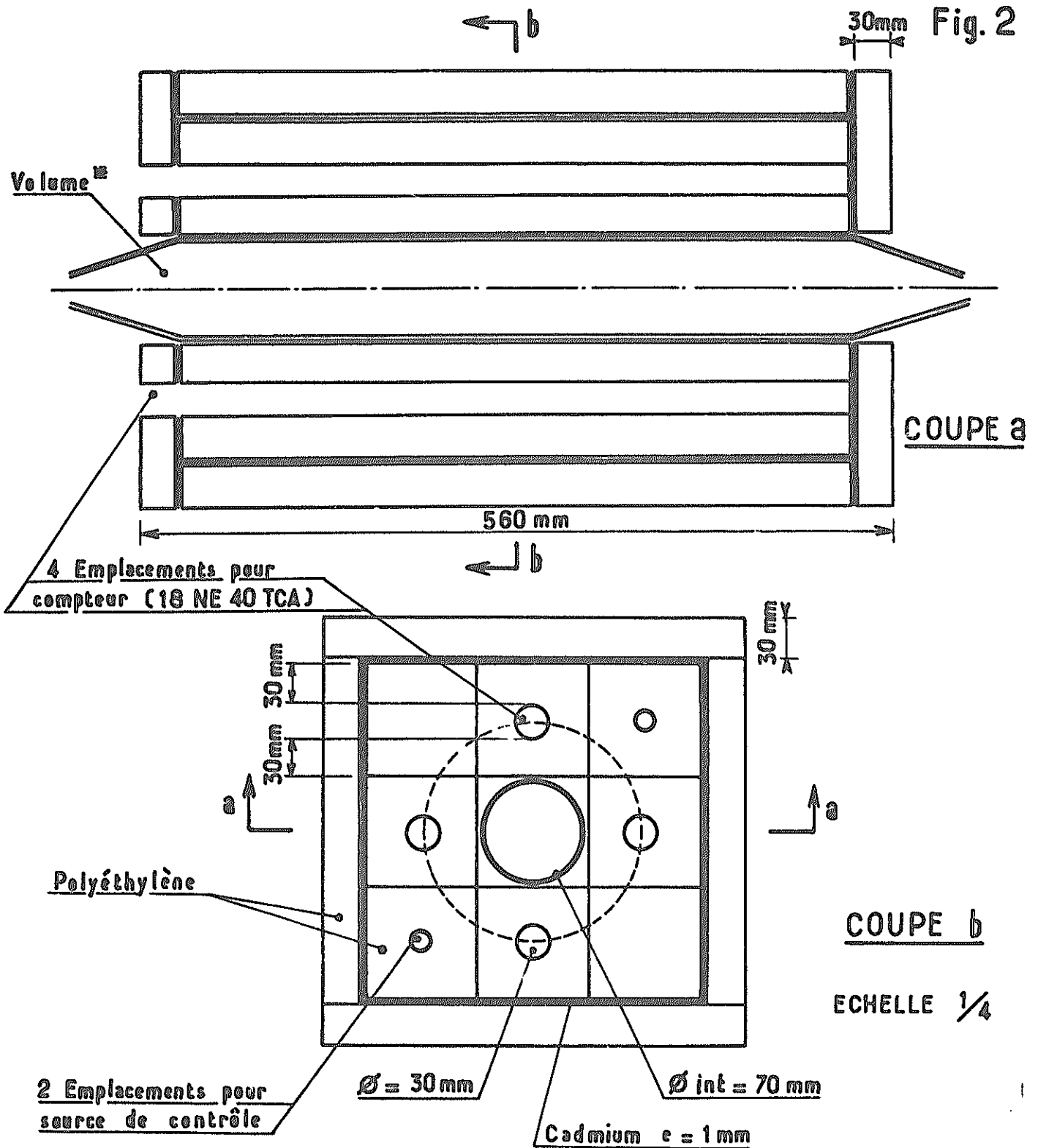


第5図 遅発中性子発生率 (計算)

Palmer J.F. Finding Failed Fuel in CANDU, Nucl22.6(1964) 40



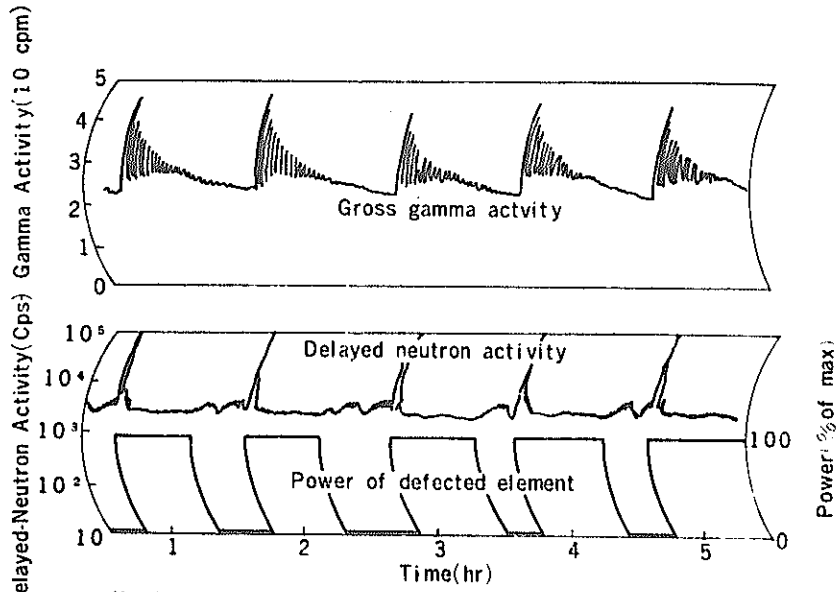
第6図 PILE OSIRIS—DETECTION DE RUPTURE DE GAINÉ  
Circuit hydraulique et bloc détecteur



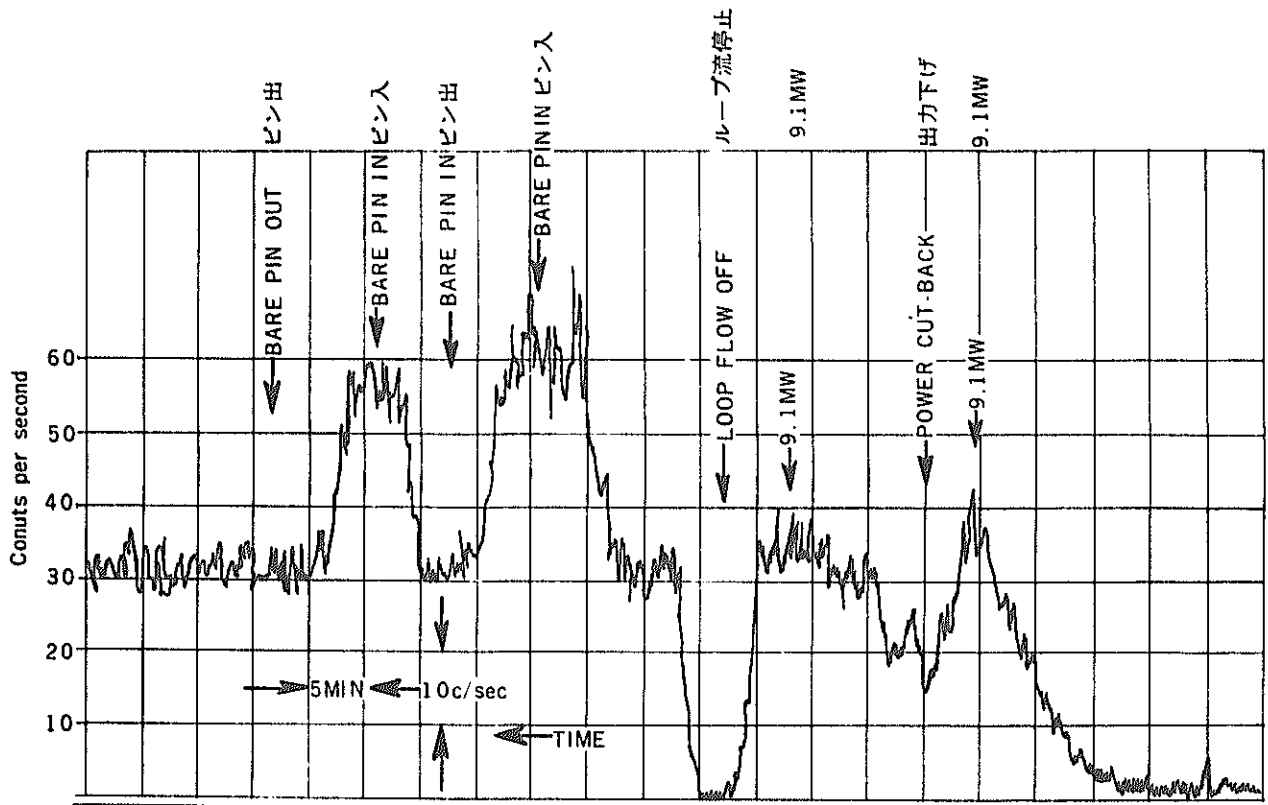
Longueur entre brides: 800 mm  
 Capacité: 2500 cm<sup>3</sup>

D.R.G. OSIRIS  
 BLOC DETECTEUR  
 Schéma de principe

第7図 ORISIS 炉の遅発中性子検出装置

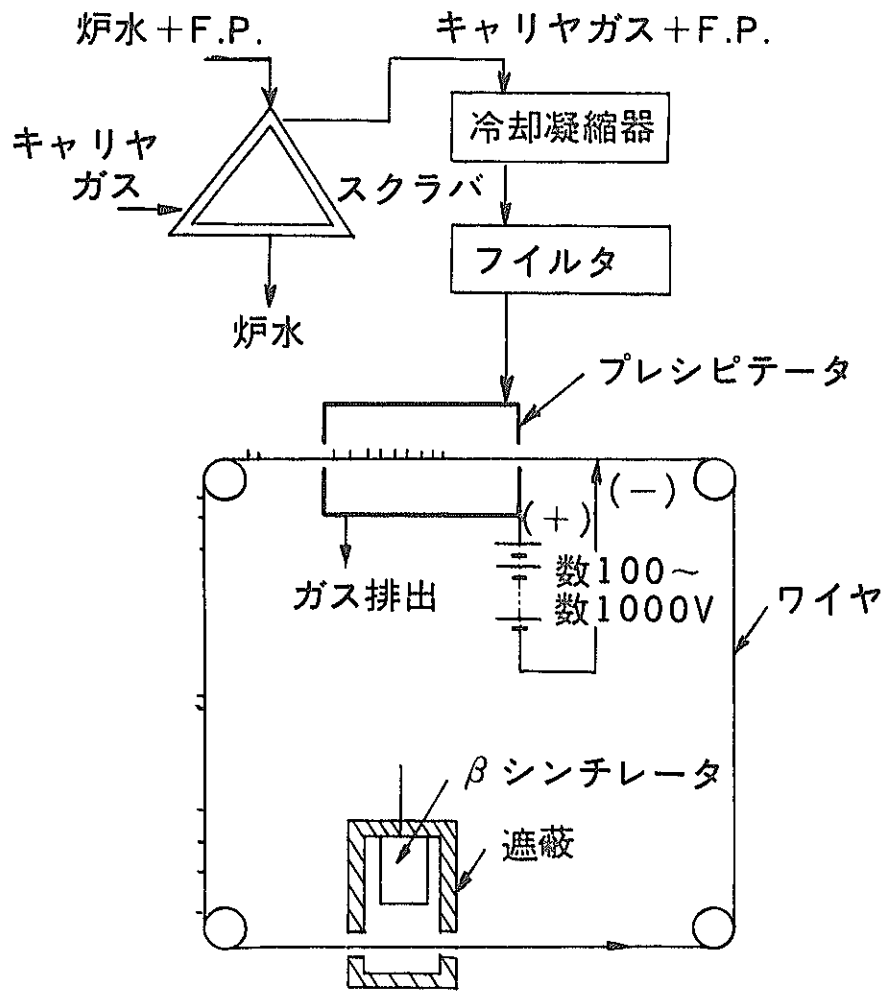


第8図 CANDU 型燃料のループ内Power Cycling  
Palmer Finding Failed Fuel in CANDU, Nucl. 22. 6(1964) 44.

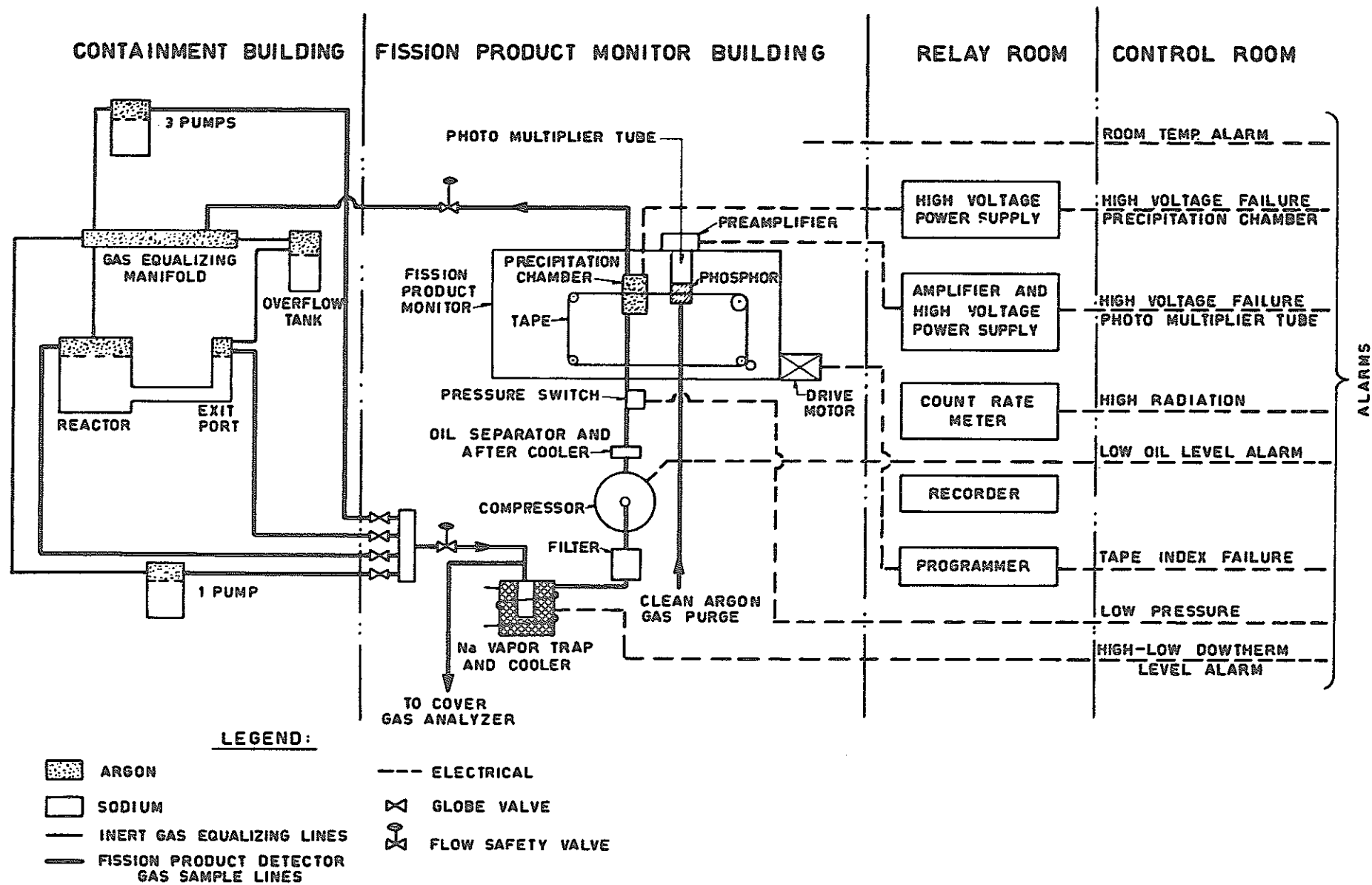


ID-103-H5407

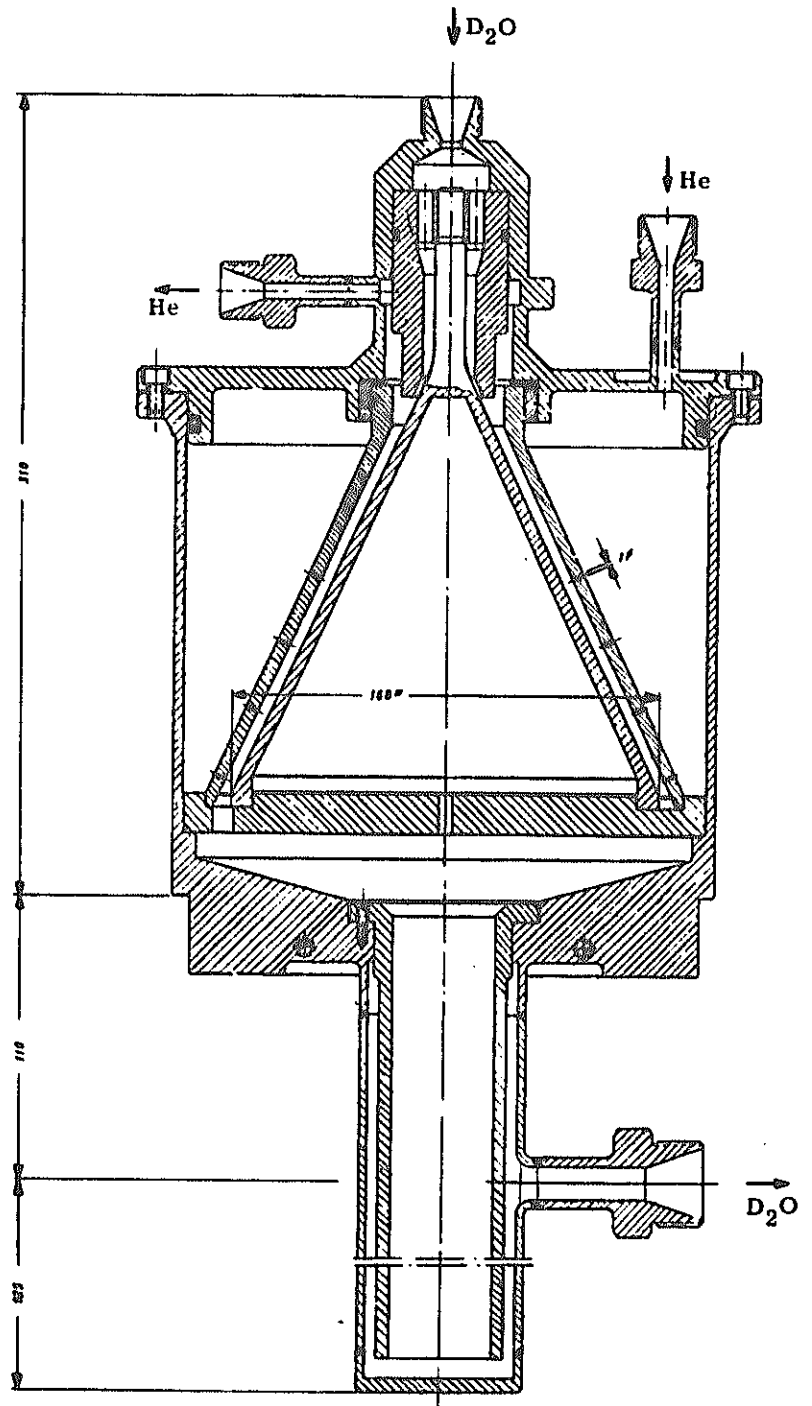
第9図 EBR-FERD (遅発中性子型検出器) response to insertion of bare pin  
(IAEA, FEDL Rcppt P.P.232より引用)



第10図 プレシピテータ検出装置

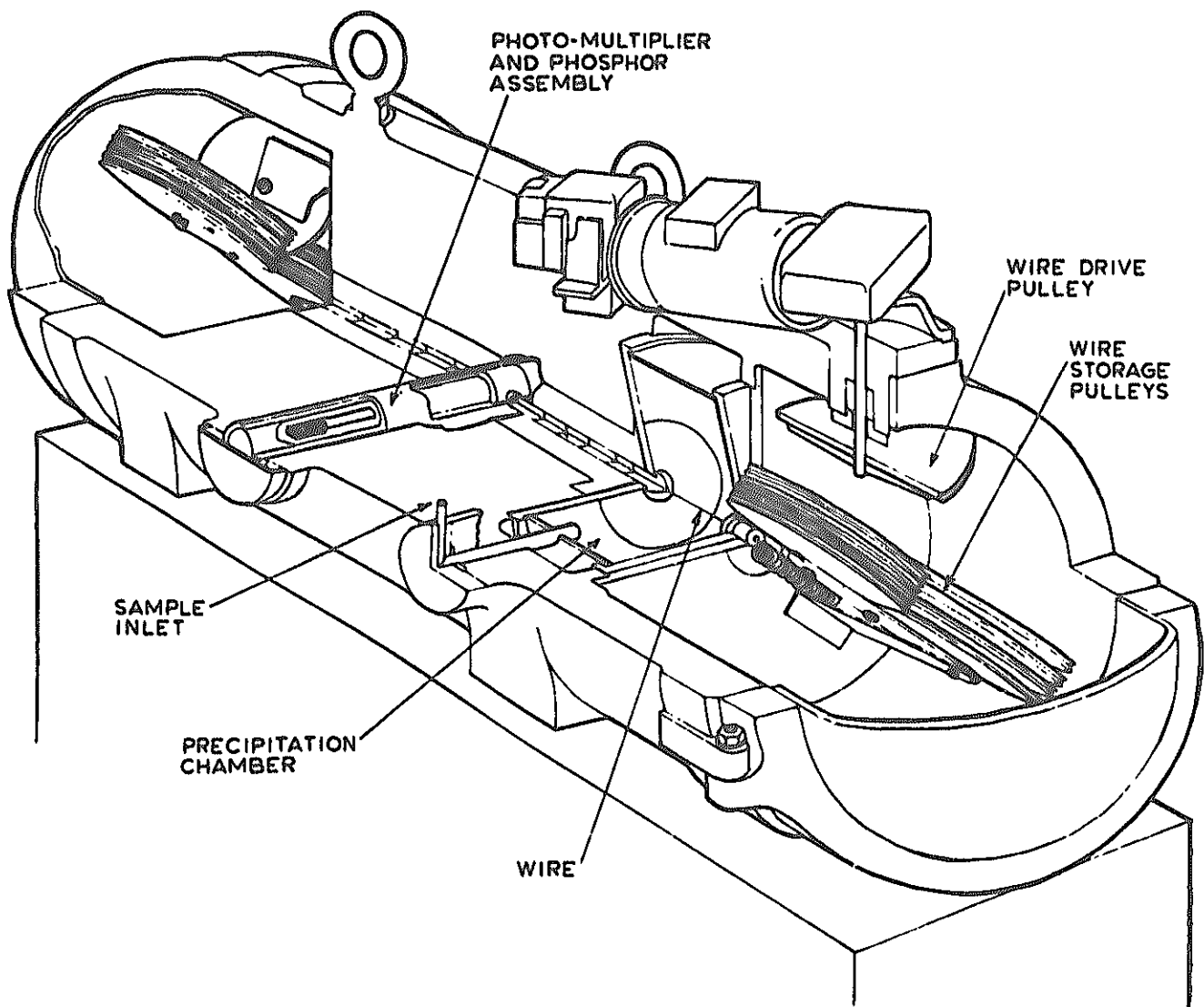


第11圖 Schematic drawing of the Fermi reactor fission-product monitor. (From Ref. [16]).  
(IAEA FFDL Report より引用)



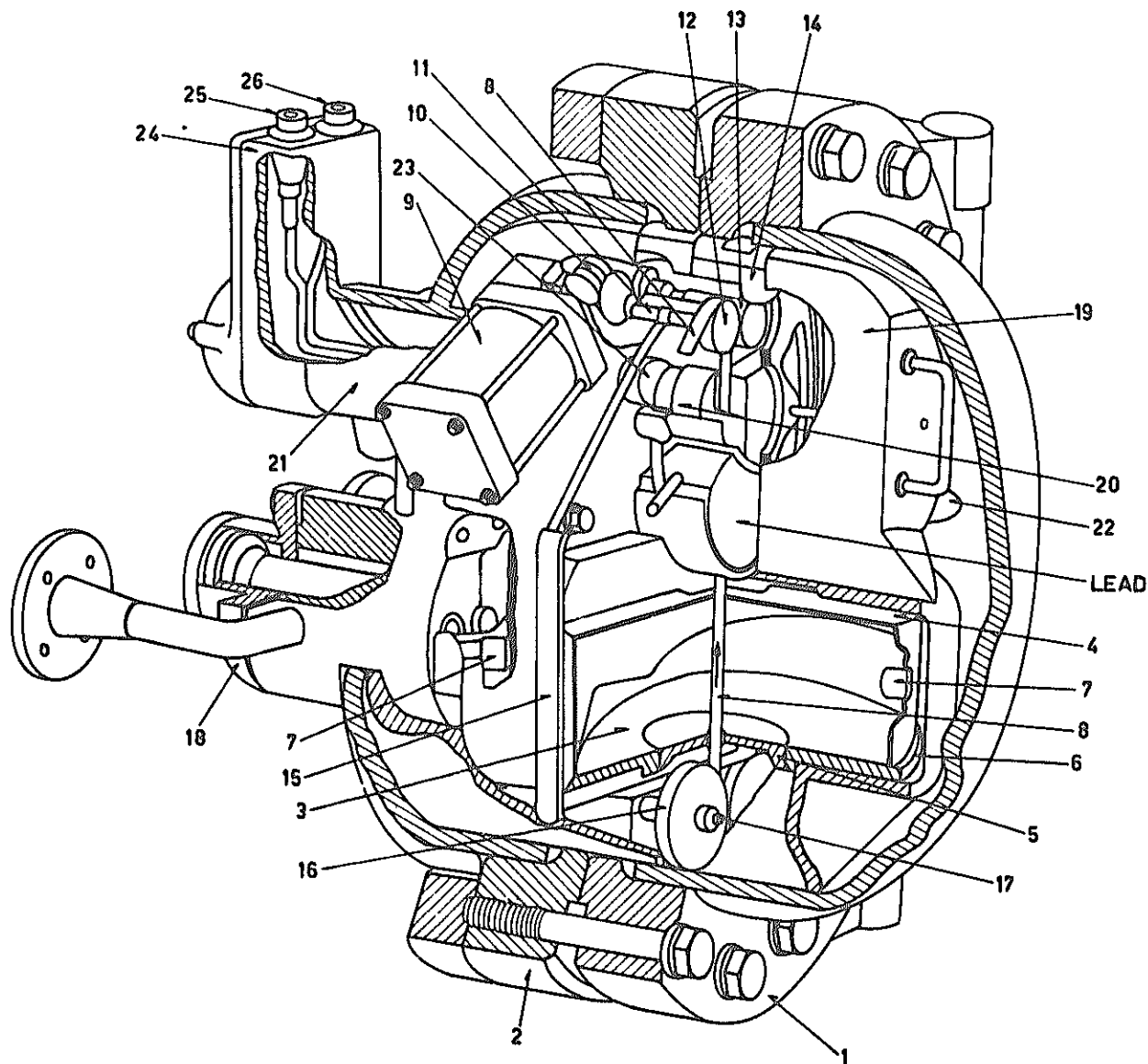
第12図 Scrubber.

IAEA FFDL Report より引用



第13図 The Calder Hall precipitator unit.  
(IAEA FFDL Report より引用)

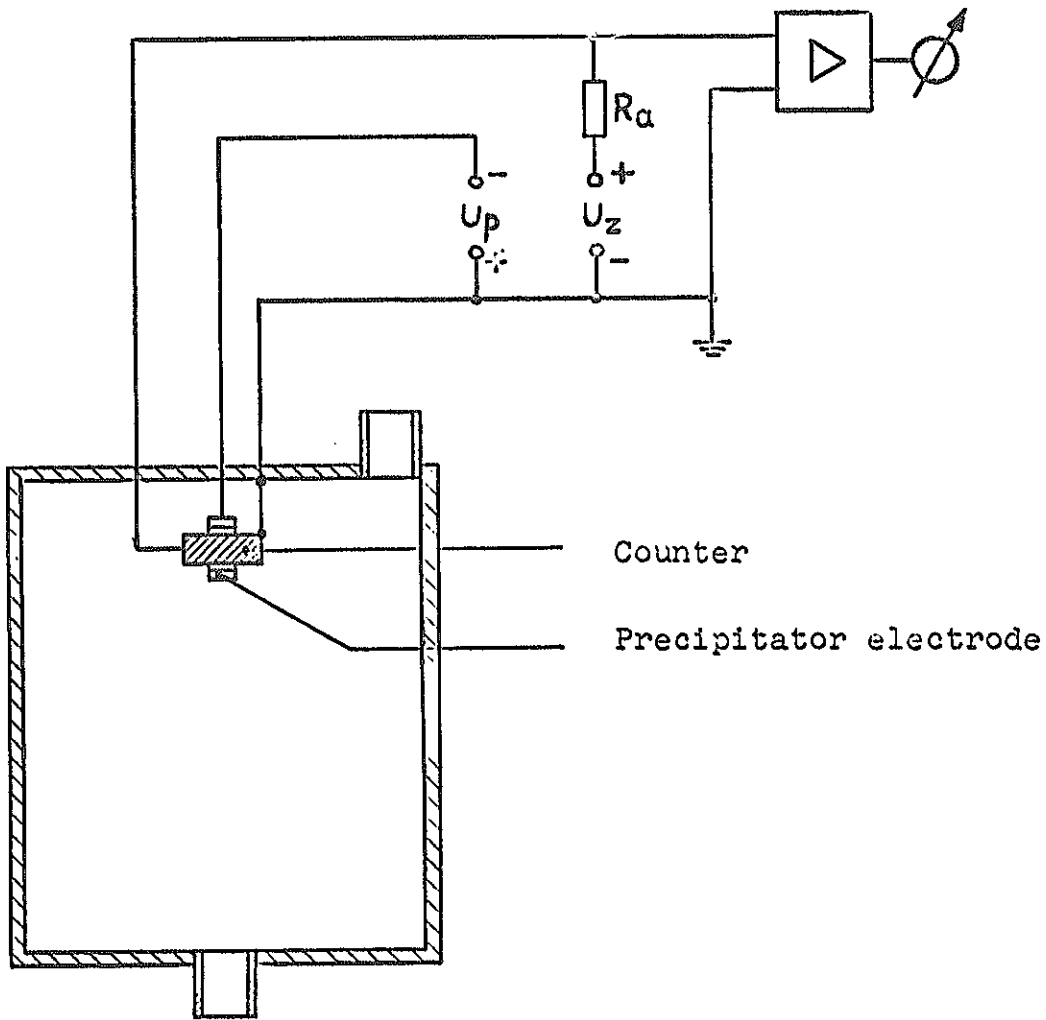




第14図 Cutaway drawing of the Fermi reactor fission-product monitor. (From Ref.[16]).

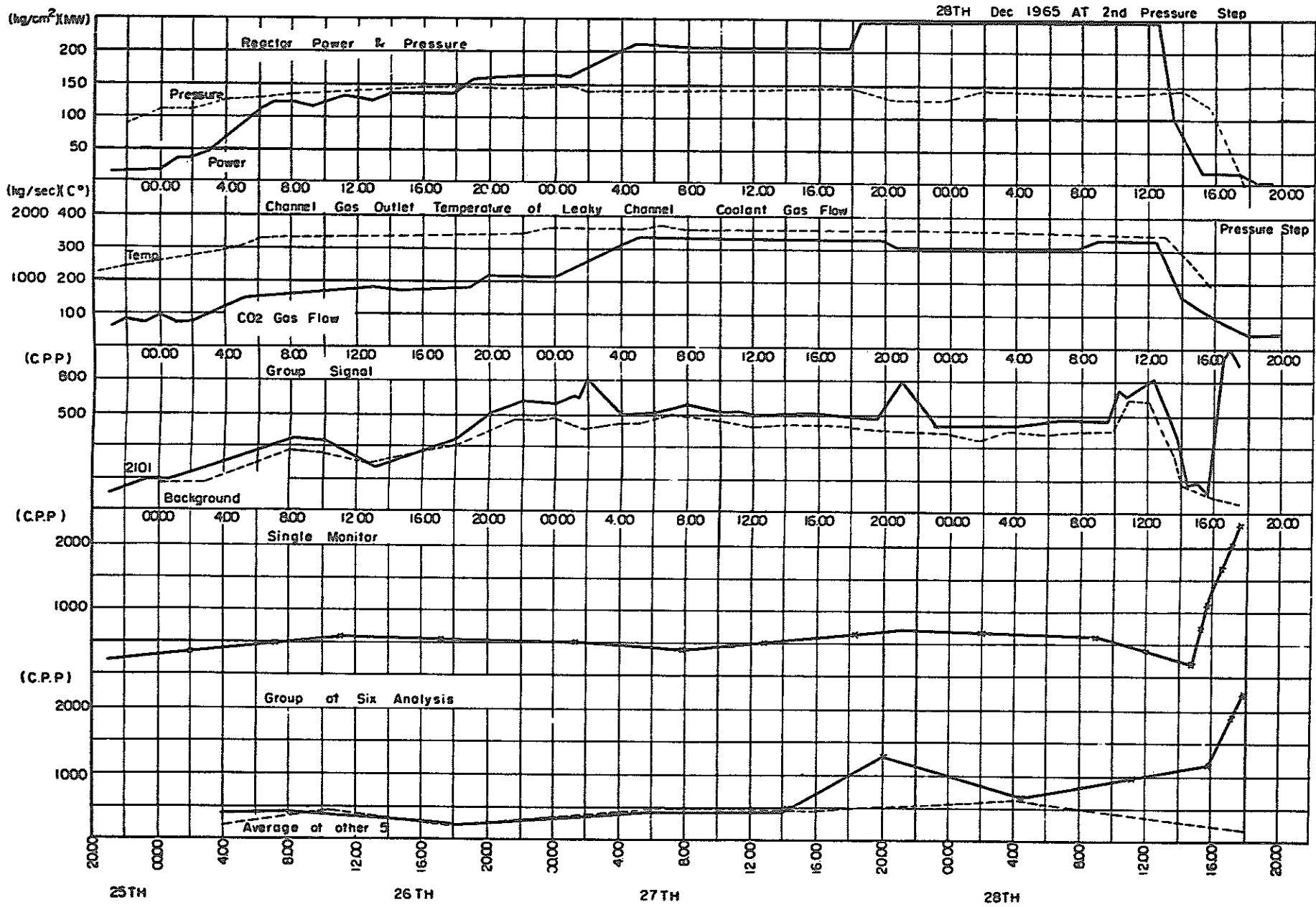
(IAEA FFDL Report より引用)

1. Front dome of pressure vessel. 2. Rear dome of pressure vessel. 3. Precipitation chamber. 4, 5 and 6. Precipitation chamber insulators. 7. Precipitation chamber gas inlet and outlet. 8. Stainless steel tape (0.005-in. thick x 0.25-in. wide). 9. Electric motor. 10. Wormgear. 11. Wormwheel. 12. Tape drive wheel. 13. Tape pressure wheel. 14. Tape storage magazine. 15. Tape guide. 16. Pulley. 17. Tape index microswitch. 18. Electrical connector. 19. Shield plug assembly. 20. Phosphor housing assembly. 21. Photomultiplier tube housing. 22. Purge gas outlet. 23. Photomultiplier tube. 24, 25 and 26. Junction box and electrical connectors for photomultiplier tube.



第15图 Electric circuit of the precipitator Type III  
IAEA FFDL Report p.p.90

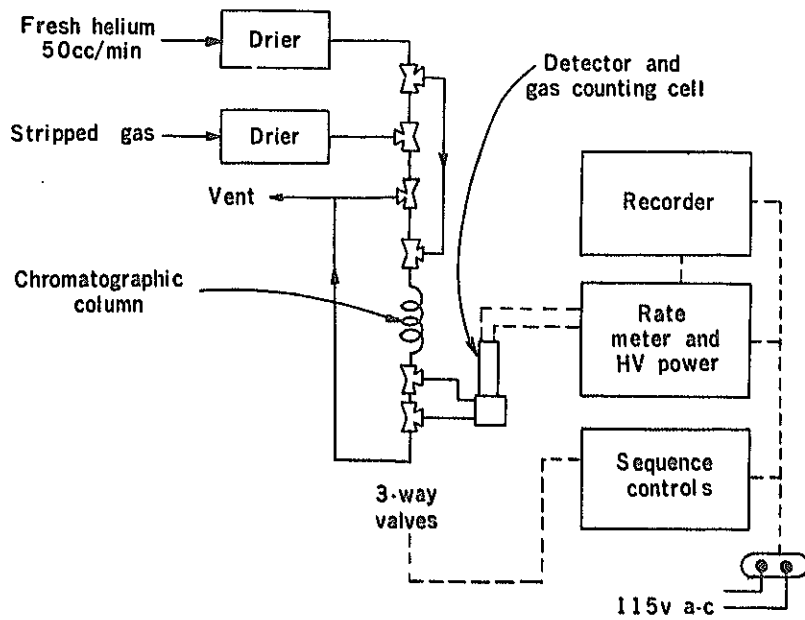
Ra Up Uz G Counter Precipitator electrode



第16回

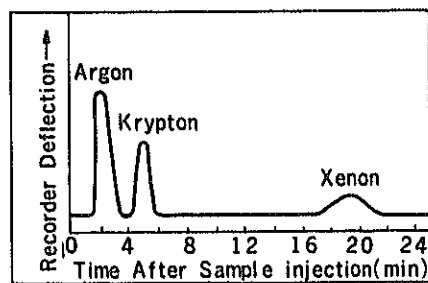
No. 8 leaky FE signal (2101-3) 12-48-24.

(IAEA FFDL Report より引用)

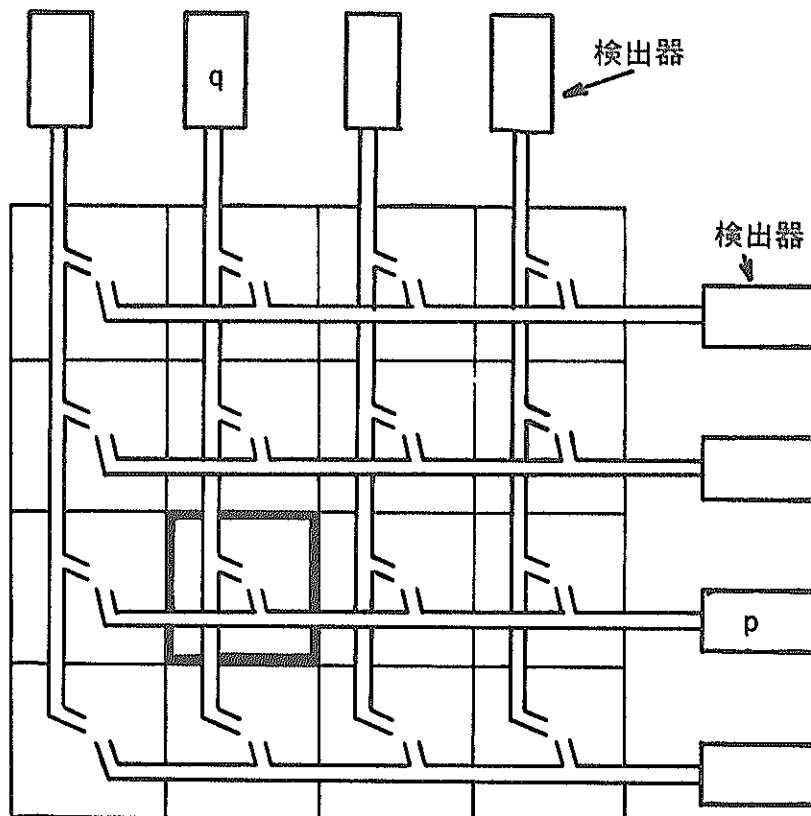


第10-2图 GASES STRIPPED from coolant are separated in column

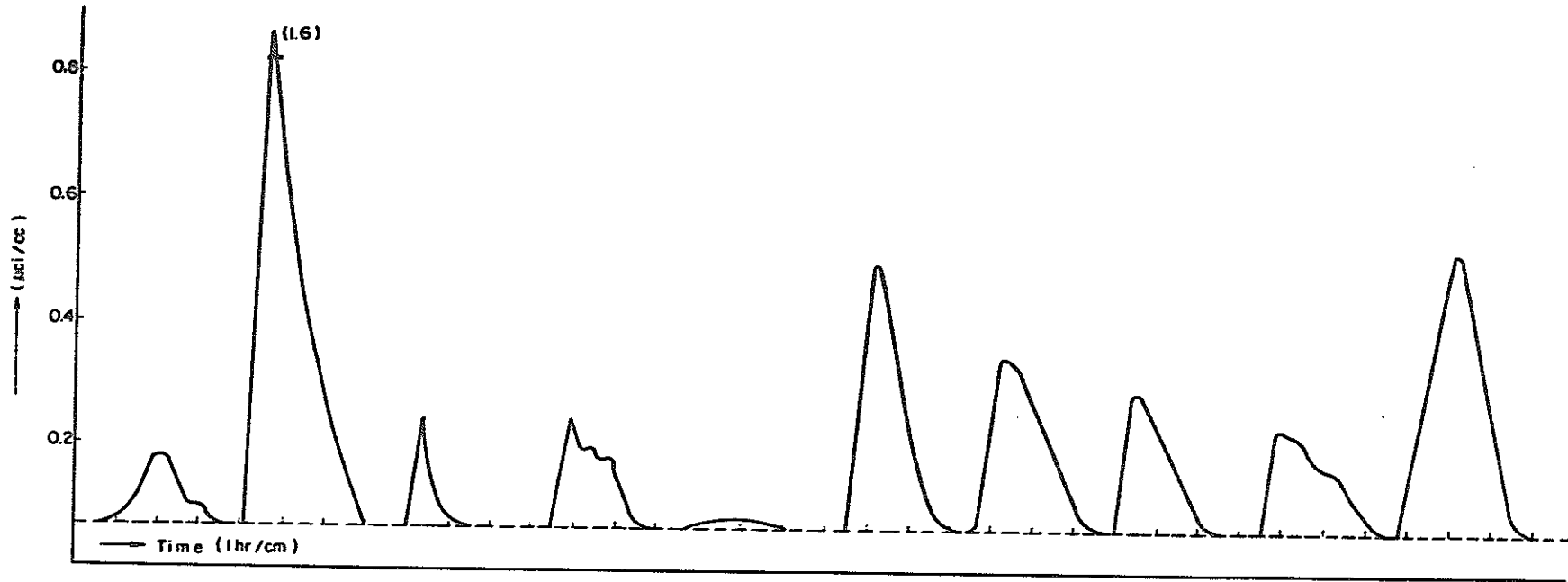
April, 1961-NUCLEONICS



第17图 TYPICAL SCAN of automatic chromatograph without discriminator



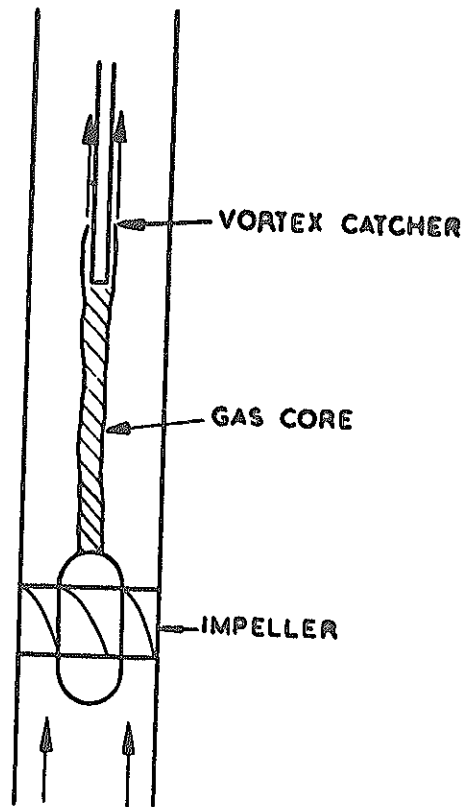
第18図 マトリックスサンプル法



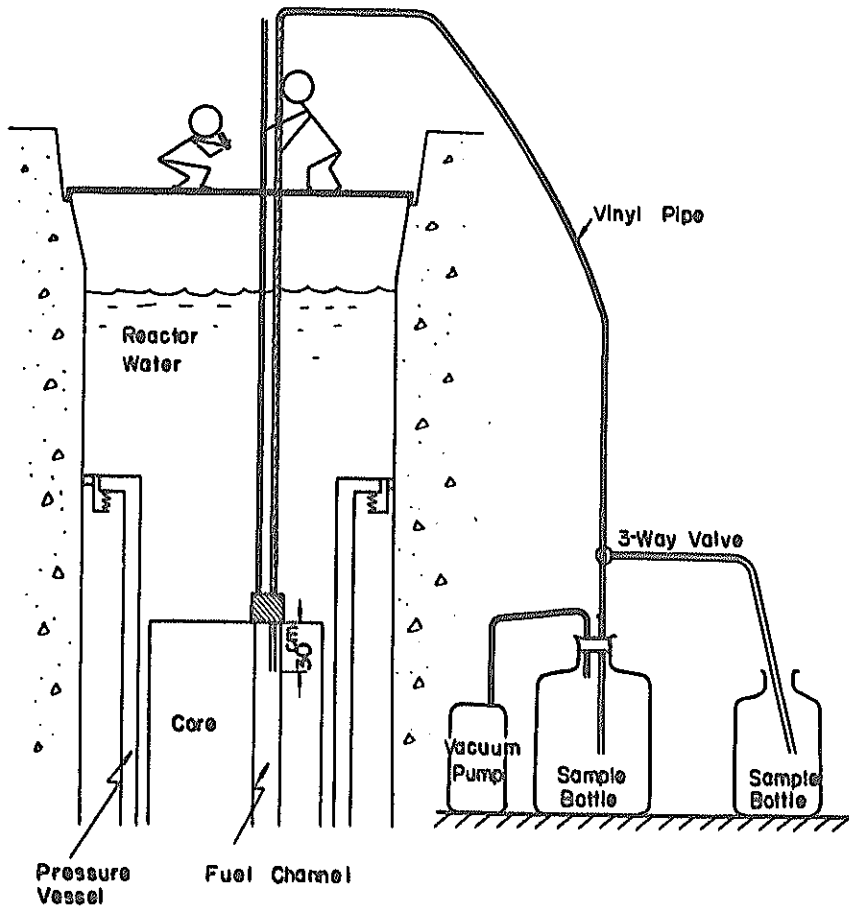
Control Rod	B-2	C-2	B-3	C-3	C-1	D-2	C-1	D-1	D-3	D-2																																																																																																																																																																
Prior to Withdrawal	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>104</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					104	F.I			F.I	F.I							<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>114</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					114	F.I			F.I	F.I							<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>104</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					F.I	F.I			104	F.I							<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>107</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					107	F.I			F.I	F.I							<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>( )</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>F.I</td></tr> </table>					( )	F.I			F.I	F.I						F.I	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>( )</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>F.I</td><td>F.I</td><td>F.I</td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					( )	F.I			F.I	F.I	F.I	F.I					<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>104</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>112</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>F.I</td></tr> </table>					104	F.I			F.I	112						F.I	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>172</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>112</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>F.I</td></tr> </table>					172	F.I			F.I	112						F.I	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>178</td><td>F.I</td><td>F.I</td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>112</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					178	F.I	F.I		F.I	112							<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>103</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>112</td><td>F.I</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					103	F.I			F.I	112	F.I					
104	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	F.I																																																																																																																																																																									
114	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	F.I																																																																																																																																																																									
104	F.I																																																																																																																																																																									
107	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	F.I																																																																																																																																																																									
( )	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	F.I																																																																																																																																																																									
			F.I																																																																																																																																																																							
( )	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	F.I	F.I	F.I																																																																																																																																																																							
104	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	112																																																																																																																																																																									
			F.I																																																																																																																																																																							
172	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	112																																																																																																																																																																									
			F.I																																																																																																																																																																							
178	F.I	F.I																																																																																																																																																																								
F.I	112																																																																																																																																																																									
103	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	112	F.I																																																																																																																																																																								
After Withdrawal	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>22</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>104</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					22	F.I			104	F.I							<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>23</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>104</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					23	F.I			F.I	104							<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>104</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					104	F.I			F.I	F.I							<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>20</td><td>104</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>F.O</td></tr> </table>					20	104			F.I	F.I						F.O	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>( )</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>F.O</td></tr> </table>					( )	F.I			F.I	F.I						F.O	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>( )</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>F.I</td><td>F.O</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					( )	F.I			F.I	F.I	F.O						<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>21</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>112</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>F.O</td></tr> </table>					21	F.I			F.I	112						F.O	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>25</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>112</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>F.O</td></tr> </table>					25	F.I			F.I	112						F.O	<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>25</td><td>F.I</td><td>F.O</td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>112</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					25	F.I	F.O		F.I	112							<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>23</td><td>F.I</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>F.I</td><td>112</td><td>F.O</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>					23	F.I			F.I	112	F.O					
22	F.I																																																																																																																																																																									
104	F.I																																																																																																																																																																									
23	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	104																																																																																																																																																																									
104	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	F.I																																																																																																																																																																									
20	104																																																																																																																																																																									
F.I	F.I																																																																																																																																																																									
			F.O																																																																																																																																																																							
( )	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	F.I																																																																																																																																																																									
			F.O																																																																																																																																																																							
( )	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	F.I	F.O																																																																																																																																																																								
21	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	112																																																																																																																																																																									
			F.O																																																																																																																																																																							
25	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	112																																																																																																																																																																									
			F.O																																																																																																																																																																							
25	F.I	F.O																																																																																																																																																																								
F.I	112																																																																																																																																																																									
23	F.I																																																																																																																																																																									
F.I	112	F.O																																																																																																																																																																								

Note : F. O & No sign : Full Out  
 F. I : Full In  
 104 : 104 cm Withdrawal

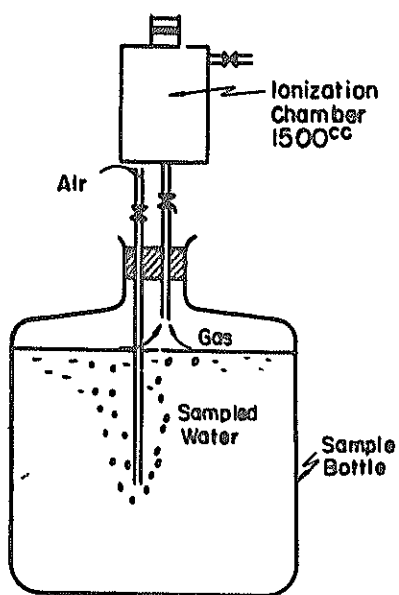
第19図 Increase in off-gas activity for various withdrawals.  
 (IAEA, FFDL Reportより引用)



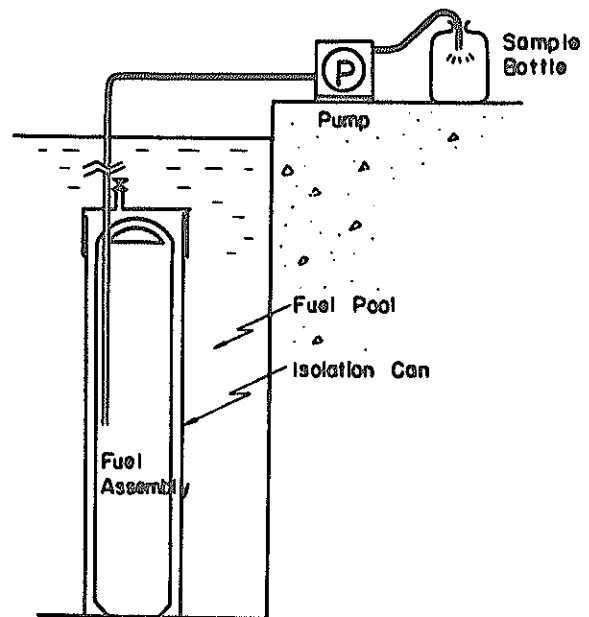
第20図 Schematic diagram and photograph of vortex assembly.  
IAEA FFDL Report より引用



第21图 Installation of sampling system in JPDR.

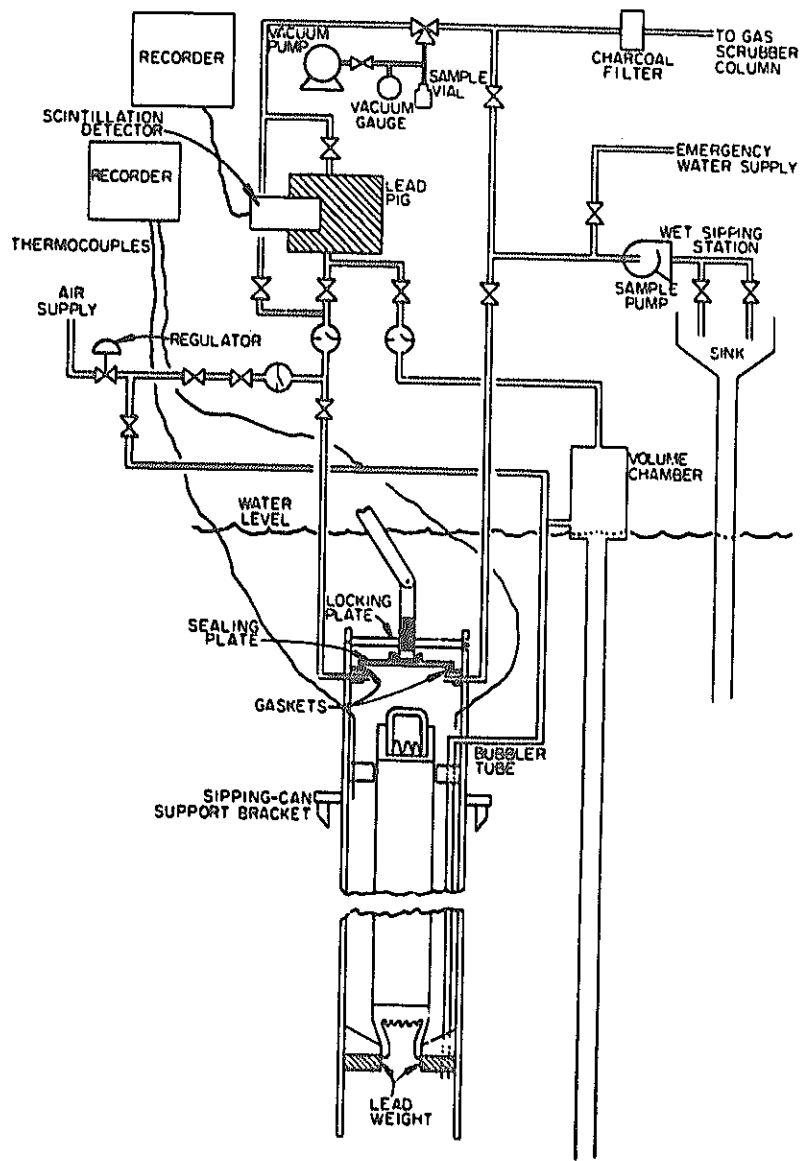


第22图 Device for fission-gas sampling and measurement.



第23图 Isolation can test.





第24圖 Fuel sipping equipment used at Humboldt Bay Power Plant. (From Ref. [6]).  
 (IAEA FFDL Report より引用)